

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.

Université MOHAMED KHIDER BISKRA

Faculté des sciences et de la technologie

Département de Génie Mécanique

N°d'ordre :

Serie :

Mémoire présenté par :

HARIZ Abdelkader Abdelhafid

Pour obtenir le diplôme de Magistère en génie Mécanique :

Option : Énergétique.

**Etat de l'Art sur les Energies Solaire
et Eolienne en Algérie**

Soutenu le / /2010

Devant le jury :

Président : Moummi Noureddine

Maître de conférences

Univ.Biskra

Rapporteur : Moummi Abdelhafid

Maître de conférences

Univ.Biskra

Examineurs : Benchabene Adel

Maître de conférences

Univ.Biskra

Année 2010

Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Mr Moumni Abdelhafid maître de conférences à l'université Mohammed khider de Biskra, qui m'a dirigé le long de ce travail et de sa patience avec moi, et Mr Benchaabane Adel qui m'a dirigé aussi le long de ce travail et qui par ses conseils, a été un guide précieux dans l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à remercier, Dr Moumni Nouredine, Maître de conférences à l'université de Biskra en sa qualité de président de jury.

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

Nomenclature

G_h : Rayonnement global ($W.m^{-2}$)

S_h : Rayonnement direct ($W.m^{-2}$)

D_h : Rayonnement diffus ($W.m^{-2}$)

h : Hauteur du soleil ($^{\circ}$)

τ_1 : Transmission pour le direct

τ_2 : Transmission pour le diffus

J : Numéro du jour de l'année

H_d : Rayonnement diffus quotidien sur une surface horizontale ($W.h.m^{-2}$)

H : Rayonnement global quotidien sur une surface horizontale ($W.h.m^{-2}$)

n : Nombre d'heures lumineuses de soleil par jour

N : Nombre d'heures du jour

K_t : Indice de clarté quotidien

I_d : Rayonnement diffus ($W.m^{-2}$)

I_g : Rayonnement global ($W.m^{-2}$)

T_L : Facteur de couple de Linke

I_n : Irradiation solaire directe normale ($W.m^{-2}$)

I_0 : Constante solaire ($W.m^{-2}$)

G_h : Irradiation globale sur une surface horizontale ($W.h.m^{-2}$)

D_h : Irradiation diffuse sur une surface horizontale ($W.h.m^{-2}$)

B_H : Eclaircissement dû au rayonnement direct sur plan horizontal ($W.m^{-2}$)

τ_r : coefficient de transmission après diffusion moléculaire de Rayleigh

τ_w : coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau
 τ_g : coefficient de transmission après diffusion par les gaz
 τ_a : coefficient de transmission après diffusion par les aérosols
 D_H : Eclairement dû au rayonnement diffus sur plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 D_r : Eclairement dû au rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh ($W.m^{-2}$)
 D_a : Eclairement dû au rayonnement diffus après diffusion par les aérosols ($W.m^{-2}$)
 D_m : Eclairement dû au rayonnement diffus dû au phénomène de multiple réflexion en terre
 Atmosphère ($W.m^{-2}$)
 G_H : Eclairement dû au rayonnement global sur plan horizontal ($W.m^{-2}$)
 G_m : Irradiation solaire globale mensuelle ($Cal.cm^{-2}$)
 S_m : Moyenne mensuelle du nombre d'heures ensoleillées quotidiennes
 h_m : Hauteur du soleil au midi pour le 1^{er} jour du mois ($^{\circ}$)
 ρ_s : coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol par télédétection
 θ_s : Angle d'incidence du soleil ($^{\circ}$)
 θ_v : Angle d'incidence d'observation ($^{\circ}$)
 ϕ_s : Angle de direction du soleil ($^{\circ}$)
 ϕ_v : Angle de direction d'observation ($^{\circ}$)
 γ : Hauteur du capteur ($^{\circ}$)
 α : Azimut du capteur ($^{\circ}$)
 β : Inclinaison du capteur ($^{\circ}$)
 Q_t : Quantité de chaleur transmise par les surfaces opaques ($Kcal.h^{-1}$)
 K : coefficient d'échange global ($Kcal/h.m^2.^{\circ}C$)
 T_{am} : Température de l'air extérieur ($^{\circ}C$)

T_i : Température de l'air intérieur (°C)

Δt_{eqc} : Différence de température équivalente calculée (°C)

Δt_{eq} : Différence de température équivalente (°C)

F : Surface d'échange thermique (m²)

q : Densité du flux de la chaleur (Kcal/h.m²)

COP : Coefficient de performance

Q_E : Chaleur absorbée par l'évaporateur (J)

Q_G : Chaleur absorbée par le générateur (J)

W_P : Travail donnée par la pompe (J)

P_F : Capacité de réfrigération (W)

\dot{m} : Débit massique de réfrigération (Kg.s⁻¹)

P : Puissance éolienne moyenne disponible (W)

A : Surface attaquée par l'air (m²)

V : Vitesse de l'air (m.s⁻¹)

$f(V)$: Distribution en fréquences des vitesses mesurées

k : Facteur de forme

c : Facteur de correction (m.s⁻¹)

ff_0 : Fréquence des vents calmes.

SOMMAIRE

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE1 : ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE.....	5
1.1 INTRODUCTION.....	5
1.2. LE GISEMENT SOLAIRE.....	6
1.2.1 RAYONNEMENT INCIDENT AU SOL.....	6
1.2.2 RAYONNEMENT GLOBAL.....	7
1.2.3 FLUX, PUISSANCE, ENERGIE.....	7
1.2.4 LA CONSTANTE SOLAIRE.....	7
1.2.5 SPECTRE DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	7
1.3 L'ATMOSPHERE.....	8
1.3.1 LES CONSTITUANTS GAZEUX FIXES.....	8
1.3.2 LES CONSTITUANTS GAZEUX VARIABLES.....	8
1.3.3 LES AEROSOLS.....	8
1.3.4 LES NUAGES.....	9
1.4 LES OBSERVATIONS METEOROLOGIQUE.....	9
1.5 ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE.....	10
1.5.1 MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	10
1.5.2 OBJECTIFS DES METHODES D'ESTIMATION.....	11
1.5.3 CLASSIFICATION DES METHODES D'ESTIMATION.....	11
1.5.4 CALCUL DES IRRADIATIONS OU DES ECLAIREMENTS PAR CIEL CLAIR.....	12
1.5.5 CALCUL DES IRRADIATIONS JOURNALIERES TEMPS QUELCONQUE.....	13
1.5.6 CALCUL DES IRRADIATIONS HORAIRES TEMPS QUELCONQUE.....	13
1.6 LA TELEDETECTION.....	13
1.6.1 LES SATELLITES.....	14
1.6.1.1 SATELLITES A DEFILEMENT.....	14
1.6.1.2 SATELLITES GEOSTATIONNAIRES.....	15
1.6.1.3 SATELLITE METEOSAT.....	15
1.6.2 LA TRANSMISSION ET INTERPRETATION DES IMAGES.....	15
1.6.2.1 LES IMAGES NUMERIQUES.....	15
1.6.2.2 LES PHOTOGRAPHIES.....	16
1.6.2.3 LA TRANSMISSION.....	16
1.6.2.4 INTERPRETATION DES IMAGES.....	16
1.7 TRAVAUX DE RECHERCHES SUR L'ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE.....	17

1.7.1 ETUDES CONCERNANT LE GISEMENT SOLAIRE DE L'ALGERIE POUR L'ENSEMBLE DU TERRITOIRE.....	18
1.7.2 ETUDES CONCERNANT LE GISEMENT SOLAIRE DE L'ALGERIE SPECIFIANT DES SITES SEPARES.....	24
1.7.3 ETUDES SUR L'EVALUATION DU GISEMENT SOLAIRE PAR IMAGES SATELLITAIRES.....	49
1.8 CONCLUSION.....	58
1.9 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	59

CHAPITRE2 : SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES

2.1 INTRODUCTION.....	65
2.2 SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES.....	66
2.3 SPECIFICITE DES SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES.....	66
2.4 UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE ET DIFFERENTES SORTES DES CAPTEURS.....	67
2.5 ORIENTATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE.....	68
2.6 TRAVAUX DE RECHERCHES SUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES.....	70
2.6.1 TRAVAUX SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE.....	70
2.6.2 TRAVAUX SUR LE SECHAGE SOLAIRE.....	76
2.6.3 TRAVAUX SUR LA DISTILLATION SOLAIRE.....	83
2.6.4 TRAVAUX SUR LE FROID ET LA CLIMATISATION SOLAIRE.....	90
2.6.5 TRAVAUX SUR LA PRODUCTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE SOLAIRE.....	98
2.6.6 TRAVAUX SUR LES DISPOSITIFS DE CAPTATION SOLAIRES.....	101
2.6.7 TRAVAUX SUR LA PRODUCTION D'AUTRES ENERGIES PAR UTILISATION DE ENERGIE SOLAIRE.....	116
2.7 CONCLUSION.....	118
2.8 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	120

CHAPITRE3 : ESTIMATION DU GISEMENT EOLIEN

3.1 INTRODUCTION.....	125
3.2 ORIGINE DU VENT.....	126
3.3 CARACTERISATION ENERGETIQUE HORIZONTALE DE LA VITESSE DU VENT.....	126
3.4 MODELES D'AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DES VITESSES DU VENT.....	127
3.4.1 DISTRIBUTION DE WEIBULL.....	127
3.4.2 DISTRIBUTION HYBRIDE DE WEIBULL.....	128
3.4.3 DISTRIBUTION DE RAYLEIGH.....	128

3.5	EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES VENT.....	129
3.6	PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT.....	129
3.7	EXTRAPOLATION VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT.....	130
3.8	EXTRAPOLATION DES PARAMETRES DE WEIBULL.....	130
3.9	INTERPOLATION HORIZONTALE DES PARAMETRS VENT.....	130
3.10	VARIATION TEMPORELLE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT.....	131
3.11	TRAVAUX DE RECHERCHES SUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN.....	131
3.12	CONCLUSION.....	150
3.13	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	150
CHAPITRE4 : SYSTEMES ENERGETIQUES EOLIENS		
4.1	INTRODUCTION.....	153
4.2	SYSTEMES ENERGETIQUES EOLIENS.....	154
4.3	POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN.....	155
4.4	EXPANSION DES APPLICATIONS EOLIENNES.....	155
4.5	DOMAINE D'UTILISATION DES EOLIENNES.....	156
4.5.1	EOLIENNES DE POMPAGE MECANIQUE.....	156
4.5.2	EOLIENNES DE POMPAGE ELECTRIQUE.....	156
4.5.3	FERMES EOLIENNES.....	157
4.5.4	AEROGENERATEURS DE GRANDE PUISSANCE.....	157
4.6	DISPOSITION DES EOLIENNES DANS UNE FERME EOLIENNE.....	157
4.7	TRAVAUX DE RECHERCHES SUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES EOLIENS.....	159
4.8	CONCLUSION.....	181
4.9	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	182
CONCLUSION GENERALE.....		184

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

INRODUCTION GENERALE

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

INTRODUCTION GENERALE

La consommation énergétique mondiale ne cesse d'augmenter, la grande partie de cette énergie consommable provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon,.....etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace s'est manifestée principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est de faire atténuer cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie classiques à des critères très sévères.

Si l'on admet qu'il n'existe aucune chance de survie sans énergie, la sagesse commande de rechercher et de développer d'autres sources et notamment les énergies renouvelables. Bien que, le développement et l'exploitation de nouvelles énergies ne se posent pas en termes de concurrence, mais bien de complémentarité avec les énergies usuelles. On peut considérer que le développement de ces énergies renouvelables est par conséquent, une composante fondamentale de l'aménagement du territoire.

Les énergies renouvelables ont l'avantage d'être propres et propres, contrairement à l'énergie conventionnelle qui présente les contraintes de l'engorgement du réseau électrique et les contraintes du transport de combustible, ainsi que les entretiens périodiques des installations.

Sont considérées comme énergies renouvelables, toutes les énergies issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique, et biomasse), l'énergie issue du magma terrestre (géothermie), et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Elles sont inépuisables, mais en quantité limitée, à un endroit et en un instant donné. Ces énergies n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement.

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies renouvelables, notamment pour les applications solaires et éoliennes. En effet, vu l'importance et l'intensité du rayonnement solaire reçu au sol, ainsi que la durée d'insolation qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, ainsi qu'un gisement éolien considérable.

Notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergies renouvelables, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées dans plusieurs applications, notamment pour l'électrification et le pompage.

L'élément important pour l'évaluation d'un type d'énergie est la puissance, qui peut être considérée comme garantie par cette énergie, de ce point de vue, la situation des énergies renouvelables est extrêmement variable d'une technologie à l'autre et d'un contexte à l'autre.

Le solaire et l'éolien sont des énergies intermittentes et relativement aléatoires, peuvent avoir une valeur en termes de puissance électrique conventionnelle, évitée pour les réseaux si les pointes de consommation sont simultanées à l'occurrence de ces énergies et que le foisonnement des sources dispersées est suffisant. Ce qui peut être le cas du solaire et de la consommation engendrée par la climatisation ou de l'éolien et de la pointe de consommation en hiver.

Pour l'énergie solaire, les systèmes actifs sont destinés au chauffage de l'eau sanitaire et parfois, au chauffage de l'habitat (par exemple le chauffe-eau solaire). Les capteurs solaires peuvent aussi servir à chauffer l'habitat par la technique du plancher solaire direct, dans laquelle l'eau chauffée en toiture par les capteurs circule ensuite dans les tuyauteries d'un plancher chauffant.

L'énergie éolienne est la filière qui se développe la plus rapidement aujourd'hui dans le monde pour la production d'électricité en utilisant des fermes d'éoliennes implantées sur des surfaces considérables.

La conversion thermodynamique de l'énergie solaire est basée sur trois types de technologies qui ont été développées ou sont en cours de développement, les capteurs cylindro-paraboliques, les héliostats concentrant le rayonnement sur une chaudière centralisée (tours), et le disque parabolique concentrant le rayonnement sur un récepteur couplé à un moteur Stirling ou une turbine.

La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est basée sur l'effet photovoltaïque, qui permet de convertir directement de la lumière en électricité, grâce à des matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium actuellement. Les applications de l'électricité photovoltaïque sont diverses, telles que les systèmes de production autonome hors réseaux électrique le plus souvent avec batteries d'accumulateurs, ou des systèmes connectés aux réseaux de transport et distribution d'électricité envoyant sur le réseau l'excédent d'électricité non consommé localement.

La conversion éolienne passe par l'utilisation d'une machine éolienne transformant l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne), l'énergie disponible subit une suite de pertes en cascades jusqu'à la sortie de la machine. Cette dernière sera couplée à une génératrice de courant électrique. L'implantation d'un système énergétique solaire ou éolien pour satisfaire un besoin précis en un lieu donné ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité du système en fonction du gisement local, c'est-à-dire de l'énergie réellement disponible en considérant les différents types de temps durant la journée, le mois, la saison, et l'année. Alors, une connaissance du gisement solaire ou éolien local doit être plus ou moins approfondie selon le type du système énergétique utilisé et son degré d'autonomie (appoint ou non).

Pour déterminer les potentialités éoliennes d'un site, il faut passer impérativement par le traitement statistique des mesures de la vitesse du vent et de sa direction en introduisant les effets de la rugosité du sol, des obstacles, de la stabilité de l'atmosphère,... etc.

Actuellement, deux sources de données météorologiques peuvent être utilisées pour estimer l'énergie solaire disponible au sol au fil des jours ou des heures. La première est constituée par les données des stations météorologiques qui existent souvent depuis plusieurs dizaines d'année. La seconde se constitue avec les images des satellites météorologiques géostationnaires qui ont une bonne résolution temporelle et une excellente résolution géographique vis-à-vis de tous les réseaux de mesure.

Dans ce travail, le premier chapitre est consacré au gisement solaire, c'est-à-dire l'alimentation des systèmes de conversion solaires, et son estimation à partir des observations météorologiques et des images satellitaires en l'absence de mesures spécifiques. Dans la première partie du chapitre, on a traité sommairement une description du principe de la télédétection, les types des satellites et leur classement, ainsi que les images satellitaires et leurs interprétations.

Dans une seconde partie de ce premier chapitre, on a cité les travaux de recherche effectués par les chercheurs nationaux et autres, concernant l'estimation du gisement solaire par utilisation des données météorologiques et radio métriques, ainsi que par traitement des images de satellites pour l'établissement de l'Atlas solaire.

Dans le deuxième chapitre, on présente les systèmes énergétiques solaires et leurs performances. On souligne dans un premier lieu les besoins spécifiques des systèmes énergétiques solaires ainsi que les différentes sortes des capteurs solaires et leurs domaines d'utilisations. Dans la deuxième partie du chapitre, on a présenté les travaux de recherche qui se sont intéressés aux systèmes énergétiques solaires, à leurs performances et dimensionnements.

Le troisième chapitre est consacré au gisement éolien, c'est-à-dire au calcul des vitesses du vent et des potentiels énergétiques éoliens pour l'alimentation des systèmes de conversion éoliens. Dans une première partie, on a présenté les modèles d'ajustement de la distribution des vitesses du vent. Le modèle usuel le plus utilisé est le modèle de la distribution de Weibull. L'interpolation horizontale et l'extrapolation verticale des paramètres du vent sont aussi passées en revue.

La seconde partie du chapitre donne les travaux de recherches concernant le calcul du vent et l'évaluation du potentiel énergétique éolien pour l'établissement de l'Atlas éolien de l'Algérie.

Le dernier chapitre est réservé à l'étude des systèmes énergétiques éoliens et leurs performances, ainsi que les effets de quelques facteurs sur le rendement énergétique de ces systèmes.

Dans une première partie, sont présentés quelques définitions sur les systèmes énergétiques éoliens, une description des éoliennes et aérogénérateurs, ainsi que leurs domaines d'utilisation.

La deuxième partie de ce dernier chapitre, comporte les travaux de recherches effectués sur les systèmes de conversion éoliennes, leurs performances, leurs dimensionnements, ainsi que leurs distributions sur terrain et leurs effets sur le rendement de ces systèmes.

Il est certain que ces chapitres seront à compléter à l'aide des publications futures. Nous espérons que ce modeste travail, permettra de donner une assimilation, même générale, sur la situation des énergies solaire et éolienne en Algérie et ouvre la voie aux futurs travaux sur les énergies renouvelables en Algérie pour la contribution au développement de l'économie nationale, par la bonne maîtrise des processus technologiques de production.

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 1

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 1

ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE

1.1-INTRODUCTION :

Une connaissance raisonnablement précise de la quantité d'énergie solaire à n'importe quel endroit est nécessaire pour beaucoup d'applications d'énergie solaire. Cependant, l'équipement nécessaire pour leurs mesures est disponible seulement à quelques endroits. Pour cette raison il y a eu des tentatives à les estimer par des modèles théoriques.

Pratiquement, c'est dans les régions pour lesquelles on a le moins de mesures de rayonnement solaire que les projets d'implantation des systèmes énergétiques solaires pour le pompage de l'eau, le dessalement, ou l'alimentation électrique décentralisée sont les plus importants et les plus exigeants.

Deux sources de données météorologiques peuvent être utilisées pour estimer l'énergie solaire disponible au sol au fil des jours ou des heures. La première est constituée par les fichiers des stations météorologiques qui existent souvent depuis plusieurs dizaines d'années. La seconde se constitue avec les images des satellites météorologiques géostationnaires qui ont une bonne résolution temporelle et une excellente résolution géographique vis-à-vis de tous les réseaux de mesure.

Un certain nombre d'approches ont été employées pour l'évaluation de cette énergie. Dans une des approches, l'utilisation est faite par les paramètres atmosphériques mesurables comme la densité optique, la réflectivité extérieure de surface, la quantité d'eau précipitant,...etc. L'autre approche consiste d'employer des relations empiriques entre l'irradiation globale, diffuse ou extraterrestre et les paramètres météorologiques tels que la durée d'insolation, l'humidité relative et la température.

Ayant acquis des données sur le gisement solaire, soit par mesure, soit par estimation, il faut les présenter de telle façon qu'elles soient accessibles aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires, qu'elles puissent servir pour un premier choix du type de système : à concentration ou non, autonome ou non et à stockage journalier ou saisonnier. Ces données devront ensuite permettre le dimensionnement des divers éléments du système et éventuellement l'évaluation des risques de non satisfaction des besoins prévus dans le cas d'une séquence peu probable des jours mauvais pour laquelle le stockage prévu serait insuffisant.

Dans ce chapitre, on désire connaître les informations sur l'évaluation du potentiel énergétique solaire concernant l'Algérie, on veut voir du près les résultats réalistes obtenus sur la description du

gisement solaire de ce pays, c'est-à-dire ce gisement est-il bien défini en tout point du territoire Algérien.

On a commencé ce chapitre par une description de quelques notions utiles concernant la description du gisement solaire qui a été défini par une succession de flux d'énergie ou de puissance. Les composantes du rayonnement solaire incident au sol sont aussi traitées, le direct qui provient du disque solaire et le diffus qui provient de tous les éléments irradiés par le soleil, la constante solaire est aussi discutée. L'atmosphère, caractérisée par ses constituants fixes et variables, a été le sujet de l'atténuation des rayons incidents du disque solaire.

On a mis l'accent sur les observations météorologiques effectuées dans les stations qui peuvent être utilisées pour estimer l'énergie solaire en l'absence des mesures. Alors, dans le cas de irradiations par ciel clair on introduit le coefficient d'Angström et le facteur de trouble de Linke.

Une description sommaire a été discutée concernant le principe de la télédétection, les satellites et ses caractéristiques, ainsi que les images numériques satellitaires et leurs interprétations.

Enfin, on a donné les travaux de recherche effectués par des chercheurs concernant l'estimation de l'énergie solaire par les modèles théoriques et par traitement des images satellitaires concernant l'Algérie.

1.2-LE GISEMENT SOLAIRE :

Bien que critiquable et critiqué, cette appellation devient usuelle pour désigner l'ensemble des caractéristiques de la ressource locale en énergie solaire, c'est-à-dire ses fluctuations temporelles.

La connaissance du gisement solaire local peut être plus ou moins complète et sa présentation plus ou moins détaillée selon l'usage. Les deux problèmes majeurs de la description du gisement solaire sont d'une part, d'accumuler le plus grand nombre possible de données (faible pas de temps et longues séries) et d'autre part, de les compacter sans perdre les informations intéressantes notamment les séries chronologiques.

1.2.1-RAYONNEMENT INCIDENT AU SOL :

A considérer ici les rayonnements dont le spectre s'entend de $0,3 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$ en laissant de côté le rayonnement thermique de plus grandes longueurs d'ondes. Les composantes de rayonnement incident au sol instantanément sont :

- Le direct : qui provient du disque solaire et qui a subit l'atténuation due à la traversée de l'atmosphère.

- Le diffus : qui provient de tous les éléments irradiés par le soleil, à savoir, la voûte céleste sans nuage (diffusion Rayleigh), les aérosols présents, les nuages et le sol. Usuellement, on projette toutes ces contributions selon la verticale du lieu.

1.2.2-RAYONNEMENT GLOBAL :

Le rayonnement global sur une surface quelconque au voisinage du sol est la somme vectorielle des deux composantes direct et diffus. A titre de référence, on choisit habituellement une surface horizontale et on désigne le rayonnement global selon la verticale du lieu.

1.2.3-FLUX, PUISSANCE, ENERGIE :

On décrit le gisement solaire par une succession de flux, c'est-à-dire des puissances ou des énergies reçues par unité de surface. L'éclairement est la puissance reçue par unité de surface, on peut l'exprimer en $W.m^{-2}$. L'irradiation est l'énergie reçue par unité de surface pendant un certain temps (heure, jour...), on peut l'exprimer en $W.h.m^{-2}$.

La description idéale du rayonnement solaire serait donc la série des éclairements pour chaque composante au cours du temps, mais le nombre de valeurs à stocker deviendrait prohibitif. Pratiquement, les seules données disponibles sont des irradiations horaires ou journalières.

1.2.4-LA CONSTANTE SOLAIRE :

On appelle ainsi, la valeur moyenne de l'éclairement reçu par une surface perpendiculaire au rayon solaire (direction moyenne du faisceau issu du disque solaire). Cet éclairement est déterminé à partir de mesures réalisées à l'aide de ballons, de fusées ou de satellites. Depuis 1960, la valeur conventionnelle était $1353 W.m^{-2}$, valeur confirmée par les travaux de THEKAEKARA en 1973. En 1982 des articles ont proposé une valeur de $1373 W.m^{-2}$.

Cette valeur est une moyenne, puisque la distance Terre soleil varie au cours de l'année et il faut donc corriger cette valeur en fonction du quantième du jour.

1.2.5-SPECTRE DU RAYONNEMENT SOLAIRE :

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'ondes électromagnétiques dont 98% est comprise entre $0,25 \mu m$ et $4 \mu m$, le reste représente 1% au dessus et 1% au dessous de cette intervalle. La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde λ est :

- Pour $0,25 \mu m < \lambda < 0,4 \mu m$: c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7% de l'énergie totale émise par le soleil.

- Pour $0,4 \mu m < \lambda < 0,8 \mu m$: c'est le domaine du visible, il représente 47,5% de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour $0,8 \mu m < \lambda < 4 \mu m$: c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5% de l'énergie totale émise par le soleil.

Le rayonnement solaire est assimilable à celui d'un corps noir à la température de 2800 K dans l'intervalle du spectre $0,25 \mu m < \lambda < 4 \mu m$.

1.3-L' ATMOSPHERE :

L'atmosphère qui entoure la terre joue un rôle très important vis-à-vis du rayonnement solaire tant par ses constituants fixes que par ses constituants variables. Les constituants fixes sont surtout l'azote et l'oxygène. Parmi les constituants variables citons l'eau sous forme de vapeur, de gouttelettes ou de cristaux de glace et les poussières. Schématiquement, on peut considérer que l'atmosphère est constituée de trois couches : la troposphère (du sol jusqu'à 15 Km maximum, dans laquelle la température décroît avec l'altitude, la stratosphère, où la température croît faiblement et l'ionosphère.

La moitié de la masse gazeuse est comprise entre 0 et 10 Km. La quantité de chaque constituant de l'atmosphère est caractérisée par son épaisseur réduite, c'est-à-dire l'épaisseur de la couche homogène que formerait ce constituant sous température et pression normalisées.

1.3.1-LES CONSTITUANTS GAZEUX FIXES :

Azote (son épaisseur réduite est de 200m), Oxygène (son épaisseur réduite est de 1700m), Argon (son épaisseur réduite est de 74m), Néon (son épaisseur réduite est de 140mm), Hélium (son épaisseur réduite est de 40mm), Oxyde d'azote N_2O (son épaisseur réduite est de 10mm), et Krypton (son épaisseur réduite est de 8mm).

1.3.2-LES CONSTITUANTS GAZEUX VARIABLES :

Méthane (son épaisseur réduite varie de 5 à 10 mm), Gaz carbonique CO_2 (son épaisseur réduite est d'environ 2,4 m), Ozone O_3 (son épaisseur réduite varie de 3,9 à 23 mm), vapeur d'eau (son épaisseur réduite varie de 5 à 60 mm).

1.3.3-LES AEROSOLS :

Des particules sont très souvent présentes dans l'atmosphère. Elles sont d'origines diverses : mer, sable, poussière, volcans, feux de forêts, industrie ou condensation de phase gazeuse. Leurs dimensions sont très variables de $10^{-3} \mu m$ à quelques mm.

1.3.4-LES NUAGES :

Les nuages sont des ensembles de fines particules d'eau voisines les unes des autres. Ces particules sont, soit des gouttelettes surfondues ou non, soit des particules de glace. La teneur en eau condensée d'un nuage est de l'ordre de $10^{-3} \text{ Kg.m}^{-3}$. La classification des nuages tels qu'ils sont observés selon le niveau de leur base est : l'étage supérieur, l'étage moyen et l'étage inférieur.

Les divers constituants de l'atmosphère provoquent l'atténuation du rayonnement direct issu du disque solaire, par absorption et diffusion, et ils donnent naissance à un rayonnement diffus. Etant donné que le plus souvent actuellement, les concepteurs de systèmes énergétiques solaires ne s'intéressent encore qu'à la modification de l'éclairement reçu au sol, modification due à la variation de la teneur de certains constituants. Des formules de transmittance ou d'absorbance pour le spectre entier qui sont utilisées couramment.

1.4-LES OBSERVATIONS METEOROLOGIQUES :

Ces observations sont effectuées soit toutes les trois heures (observations synoptiques), soit chaque jour dans les stations météorologiques. Elles sont disponibles sur des carnets d'observation des stations, des relevés quotidiens ou mensuels et parfois sur bandes magnétiques.

- Pression atmosphérique : exprimée en millibar, lue sur le baromètre, corrigée de la température et de l'altitude de la station.
- Température en °C : les mesures courantes sont effectuées sous abri normalisé à 2m du sol et parfois sur le sol et à trois profondeurs dans le sol (10 cm, 20 cm et 50 cm).
- Hygrométrie : de la température donnée par le thermomètre mouillé placé dans l'abri et de la température du thermomètre sec on déduit : la tension de vapeur d'eau, exprimée en millibar, l'humidité relative et le point de rosée.
- Vent : deux paramètres du vent sont mesurés, la vitesse en m.s^{-1} et la direction d'où vient le vent par un code de 0 à 36 sur la rose des vents, 36 ou 0 est un vent du Nord, 18 est un vent du Sud, 9 un vent d'Est.
- Nébulosité totale : la nébulosité exprimée en Octas (0 à 8) indique la portion de voûte céleste observée qui est couverte par des nuages. Alors, 0 signifie un ciel clair et 8 un ciel complètement couvert.
- Couches nuageuses : pour chacun des trois niveaux de nuages (supérieur, moyen, inférieur) on caractérise le ou les types de nuage observés par un code variant de 0 à 9.

- Temps présent : un code variant de 0 à 99 caractérise le temps présent : 01 nuages se dissolvant, 02 nuages sans évolution, 03 nuages en formation, 04 visibilité réduite par des fumées, de 05 à 09 brume sèche ou brume de sable, de 10 à 12 brumes, de 50 à 99 précipitations sur la station pendant l'observation.
- Visibilité : exprimée en décamètres, la visibilité est la distance maximale à laquelle un objet noir, de dimension angulaire suffisante, peut être distingué sur le ciel à l'horizon. Dans de très bonnes conditions elle peut atteindre 100 km. La valeur relevée est la plus faible des visibilités obtenues selon plusieurs directions.
- Observations quotidiennes : l'observation quotidienne la plus intéressante pour nous, est celle de la durée d'insolation (ou d'enseillement) mesurée avec un héliographe. C'est le nombre, en dixièmes d'heures, des intervalles de temps pendant lesquels l'éclairement du rayonnement direct a été supérieur au seuil de l'héliographe. De nombreuses stations fournissent trois nombres : la durée d'insolation avant midi solaire, la durée d'insolation après midi solaire, et la durée d'insolation totale.

1.5-ESTIMATION DU GISEMENT SOLAIRE :

Dans Certains cas, on a été amené à mettre au point des méthodes d'estimation du gisement solaire à partir des observations effectuées couramment dans les stations météorologiques. Les réseaux de mesure du rayonnement solaire sont encore peu développés dans le monde entier et beaucoup de stations sont récentes.

1.5.1-MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE :

Les mesures usuelles du rayonnement solaire sont celles de la durée d'enseillement, du rayonnement global sur le plan horizontal, du diffus et du direct normal. Il s'agit donc de mesurer soit le temps pendant lequel l'éclairement au sol du rayonnement direct est supérieur à un seuil, soit une puissance ou une énergie.

L'instrument, actuellement, le plus utilisé pour mesurer la durée d'enseillement est *'héliographe Cambell*. Il comprend trois parties essentielles : un support inclinable, une sphère de verre qui focalise les rayons solaires sur une bande de carton spécial. Si la journée est parfaitement claire la bande de carton présentera une brûlure continue dont la longueur est proportionnelle à la durée d'insolation.

A part l'héliographe de Campbell, les appareils de mesure du rayonnement global ou diffus (Pyranomètres) et du rayonnement direct (Pyrhéliomètre) utilisent l'effet photo-thermoélectrique,

c'est-à-dire que la chaleur fournie par le rayonnement à un corps noir produit une élévation de température mesurée par une série de couples thermoélectriques, on mesure donc en sortie, une force électromotrice.

1.5.2-OBJECTIFS DES METHODES D' ESTIMATION :

Les principaux objectifs des méthodes proposées sont les suivants :

- la description sommaire ou détaillée du gisement solaire local ou régional en l'absence de mesures suffisantes.
- la reconstitution de séries temporelles continues en remplaçant les mesures inexistantes par des valeurs estimées.
- le calcul d'irradiations "beau temps" des années passées pour vérifier l'absence de dérive des appareils de mesure.
- la reconstitution des fluctuations de l'énergie solaire utilisée localement (éventuellement dans ses composantes) au cours d'années passées pour simuler le fonctionnement d'un système que l'on cherche à optimiser, le pas de temps pouvant être l'heure ou la journée.

1.5.3-CLASSIFICATION DES METHODES D'ESTIMATION:

Il existe de nombreuses méthodes de dimensionnement des systèmes énergétiques solaires qui se différencient notamment par une connaissance plus ou moins détaillée du gisement solaire local. On peut citer les sorties possibles des méthodes d'estimation du gisement solaire : Le global sur plan horizontal, le direct normal, le diffus, et le global sur plan quelconque, toutes ces sorties sont estimées en moyennes journalières mensuelles, chaque jour, moyennes horaires mensuelles, ou en éclairement. Ainsi les méthodes possibles des méthodes d'estimation du gisement solaire sont :

- Les coordonnées spatio-temporelles : sont évidemment nécessaires dans tous les cas, il s'agit d'une part, de la latitude de la station, de son altitude, éventuellement de sa longitude, et d'autre part du quantième du jour. Dans les calculs des irradiations en cours de journée on utilise habituellement les heures en temps solaire vrai.
- L'irradiation journalière : qui est le global hors atmosphère, résultant d'un simple calcul n'utilisant que les coordonnées spatio-temporelles.
- Les modèles d'atmosphère : on range sous le terme "modèles atmosphériques" à la fois, une description de l'atmosphère et un ensemble d'algorithmes de calcul de la transmission du rayonnement solaire à travers cette atmosphère. Le calcul de l'atténuation d'un faisceau s'étendant sur

un large spectre, tel celui issu du soleil, à travers toutes les couches de l'atmosphère, nécessite des ordinateurs puissants. Il existe des modèles simples dont l'usage est souvent suffisant.

- L'irradiation journalière : qui est le global beau temps, est souvent utilisée pour estimer l'irradiation journalière par temps quelconque à partir de la durée d'ensoleillement mesurée. Le calcul du global beau temps exige déjà l'introduction de données locales, même moyennes, concernant la vapeur d'eau et les aérosols.

- La fraction d'ensoleillement : qui est le rapport de la durée d'ensoleillement mesurée avec l'héliographe à la durée théorique du jour éventuellement corrigée de l'effet de montagnes vis-à-vis de la station pour certaines positions du soleil. De nombreuses méthodes utilisent la fraction d'ensoleillement de chaque jour ou simplement sa moyenne mensuelle.

- Les observations météorologiques : elles ne sont généralement disponibles que toutes les 3 heures, toutefois certaines méthodes font appel à des valeurs horaires disponibles dans certaines stations. On peut citer les plus utiles : la tension de vapeur, la nébulosité totale, la visibilité, l'état de ciel (nuages supérieur, moyen, et inférieur), le temps présent, et autres observations.

En tout cas, avant de choisir une méthode d'estimation du gisement solaire il est important,

- de faire un inventaire des données disponibles.
- d'analyser les besoins pour atteindre l'objectif fixé.
- d'évaluer les moyens informatiques dont on dispose sans oublier les entrées de données (utilisation de bandes magnétiques ou non), les moyens d'édition des résultats et de leur accès ultérieurement.

1.5.4-CALCUL DES IRRADIATIONS OU DES ECLAIREMENTS PAR CIEL CLAIR :

Pour mieux préciser les états de beau temps, il est possible soit d'introduire dans le calcul la tension de vapeur d'eau et le coefficient d'Angström, soit de caractériser l'atmosphère par un seul facteur tel que celui de Linke.

- Le coefficient d'Angström : c'est un coefficient que l'on peut déterminer à partir de deux mesures du direct avec et sans filtre. On peut aussi apprécier une valeur de ce coefficient en observant la couleur du ciel en l'absence de nuage :

- Un ciel bleu sombre correspond à un coefficient de 0.01 à 0.02
- Un ciel bleu clair correspond à un coefficient de 0.05 à 0.07
- Un ciel blanchâtre correspond à un coefficient de 0.1

Mais ce coefficient peut atteindre des valeurs de 0.2 à 0.4 pour des ciels pollués.

- Le facteur de trouble de Linke : définit comme étant le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même extinction globale que l'atmosphère réelle. Le facteur de trouble de Linke est fonction :

- De la quantité de vapeur d'eau présent dans l'atmosphère.
- De la masse atmosphérique donc de la hauteur angulaire solaire et de l'altitude de la station.
- Mais surtout de la quantité d'aérosols donc du coefficient de trouble d'Angström.

On trouve dans les publications plusieurs relations permettant d'évaluer le facteur de trouble de Linke.

1.5.5-CALCUL DES IRRADIATIONS JOURNALIERES A TEMPS QUELCONQUE :

Pour dimensionner, même grossièrement, un système énergétique solaire, il faut connaître les valeurs des irradiations non seulement par beau temps mais par temps quelconque, c'est-à-dire avec un ciel plus ou moins couvert. Il existe des méthodes courantes d'estimation d'irradiations journalières basées sur la durée d'ensoleillement.

1.5.6-CALCUL DES IRRADIATIONS HORAIRES A TEMPS QUELCONQUE :

Il existe, en fait, deux sortes de méthodes pour estimer des irradiations horaires :

- Celles qui redistribuent sur les heures de la durée du jour, une irradiation journalière estimée ou mesurée. La distribution est habituellement symétrique (Liu et Jordan), parfois cependant, elle est faite au hasard.
- Celles qui effectuent le calcul des irradiations horaires de chaque composante à partir de données météorologiques horaires qui sont souvent elles-mêmes déduites d'observations relevées toutes les 03 heures.

1.6-LA TELEDETECTION :

Le principe de la télédétection est le suivant : un détecteur approprié placé à bord d'un avion, d'un ballon ou d'un satellite reçoit dans son angle solide de visée le rayonnement émis par tous les éléments du volume ainsi délimité. Habituellement on parle de surface émettrice au sol et on se place dans les meilleures conditions possibles de transmission atmosphérique. Le but de la télédétection est alors l'étude du sol. Quoiqu'il en soit le rayonnement émis par le sol traversera une tranche plus ou moins épaisse d'atmosphère selon l'altitude du détecteur. Les détecteurs utilisés ont une réponse

spectrale spécifique au phénomène que l'on veut étudier : ils ne sont sensibles que dans une gamme de longueurs d'onde et souvent l'efficacité de détection est fonction de la longueur d'onde (Fig. 1.1).

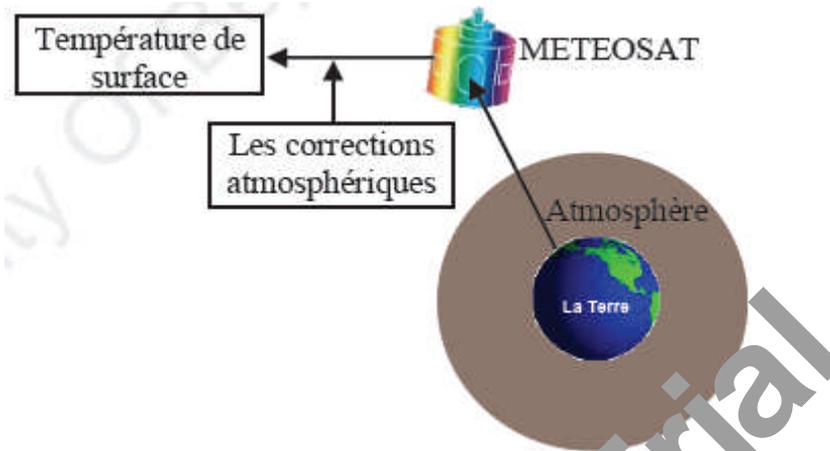


Fig. 1.1 : Principe de la détection infrarouge thermique.

1.6.1-LES SATELLITES :

Il existe de nombreux types de satellites de télédétection. Afin de mieux comprendre le choix qui est fait actuellement pour étudier le gisement solaire, on présente des caractéristiques permettant de classer les satellites. Les principales caractéristiques des satellites de télédétection sont les suivantes :

- Orbite et période de révolution.
- Mouvements possibles par rapport à l'orbite.
- Appareils de prise de vue : bandes spectrales, résolution spatiale, champ couvert, fréquence des images, précision de la donnée numérique, disponibilité des images (photographies, bandes magnétiques, archivage automatique ou non, coût, temps réel ou différé, possibilité de superposition des images).

1.6.1.1-SATELLITES A DEFILEMENT :

Les satellites à défilement passent périodiquement au-dessus d'une même région. C'est le cas des LANDSAT qui, avec une résolution spatiale de 100 m, plusieurs bandes spectrales et une période de 18 jours, peuvent donner des renseignements sur l'évolution lente des sols.

Les satellites de la série TIROS passent une fois par jour au-dessus d'une même région, ils sont dits héliosynchrones, leur orbite est polaire. Leurs diverses bandes spectrales permettent de distinguer la neige des nuages. Leur résolution spatiale est de l'ordre de 01 Km, mais la superposition exacte d'images consécutives n'est pas aisée. Leur inconvénient majeur pour l'étude du gisement solaire est leur faible fréquence de passage au-dessus d'une région donnée.

1.6.1.2-SATELLITES GEOSTATIONNAIRES :

Leur altitude est voisine de 36000 Km leur permet d'avoir une vitesse angulaire de rotation autour de l'axe polaire identique à celle de la terre elle-même ; ils nous paraissent donc fixes. Plusieurs satellites géostationnaires sont en opération autour de la terre pour permettre une étude à l'échelle mondiale des perturbations atmosphériques. Deux de ces satellites ont été utilisés pour mettre au point des méthodologies de détermination du gisement solaire : GOES en Amérique et METEOSAT en Europe.

1.6.1.3-SATELLITE METEOSAT :

Est un satellite Européen géostationnaire, ses caractéristiques principales sont les suivantes : Coordonnées géographique : latitude 0°, longitude 0°, et altitude 36000 Km. Bandes spectrales : "visible" 0,4 μm à 1 μm , "infrarouge" 10,5 μm à 12,5 μm et "vapeur d'eau" 5,7 μm à 7,1 μm . Dimension du pixel sous satellite : "visible" 2,5 x 2,5 Km² et "infra-rouge " 5 x 5 Km². Nombre d'images par jour : 48 images disponibles. Une image "visible" du globe terrestre représente : 5000 lignes et 5000 colonnes.

1.6.2-LA TRANSMISSION ET INTERPRETATION DES IMAGES :

1.6.2.1-LES IMAGES NUMERIQUES :

Le détecteur fournit un signal électrique numérique après échantillonnage. Les images visibles "VIS" et infrarouges "IR" sont ainsi respectivement codées sur 6 et 8 bits. Toutefois, pour des raisons de transmission, les images VIS sont aussi codées sur 8 bits mais avec 2 bits aléatoires dans le cas de METEOSAT 1 (Fig. 1.2)

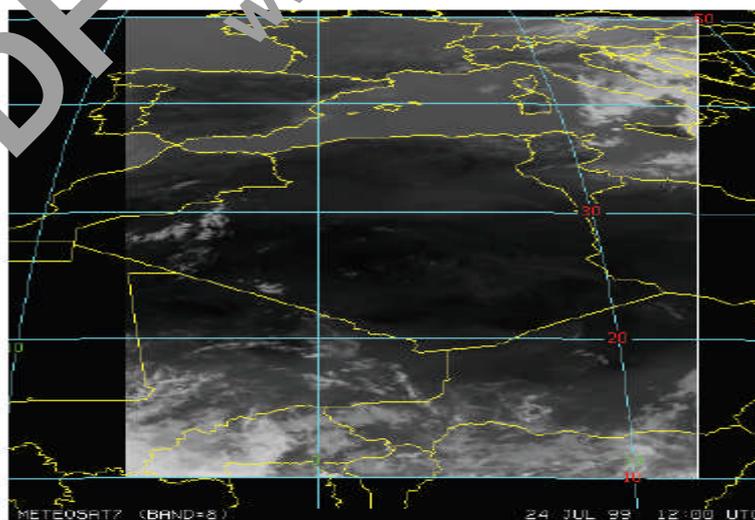


Fig. 1.2 : Image du canal infrarouge thermique de METEOSAT.

1.6.2.2-LES PHOTOGRAPHIES :

Des appareils de très haute précision convertissent une image numérique en photographie, en noir et blanc généralement, mais les niveaux de gris décelables sont moins nombreux que les niveaux numériques de l'image initiale, il y a donc perte d'information. Cependant qu'il est possible d'estimer l'enneuagement en observant ces photographies avec des moyens simples.

1.6.2.3-LA TRANSMISSION :

Les images initiales du Satellite sont reçues toutes les 30 minutes sur des antennes spéciales à des endroits bien précis. La station réceptrice effectue divers traitement sur chaque image qui est alors stockée sur bande magnétique avec diverses résolutions selon la durée de l'archivage. Enfin, l'image est renvoyée au satellite qui sert alors de relais pour une transmission vers divers utilisateurs dotés d'une antenne adéquate. Un utilisateur d'image du satellite peut donc : soit acquérir des photographies, soit acquérir des images numériques sur bande magnétique, ou soit disposer d'une antenne et recevoir ainsi les images de son choix, les stocker et les traiter.

1.6.2.4-INTERPRETION DES IMAGES :

Si on veut étudier le gisement solaire sur une région on délimitera une portion de l'image totale du demi globe terrestre. Les longitudes et latitudes extrêmes correspondront sur l'image à des lignes et colonnes. Mais, selon les dimensions de l'image ainsi délimitée on sera amené à choisir une résolution spatiale éventuellement dégradée pour limiter la place nécessaire en mémoire centrale et le temps de calcul. Deux solutions sont alors possibles à partir de l'image originale à pleine résolution : soit on ne prend qu'une ligne sur n et qu'une colonne sur n' , soit on effectue un compactage en prenant la brillance moyenne d'un pavé de $n \times n'$ pixels.

Certains lots d'images commercialisées par la station de réception ne comportant qu'un pixel sur 64 de l'image véritable. Un choix important est aussi celui du nombre d'images par jour : 3 étant un minimum.

Un prétraitement sera absolument nécessaire, il s'agit d'effectuer les corrections dites de "Navigation" de telle façon qu'un élément de surface au sol correspondante à un pixel dont les coordonnées en lignes et colonnes restent identiques dans les images successives.

Pour chaque série d'images successives prises dans les mêmes conditions géométriques d'éclairage, on constitue une image composite (c'est-à-dire comportant des éléments côte à côte provenant d'images prises au cours de jours différents) dont chaque pixel a la brillance minimale qu'il atteint au cours de la séquence de N jours.

A l'aide d'un modèle bien précis, on calcule pour chaque image et pour chaque pavé (ensemble de pixels voisins) préalablement défini, l'éclairement global qui atteindrait le sol dans des conditions atmosphériques moyennes de beau temps. Ainsi, on peut calculer l'éclairement global par temps quelconque. L'éclairement global qui atteint réellement un élément du sol est alors fonction de l'éclairement global beau temps et de la brillance du pixel correspondant de l'image visible, il s'agit d'appliquer à l'éclairement global beau temps une atténuation fonction de la brillance.

Nous pouvons faire une moyenne de l'éclairement local au cours d'une heure (comme dans la plupart des mesures disponibles) on calcule la moyenne, à un instant donné des éclairements sur des éléments de surface voisins, par exemple un pavé (correspondant à un morceau d'images) de 20×20 pixels (les irradiations horaires exprimées en Wh.m^{-2} sont égales aux éclairements exprimés en W.m^{-2}).

L'irradiation journalière est obtenue par sommation des irradiations horaires calculées à partir des images dont on dispose. On effectue éventuellement les interpolations nécessaires.

1.7-TRAVAUX DE RECHERCHE SUR L'ESTIMATION DU GISEMENT 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.
- Selon le nombre d'années de mesure disponibles.
- Selon le pas de temps des données (mois, jours, heures).
- Selon la nature des données (durée d'ensoleillement, composantes directe, diffuse et globale du rayonnement solaire, albédo du sol,etc.).

A cet effet, concernant la mesure du rayonnement solaire en Algérie, le réseau des mesures est peu dense relativement à la superficie du territoire. En effet, seules sept stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuse et globale du rayonnement solaire reçu sur le plan horizontal.

Pour pallier aux insuffisances des réseaux de mesures, des travaux basés sur l'utilisation des modèles sont proposés par des équipes de recherche. Ces modèles sont basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques et radio métriques ainsi que, sur l'utilisation des images satellitaires. Dans ce cadre, plusieurs études et recherches ont été effectuées concernant le sujet de l'évaluation du potentiel énergétique solaire en Algérie.

1.7.1-ETUDES CONCERNANT LE GISEMENT SOLAIRE DE L'ALGERIE POUR

L' ENSEMBLE DU TERRITOIRE :

Seulement, quelques études qui ont contribué à des évaluations complètes qui délimitent l'ensemble du territoire et aboutissant à l'élaboration des Atlas solaires, à savoir :

L'Atlas Solaire de l'Algérie "ASA" est un projet qui a été entrepris par M. Capderou, [1] concernant l'Algérie et sa ressource en énergie solaire. A partir de documents scientifiques rassemblés et s'appuyant sur les études physiques et climatologiques les plus récentes, l'auteur a choisi des méthodes d'évaluation du gisement solaire en Algérie les mieux adaptées aux conditions géographique et climatique, les synthétiser et les appliquer à l'ensemble du territoire.

Le travail ainsi discuté est un livre composé de trois tomes. Dans le premier tome, des méthodes théoriques et expérimentaux ont été abordés, le second tome a été réservé pour l'aspect énergétique, tandis que le troisième tome englobe l'aspect géométrique et la synthèse géographique.

Au début, le vocabulaire précis et strict utilisé en astronomie et employé dans la suite de l'ouvrage, a été donné, ainsi que la situation de la planète terre dans l'espace d'un point de vue astronomique. Il a été intéressé au couple Soleil terre avec la considération du mouvement apparent du soleil autour de la terre. La réfraction atmosphérique et le crépuscule ont été traités du point de vue générale.

Le rayonnement hors atmosphère a été étudié qui est la charnière entre les deux aspects : géométrique et énergétique avec des rappelles sur le rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement en provenance du soleil pénètre en partie dans l'atmosphère. L'étude de l'atténuation par absorption et diffusion d'un point de vue monochromatique puis intégré sur le spectre a été traité, ce qui permet de définir le facteur de trouble total.

Les valeurs théoriques obtenues au début de l'ouvrage sont confrontées aux résultats expérimentaux (mesures effectuées en Algérie et dans d'autres parties du monde, aux climats très divers). Le rayonnement est décomposé en direct et diffus à trois composantes.

La présence nuageuse a été étudiée et traitée avec des fonctions de répartition statistique appliquées à chaque composante du rayonnement, c'est la méthode probabiliste de Perrin de Brichambaut. Les valeurs obtenues par cette méthode sont confrontées, lorsque c'est possible, aux valeurs moyennes mesurées sur le terrain, pour affiner le modèle.

L'aspect énergétique aboutit ainsi, à l'établissement de l'Atlas Solaire de l'Algérie, c'est-à-dire le programme appelé "chams 01", qui fournit les valeurs des tableaux et des cartes et graphes exécutés dans ce travail.

Un supplément au programme, en effet, puisque l'angle d'incidence du rayonnement est parfaitement déterminé, autant utiliser cette valeur exacte pour connaître les valeurs du rayonnement, que ce soit après un vitrage ou sur l'absorbeur d'un capteur solaire plan ou à travers les obstacles.

Des annexes et documents ont été recueillis. Les annexes regroupent des démonstrations annexes et des développements qui éclairent certains points, des exemples et des applications. Les documents sont tirés d'ouvrages divers, dans certains cas, une discussion ou un regroupement de plusieurs documents.

La cartographie tant qu'elle est un élément important dans un Atlas, quelques pages ont été consacrées sur ce sujet.

Le principe du programme "Shams 01" est de fournir, à chaque instant, la valeur de la puissance du rayonnement incident sur un plan quelconque (dans toutes les conditions et pour toutes les composantes). L'intégration, sur une heure ou sur la journée, donne les tableaux ainsi élaborés dans l'ouvrage.

Ce travail a été fait pour chaque ville de l'Algérie où une station météorologique mesure la fraction d'insolation : au total 37 sites bien repartis sur le territoire Algérien. Pour chaque ville, dix pages de tableaux donnent, pour chaque mois de l'année, les énergies reçues sur divers plans, heure par heure.

En plus de ces valeurs d'énergie, sont notées quelques données astronomiques (rayonnement extraterrestre, heure et azimut du coucher de soleil,...) et d'autres, relatives aux paramètres météorologiques (facteurs de trouble, indice de cielé,...).

L'aspect géométrique est établie de ce qui a été traité au début de l'ouvrage, adapté à l'Algérie. Le territoire Algérien a été divisé en 10 zones, les zones géométriques : pour chaque zone géométrique sont tracés les diagrammes de la trajectoire du soleil (diagramme frontal, diagramme polaire et ce qui est cher aux architectes, les diagrammes des ombres, mois par mois). Les valeurs énergétiques sont visualisées sur de très nombreuses cartes. Pour les plus significatives d'entre elles, les courbes d'iso énergies ont été notées.

La synthèse géographique a été élaborée, qui regroupe les aspects énergétique et géométrique, les résultats tirés des cartes et des considérations géographiques : 8 zones énergétiques sont ainsi créés. Le processus de cette création a été exposé en détail et certains tableaux précédents ont été repris sous forme de graphes, afin de faciliter la lecture.

Le contenu de ce travail peut être utilisé en diverses circonstances en répondant à la quasi-totalité des questions actuelles en matière d'énergie solaire, de climatologie solaire et d'optimisation économique

des équipements. Cependant, il peut être considéré aujourd'hui comme une base solide et sûre qui devrait faciliter l'introduction progressive et justifiée, inéluctable au moins à long terme, des systèmes énergétiques solaires en Algérie.

Ce travail a permis de produire le premier document dans son genre en Algérie, concernant à la fois le thermicien, le géographe, l'architecte et le météorologiste.

Pour pallier aux insuffisances des réseaux de mesures, des modèles sont proposées par une équipe de recherche comprenant : A. Mefti chargé de recherche, M. Y. Bouroubi attaché de recherche et H. Mimouni attaché de recherche [2]. Ces modèles sont basés essentiellement sur l'utilisation des données météorologiques, en particulier, la durée d'ensoleillement.

Dans ce cadre, l'équipe de recherche en gisement solaire du laboratoire d'évaluation du potentiel énergétique, s'est assigné pour objectif le développement d'une méthodologie qui a permis une estimation réaliste du gisement solaire pouvant être exploité à des fins énergétiques par les concepteurs de systèmes énergétiques solaires.

Ainsi, un Atlas solaire préliminaire a été élaboré, il est constitué de 72 cartes représentant la distribution mensuelle à grande échelle des différents irradiations solaires utilisées par les concepteurs de systèmes énergétiques solaire, il s'agit de :

- L'irradiation directe à incidence normale.
- Les irradiations de base, le diffuse et la globale mesurées sur plan horizontal.
- L'irradiation solaire globale reçue sur des plans verticaux orientés Est, Ouest et Sud.
- L'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu et orienté Sud. La distribution à grande échelle de sa moyenne annuelle est représentée par la figure ci-dessous :

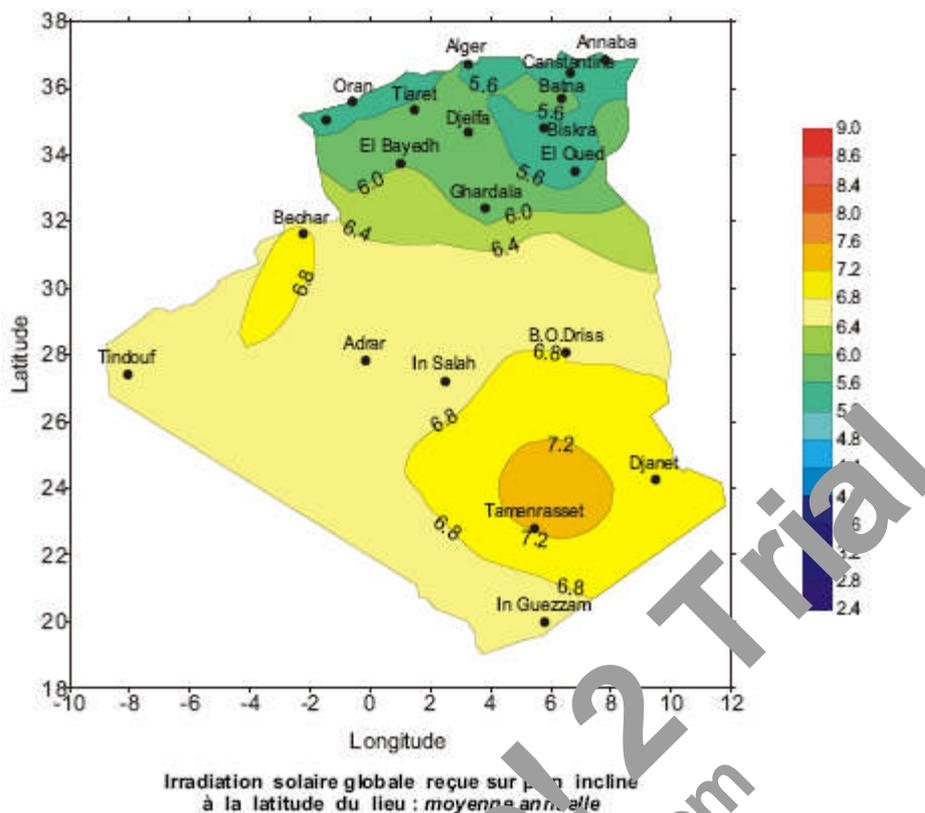


Fig. 1.3 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu : moyenne annuelle [2].

La conception et la réalisation d'un système expérimental de mesure de l'intensité du rayonnement solaire ont été mis au point par A. Attar et al. [3]. Par le fait que le rayonnement solaire et l'insolation reçus par la terre constituent un gisement énergétique inépuisable et indispensable à la vie terrestre.

D'une manière générale, l'insolation est la durée pendant laquelle le soleil a brillé sur une surface dépassant le seuil de 12 W/m^2 . La mesure de cette grandeur se fait à l'aide de l'héliographe de Camp Bell Stokes, instrument employé dans la plupart des stations météorologiques. Dans ce travail, les auteurs présentent un système électronique capable de mesurer l'insolation solaire d'une façon autonome et automatique par l'utilisation des photodiodes (Fig. 1.4).

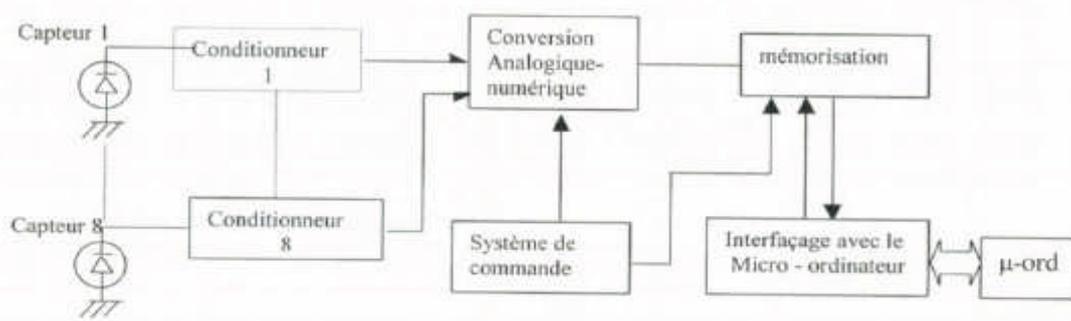


Fig. 1.4 : Synoptique général du système de mesure de l'insolation solaire, [3].

Le système est réalisé à base d'un micro-ordinateur permettant de mesurer huit signaux à des intervalles de temps programmables. Les données acquises sont issues de capteurs d'éclairement de type BPW 34 fonctionnant en mode photovoltaïque. Les capteurs sont placés sur un dôme, afin de suivre et de quantifier l'insolation au cours de la journée entière. Grâce à la technologie utilisée, ce système présente une grande autonomie d'utilisation qui a permis de mesurer l'insolation avec une précision de l'ordre de 0.1% (Fig. 1.5).

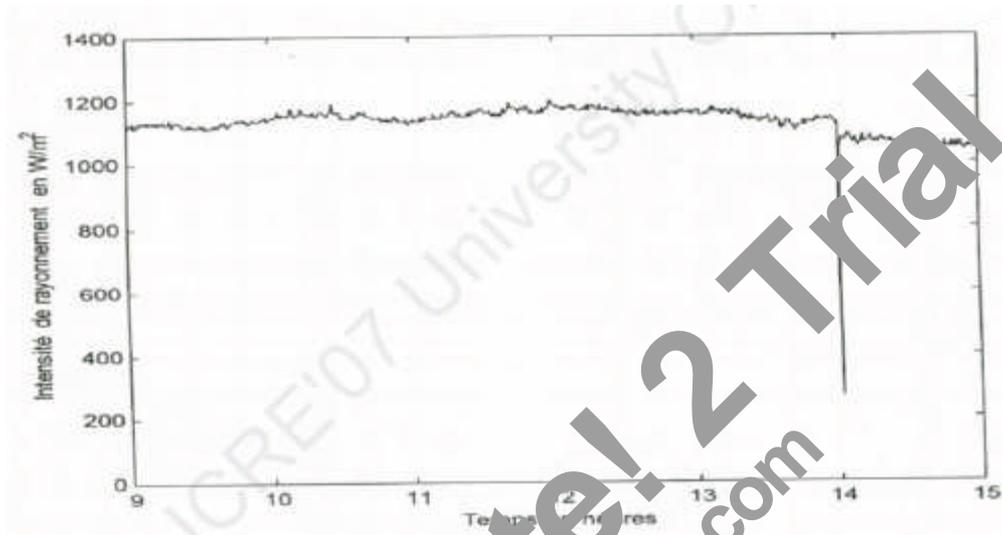


Fig. 1.5 : Variation totale de l'intensité de rayonnement à Tizi-ouzou (14.09.2005), [3].

S. Ben Lahmidi et al. [4] sont intéressés à la valorisation du gisement solaire dans divers sites de climats différents en Algérie. Un programme a été élaboré, permettant ainsi de donner grâce à une interface très simple à utiliser (fig. 1.6), tous les paramètres de caractérisation sous divers contextes géographiques et climatiques.

Pour les calculs, il faut introduire les données suivantes :

- les coordonnées du site : latitude, longitude et altitude.
- L'état du ciel : ciel très pur (CTP), ciel moyen (CM) et ciel pollué (CP).
- La date (numéro du jour considéré donné par son quantième).
- Les températures minimales et maximale enregistrées le jour considéré.



Fig. 1.6 : Interface graphique des calculs, [4].

Le programme permettra de calculer : le lever et le coucher du soleil en temps solaire vrai, la durée du jour, le rayonnement solaire global sur un plan horizontal pour diverses situations climatiques et selon deux modèles, ainsi que la température ambiante à n'importe quel instant de la journée.

Les deux modèles utilisés sont les suivants :

$$G_h = A \cdot (\sin h)^D \quad (1.1)$$

Où : G_h est le rayonnement global, A et D sont des constantes fonctions de l'état de ciel, et h est la hauteur du soleil.

$$S_h = G_{ne} \cdot (\sin h)^{\tau_1} \quad (1.2)$$

$$D_h = G_{ne} \cdot (\sin h)^{\tau_2} \quad (1.3)$$

Où : S_h est le rayonnement direct, D_h est le rayonnement diffus, τ_1 et τ_2 sont les transmissions pour le direct et le diffus.

$$G_{ne} = 1353 \cdot \left[1 + 0.0334 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot J - 2\right) \right] \quad (1.4)$$

où : J est le numéro du jour de l'année.

Cette étude vise à donner aux utilisateurs simples et potentiels, une vision très exhaustive sur un réel projet solaire à travers la prévision des paramètres de caractérisation des sites et éventuellement par la suite, la modélisation des performances des systèmes énergétiques solaires (Fig. 1.7).

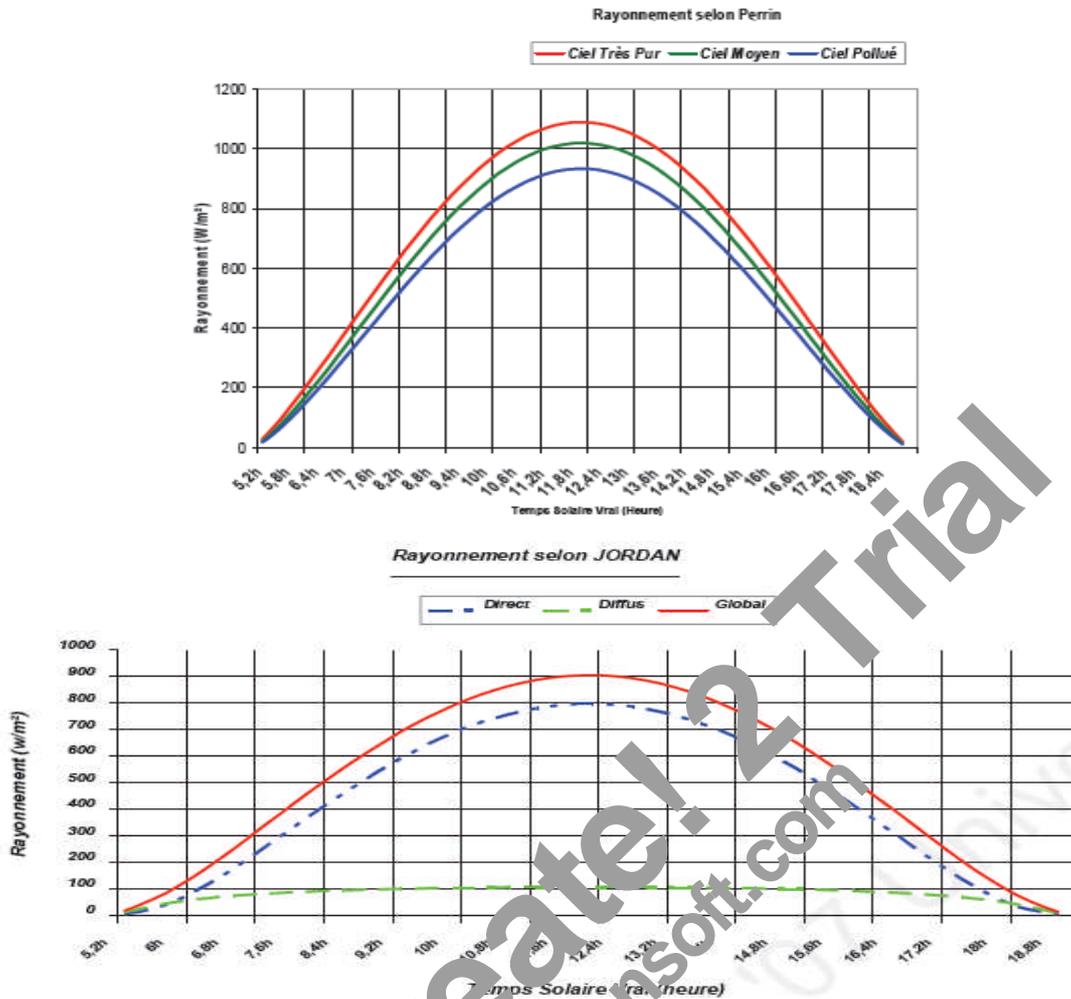


Fig. 1.7 : Rayonnement solaire du site de Bejaia déterminé par l'interface graphique selon les deux modèles utilisés (de Perrin et de Jordan) pour le jour du 15 Mai, [4].

1.7.2-ETUDES CONCERNANT LE GISEMENT SOLAIRE DE L'ALGERIE SPECIFIANT DES SITES SEPARES

Plusieurs études locales, spécifiant des sites séparés et aboutissant à l'évaluation du potentiel énergétique solaire ont été effectuées par des chercheurs concernant l'Algérie, en effet :

A. Moummi et al. [5] ont proposé une étude comparative entre deux approches semi empiriques pour l'estimation du rayonnement solaire dans le site de Biskra en Algérie. Pour cela les auteurs ont adapté deux modèles différents pour estimer l'éclairement : le modèle de Perrin de Brichambaut qui emploie le facteur de trouble total de Linke, rarement utilisé et le modèle de Liu Jordan, qui est le plus fréquemment employé. Par ailleurs, le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évaluation du rayonnement solaire disponible dans un endroit donné et au cours d'une période donnée. Son évaluation peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. Elle est utilisée pour simuler le fonctionnement probable d'un système énergétique solaire et donc d'effectuer

son dimensionnement le plus exact possible, compte tenu des demandes en énergie à satisfaire. De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'ensoleillement sur la quasi-totalité du territoire Algérien dépasse les 2000 heures annuellement, et peut atteindre les 3900 heures surtout pour les hauts plateaux et le Sahara.

L'étude du gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Il est clair que, le rayonnement solaire est composé de rayonnement direct et de rayonnement diffus, le rayonnement diffus est lui-même décomposé en : diffus provenant du ciel, diffus provenant du sol, et diffus provenant de la rétro diffusion.

Dans cette étude, un code de calcul modulaire a été développé qui est écrit en langage Matlab.5.3 susceptible d'effectuer en fonction du numéro du jour et de l'année, les opérations suivantes : la détermination des paramètres astronomiques du site (lever, coucher, déclinaisons, hauteur et angle d'incidence), calcul du facteur d'inclinaison du rayonnement direct désigné ici par R_b , calcul du facteur de trouble total de Linke, et calcul du rayonnement direct, diffus et global sur un plan horizontal et incliné.

Après validation, les résultats obtenus des deux modèles testés sont confrontés aux valeurs expérimentales du rayonnement, selon la station météorologique de Biskra, indiquent la présence d'un écart minimal au lever et au coucher et qui devient important au midi solaire, en particulier pour la journée du 21 Juin qui est dû certainement à des perturbations climatiques (Fig. 1.8).

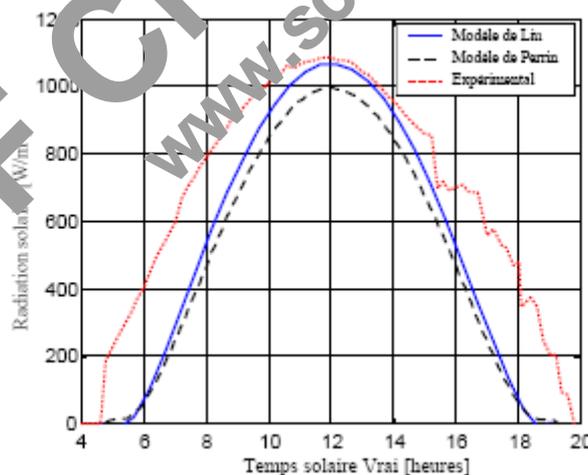
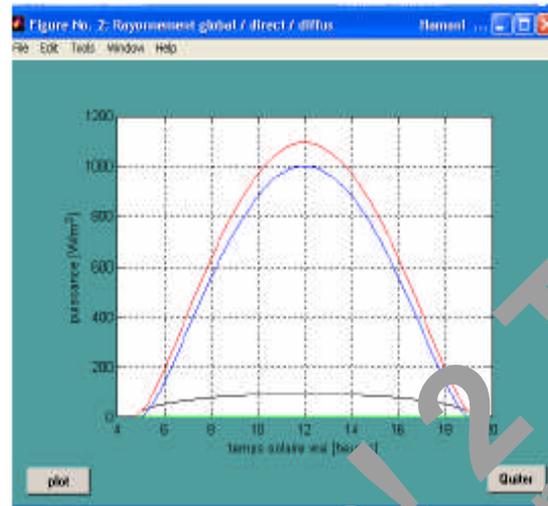


Fig. 1.8 : Rayonnement global pour le 21 Juin au site de Biskra, [5].

Les deux approches étudiées peuvent être considérées comme un outil d'analyse et d'estimation du rayonnement solaire journalier recueillie en n'importe quel site géographique. Les deux modèles ont donnée plus d'information sur le gisement solaire local ainsi que des renseignements sur le climat de la région de Biskra.

De plus, le code utilisé dans cet travail a permis la réalisation d'une interface informatique très conviviale, qui offre la possibilité de visualiser l'évolution du rayonnement solaire (direct, diffus et global) reçu durant une journée entière par une surface de captation de situation géographique quelconque, par saisie des données nécessaires (jour, mois, coordonnées du lieu, et type de ciel) pour faire le calcul.



Interface 2 : Affichage des résultats.

Fig 1.9 : Interface d'affichage des résultats après saisie de données, [5].

M. Boubekri et A. Shaker, [6] ont élaboré une étude et une simulation du rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine en Algérie. Or, le potentiel solaire Algérien est considérable, néanmoins, son utilisation nécessite la parfaite connaissance et la maîtrise de ses principales caractéristiques, dont la principale est l'irradiation solaire.

Il existe des modèles empiriques pour l'estimation du rayonnement solaire basé sur plusieurs paramètres tels que : la vapeur d'eau caractérisée par la hauteur d'eau condensable et le trouble atmosphérique caractérisé par le coefficient d'Angstrom. De nombreux auteurs se sont intéressés à l'étude théorique et expérimentale du rayonnement solaire. C. Zidani et al. [7] ont présenté une simulation de la position apparente du soleil à chaque instant de la journée et de l'année. A. Baig et al. [8] ont proposé un modèle basé sur la version modifiée de la fonction de distribution Gaussienne pour estimer l'éclairement global journalier. H. Aroudam et al. [9] ont développé les corrélations existantes entre l'indice de clarté, l'indice de nébulosité et la fraction d'ensoleillement. Un modèle physique basé sur l'équation générale de transfert radiatif du rayonnement solaire dans le système sol atmosphère a été utilisé par A. Mechagrane et al. [10] pour l'estimation des irradiances globales horaires et journalières d'une surface horizontale au sol à partir des mesures dans la bande 0.4 – 1.1

μm du satellite METEOSAT 2. A. Moumimi et al. [5] ont proposé une étude comparative entre deux approches semi empiriques pour l'estimation du rayonnement solaire dans le site de Biskra.

Le modèle mathématique pour estimer l'éclairement solaire a été utilisé dans ce travail et est basé sur la formule de Kasten. Une simulation a été effectuée pour l'optimisation des rayonnements solaires global, diffus et direct d'une part, et d'autre part, pour l'estimation du rayonnement global instantané, journalier incident sur un capteur plan d'orientation quelconque placé sur le site de Constantine. La confrontation des résultats numériques obtenus dans ce travail avec ceux de la littérature montre un accord satisfaisant (Fig. 1.10).

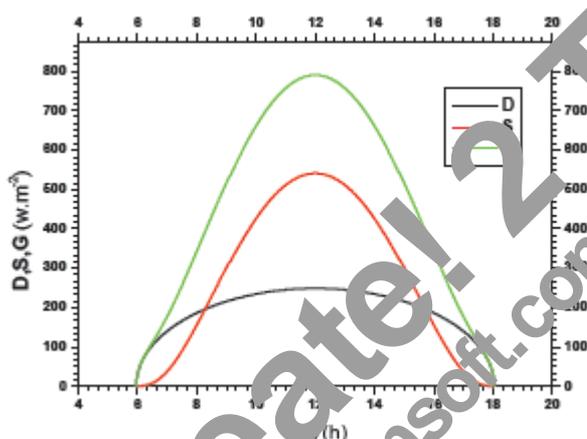


Fig. 1.10 a : Evaluation des rayonnements diffus, direct, et global relatifs au ciel dégradé pour une surface horizontale, [6].

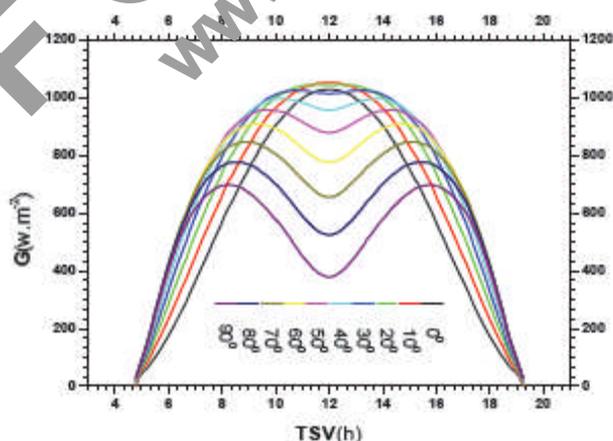


Fig. 1.10 b : Evaluation de l'intensité du rayonnement global instantané relatif au ciel moyen pour un capteur d'orientation quelconque, [6].

M. Koussa et B. Bobin, [11] ont présenté un simple modèle spectral appliqué pour quelques sites Algériens. C'est un travail qui consiste à donner une simple formulation décrivant les principes de

base d'atténuation des éclairagements dus au rayonnement direct, diffus et global. Une suite de relations présentées, permet de reconstituer les distributions spectrales de ces composantes, ainsi que de déterminer les éclairagements correspondants.

Or, les éclairagements dus aux différentes composantes du rayonnement solaire peuvent être reconstituées moyennant la disponibilité des principaux constituants de l'atmosphère (couche d'ozone, vapeur d'eau, mélange gazeux...). Plusieurs méthodes paramétriques ont été proposées pour prédire les différents éclairagements dus au rayonnement solaire. A cet effet, pour un état de ciel quelconque et pour un pas de temps à l'échelle de la moyenne mensuelle par jour ou à l'échelle du jour, des modèles empiriques basés sur les indices de clarté à la fraction d'insolation ou les rapports des irradiances diffuses et globales ont été proposées par [12] et [13]. D'autres modèles empiriques reliant les différentes données météorologiques aux différentes composantes du rayonnement solaires sont proposées aussi par [14] et [15]. Pour un pas de temps horaire ou instantané et pour un état de ciel clair, des modèles sont proposés dans la littérature pour la reconstitution de ces composantes sur toute la bande du spectre solaire en fonction des coefficients de transmission des différents constituants de l'atmosphère d'après [16] et [17].

A travers ce travail, le modèle de Richard Bird [11] est choisi comme base pour le calcul de l'éclairagement dû au rayonnement direct. Les auteurs, [11] ont modifié alors l'expression du coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau par celle proposée par Leckner, [19] et celle proposée par Frolich et Londe [20] pour le coefficient de transmission après diffusion de Rayleigh. Ils ont aussi introduit dans ce travail la correction de la distance terre soleil. Ainsi, ils ont présenté les différents paramètres d'atténuation et de transmission du rayonnement solaire sous une simple formulation algébrique. Ce qui a permis d'établir un algorithme de calcul en fonction de ces paramètres et établir un programme de calcul de la distribution spectrale des différentes composantes du rayonnement solaire au niveau du sol (Fig. 1.11).

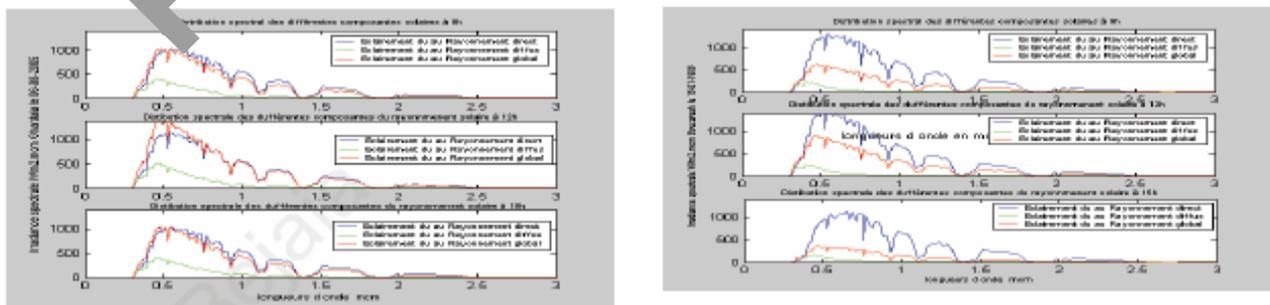


Fig. 1.11 : Distribution spectrale des différentes composantes du rayonnement solaire au sol sur les sites de Ghardaia (gauche) et de Bouzareah (droite), [11].

Une intégration numérique des courbes de ces distributions a conduit de déterminer les différents éclairagements relatifs à chacune des composantes du rayonnement solaire. Ainsi, les valeurs des trois éclairagements solaires calculés par le modèle ont été confrontées aux valeurs réellement mesurées sur les sites de Bouzaréah et Ghardaïa situés respectivement au Nord et au Sud de l'Algérie (Tableau 1.1).

	9h	10h	11	12h	13h	14h	15h
GHca	620	730	798	816	794	732	619
GHme	652	755	768	806	758	742	648
Erreur %	-5.2	-3.4	3.7	0.9	4.5	-0.8	-4.6
DHca	156	177	189	193	189	177	155
DHme	161	165	162	163	168	159	139
Erreur %	-3.2	6.7	14.6	15.5	11.1	10.1	10.3
DNca	701	735	757	761	753	737	701
DNme	681	697	738	747	736	692	682
Erreur %	2.8	5.1	2.5	1.8	2.2	6.1	2.7

	9h	10h	11h	12h	13h	14h	15h
GHca	365	472	527	527	474	367	216
GHme	362	464	520	543	449	334	253
Erreur%	0.8	1.6	1.3	-3.0	5.8	8.9	17.1
DHca	42	43	45	50	48	46	40
Dhme	46	50	52	52	43	52	47
Erreur %	-9.5	-15.0	-15.0	0	-14.5	-13.0	-7.5
DNca	845	901	926	925	901	852	737
DNme	708	880	897	915	890	865	773
Erreur%	16.6	2.3	3.1	1.8	1.2	-1.5	-4.8

Tableau 1.1 : Comparaison entre les différents éclairagements mesurés et calculés par le modèle sur les sites de Ghardaïa (gauche) et Bouzaréah (droite), [11].

Les expressions ainsi choisies à partir de la bibliographie ont permis de calculer indépendamment chacun des coefficients d'extinction après absorption par la couche d'ozone, par la vapeur d'eau et par le mélange gazeux et ceux après diffusion de Rayleigh, d'Angstrom et de multi-réflexion sol atmosphère.

Ce travail a permis de conclure, qu'à partir de la combinaison de plusieurs coefficients de transmission d'une part et d'établir un modèle qui a conduit à reconstituer les différents éclairagements du rayonnement solaire à n'importe quel heure de la journée et d'autre part, de voir de près et à l'échelle monochromatique l'évolution des différents irradiances dans les différentes bandes de longueurs d'ondes.

Ainsi, il peut apparaître l'intervention des différentes composantes de la pellicule atmosphérique dans l'atténuation du rayonnement solaire et leur effet sur chacune des bandes du spectre de rayonnement solaire.

Y. Sahnoune et M. chegaar, [21] ont analysé l'effet de la durée du jour sur l'estimation de l'irradiation solaire en Algérie. Différentes définitions de la durée du jour ont été appliquées à différents sites Algériens, afin d'évaluer l'irradiation solaire globale. En effet, l'Algérie est considérée parmi les pays qui ont un grand nombre d'heures d'ensoleillement, il est autour de 3300 h/an, mais la distribution de

l'irradiation solaire n'est pas encore bien connue à nos jours. Dans la majorité des cas, la mesure de l'irradiation solaire n'est pas disponible pour différents sites, Alors les équations de régression basées sur la durée d'insolation sont généralement utilisées pour l'estimation locale de l'irradiation solaire.

Les valeurs mesurées de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire et de la durée d'insolation de quatre sites en Algérie (Alger, Oran, Bechar, et Tamanrasset) sont utilisées pour tester cinq modèles de calcul de la durée du jour pour l'estimation de l'irradiation solaire. Les enregistrements des données sont effectués dans des périodes de 25 ans pour la durée d'ensoleillement et de 10 ans pour l'irradiation solaire globale (Tableau 1.2).

Site	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
Alger	0,48	0,56	0,60	0,61	0,71	0,71	0,78	0,80	0,74	0,66	0,51	0,49
Oran	0,53	0,53	0,64	0,63	0,69	0,69	0,80	0,79	0,72	0,66	0,53	0,53
Bechar	0,78	0,80	0,84	0,84	0,82	0,83	0,84	0,85	0,82	0,80	0,77	0,76
Tam	0,78	0,81	0,84	0,77	0,76	0,69	0,75	0,77	0,75	0,77	0,81	0,79

Tableau 1.2 : Fraction d'insolation des quatre sites étudiés, [21].

Les résultats de calcul obtenus sont alors analysés statistiquement par utilisation des erreurs statistiques qui sont : l'erreur quadratique moyenne (RMSE), l'erreur moyenne (MBE), l'erreur moyenne absolue (MAE), et statistique. Cette analyse montre que l'utilisation du phénomène de crépuscule civil dans le calcul de la durée du jour fournit une bonne estimation pour Oran et Bechar, pour Alger la bonne estimation n'est obtenue que lorsque le centre du soleil apparaît avec l'horizon. Pour Tamanrasset, les meilleures estimations sont obtenues quand le coucher du sommet du disque solaire est introduit dans le calcul, c'est-à-dire la hauteur du soleil à son coucher ou lever $h_0 = -0.2667^\circ$ (Fig. 1.12).

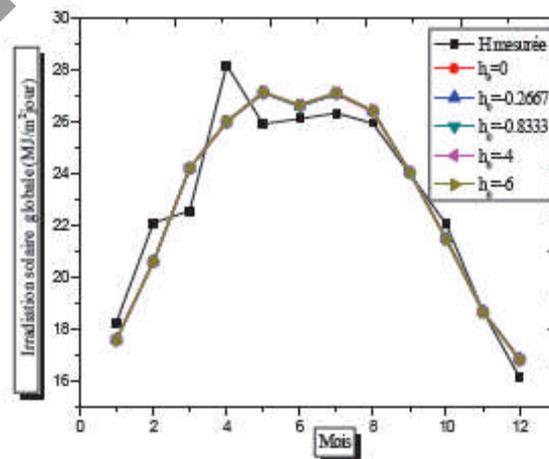


Fig. 1.12 : Irradiation solaire mesurée et estimée pour Tamanrasset, [21].

L'évaluation du rayonnement solaire diffus horizontal dans le site de Ghardaïa en Algérie a été abordée par K. Gairaa et al. [22]. Ils ont bien analysé les valeurs mesurées mensuellement de la moyenne quotidienne du rayonnement globale H et du rayonnement diffus H_d sur une surface horizontale, aussi bien que le nombre d'heures lumineuses de soleil pour le site indiqué.

En tout cas, la connaissance précise des données du rayonnement solaire à un endroit géographique particulier est d'importance essentielle pour le développement des dispositifs d'énergie solaire et pour l'évaluation de leurs performances. Malheureusement, pour beaucoup des pays en voie de développement, des mesures de rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles, en raison du manque des moyens, des appareillages et des techniques de mesures impliquées. Par conséquent, il est nécessaire de développer des méthodes pour estimer le rayonnement solaire sur la base des données météorologiques la plus aisément disponible.

Il est très commun, pour concevoir des systèmes d'énergie solaire basés sur la moyenne mensuelle du rayonnement solaire et sur d'autres données climatiques. La moyenne mensuelle du rayonnement solaire global quotidien sur les surfaces horizontales est connue pour la plupart des pays du monde. En outre, beaucoup de modèles ont été développés pour estimer la quantité du rayonnement solaire global en utilisant divers paramètres climatiques tels que : la durée d'insolation, la couverture opaque, l'humidité, les températures ambiantes maximale et minimale...etc. Les données sur le rayonnement solaire diffus sont très rares, il est donc nécessaire d'élaborer des corrélations entre le rayonnement global largement disponible et le rayonnement diffus rarement disponible.

Beaucoup d'auteurs ont présenté des corrélations empiriques pour estimer la moyenne mensuelle du rayonnement diffus quotidien H_d sur une surface horizontale. Deux parmi les corrélations largement répandues sont ceux de Jordan, [1]. Dans ces corrélations, le rapport de la moyenne mensuelle du rayonnement quotidien diffus H_d au rayonnement global H est corrélé avec la moyenne mensuelle de l'index de clarté quotidien K_t .

Une troisième approche a été développée par Iqbal, [23] pour trouver une corrélation entre la fraction diffuse (H_d/H) et la fraction du nombre possible des heures d'ensoleillement (n/N).

Gopinathan, [24] a proposé des corrélations empiriques de la fraction diffuse (H_d/H) avec l'index de clarté K_t et de la fraction diffuse (H_d/H) avec la fraction du nombre d'heures d'ensoleillement (n/N) et une combinaison entre elles.

Il est à mentionner que, tous les modèles proposés contiennent des constantes empiriques qui dépendent de la saison et de l'endroit géographique.

Alors, dans le présent travail, les auteurs ont développé des corrélations empiriques pour estimer le rayonnement solaire diffus horizontal par emploi des données mesurées disponibles pour le site de Ghardaïa (Latitude : 32.36° N, Longitude : 3.81° E et Altitude 450 m). Par utilisation de la méthode de l'analyse de régression, une première corrélation entre la fraction diffuse (H_d/H) et l'index de clarté K_t du premier ordre a été proposé.

Des corrélations du second ordre entre la fraction diffuse (H_d/H) ou la transmittance diffuse (H_d/H_0) et la fraction du nombre relatif possible maximum d'heures d'ensoleillement (n/N) sont trouvées, afin d'adapter les données mesurées.

Des comparaisons entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées du rayonnement solaire diffus H_d montrent que la corrélation de premier ordre entre (H_d/H) et K_t ou entre (H_d/H_0) et (n/N) peut être employée pour estimer H_d à l'endroit actuel avec une bonne exactitude. Cependant, des corrélations du second ordre entre (H_d/H) et (n/N) ou entre (H_d/H_0) et (n/N) sont recommandées pour estimer H_d (Fig. 1.13).

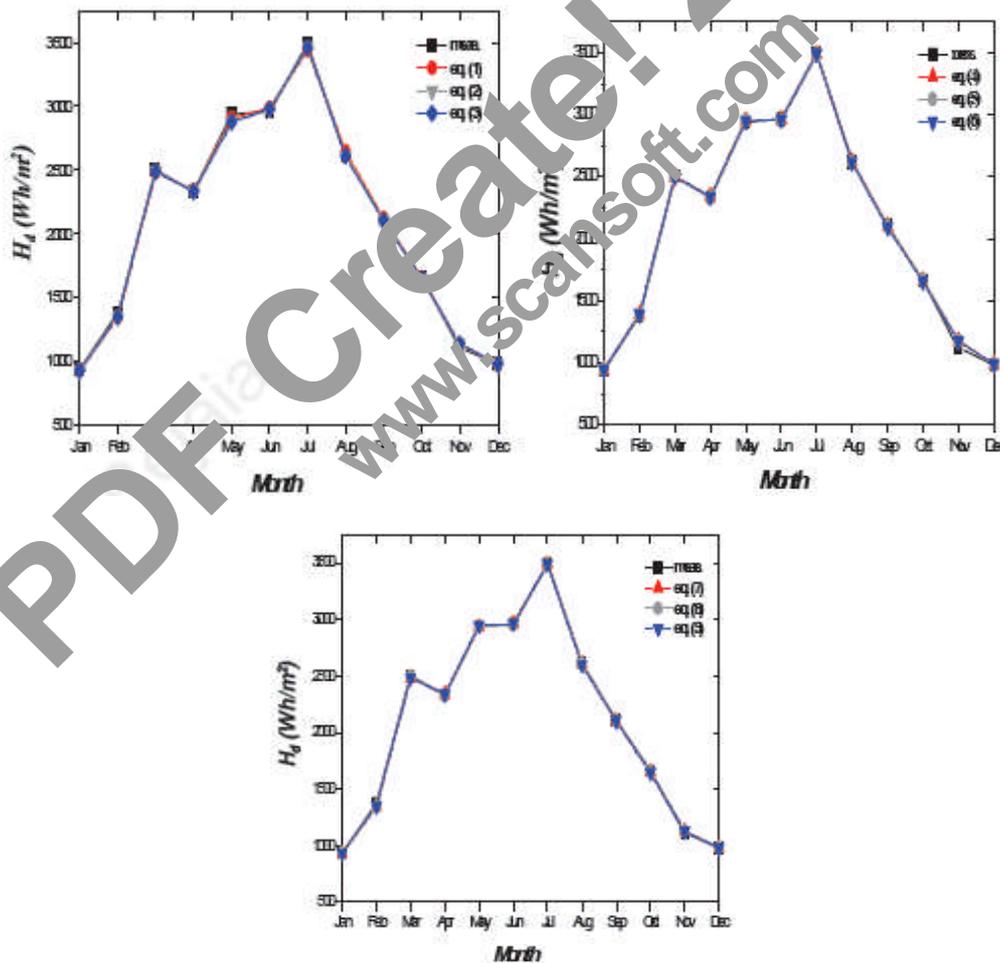


Fig. 1.13 : Comparaison entre H_d mesuré et calculé à Ghardaïa en utilisant les équations de corrélations précitées, [22].

En outre, les corrélations proposées peuvent être employées exactement pour prévoir les moyennes annuelles du rayonnement diffus horizontal, qui aident à l'évaluation de performance à long terme des divers dispositifs d'énergie solaire.

R. Chenni et al. [25] sont intéressés à l'étude et l'optimisation du rayonnement solaire dans les applications énergétiques solaires photovoltaïques. Étant donné que, les données météorologiques concernant le rayonnement solaire ne sont généralement pas suffisantes pour pouvoir quantifier tous les phénomènes qui se produisent lorsqu'un panneau solaire photovoltaïque reçoit de la lumière.

Il est donc nécessaire de compléter ces données météorologiques en faisant usage d'un calcul astronomique de la position du soleil et de l'utilisation d'un modèle de l'atmosphère.

Dans l'objectif qui s'attache à ce travail, il est nécessaire de transformer les données météorologiques mises à la disposition. En effet, la plupart du temps, ces données ne fournissent que des valeurs du rayonnement global sur un plan présentant une certaine orientation. Le problème qui se pose ici est que, ces données ne permettent pas de déterminer l'orientation de ce rayonnement. Or, la connaissance de l'orientation du rayonnement s'avère nécessaire pour bien quantifier le rayonnement solaire réellement reçu, ainsi que pour analyser les problèmes de la réflexion, de la réfraction et de l'absorption qui influencent l'efficacité des rayons solaires.

Il peut être donc que, l'efficacité du rayonnement va dépendre de l'angle d'incidence de chacun des rayons composants ce rayonnement.

Comme le rayonnement global est constitué de plusieurs composantes qui ont chacune leur orientation propre, il est donc nécessaire de trouver un moyen de quantifier ces différentes composantes à partir de la connaissance du rayonnement global. Pour cela, un modèle a été exposé par les auteurs qui permet d'effectuer la décomposition du rayonnement global en plusieurs composantes. Celui-ci s'inspire du livre "Atlas Solaire de l'Algérie" de M. Capderou, [1].

Alors, ce travail a permis de définir le modèle ainsi développé, permettant sur la connaissance seule du rayonnement solaire global, de déterminer les différentes composantes du rayonnement solaire (Fig. 1.14).

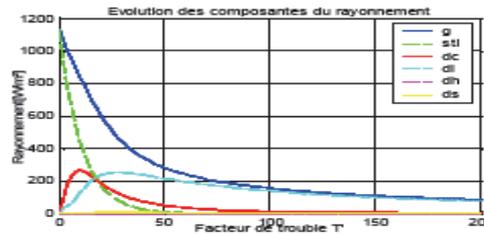


Fig. 1.14 : Variation des différentes composantes du rayonnement en fonction du facteur de trouble, [25].

Ce modèle n'est pas exempt de défauts, comme le montrent les premiers résultats numériques qui ont été exécutés. Néanmoins, il va permettre de déterminer l'efficacité du rayonnement. Cette efficacité est tributaire de plusieurs phénomènes de réflexion, de réfraction et d'absorption. Même si des erreurs surviennent dans le calcul des composantes, ce modèle servira quand même à développer un code de calcul permettant de modéliser le ciel sous tous ses aspects.

M. Chikh et al. [26] ont présenté une analyse du rayonnement solaire horaire diffusé sur une surface horizontale. Ils ont développé une corrélation entre la fraction diffuse de l'irradiation solaire (I_d/I_g) et l'indice de clarté K_t ainsi que la hauteur du soleil α .

Or, la connaissance de la fraction diffuse de l'irradiation solaire sur un site particulier est très importante pour la conception des systèmes énergétiques solaires. D'actuelles mesures de l'irradiation solaire globale horaire sont souhaitables comme variable d'entrée pour la gestion optimale et le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires, mais probablement ne sont pas disponibles sur chaque site sous des orientations bien déterminées. Cependant, l'irradiation solaire globale sur une surface horizontale est l'une des variables le plus souvent mesurées, ajoutée à d'autres variables climatiques (température ambiante, les points de rosée... etc.).

Si seulement l'irradiation solaire globale horizontale est mesurée, deux problèmes peuvent apparaître : le premier est comment déterminer la fraction du global qui sera le diffus ou bien le direct, le second problème consiste en l'estimation de ces composantes : le diffus, le direct et l'albédo sur une surface inclinée pour différentes orientations.

Le travail ainsi effectué par les auteurs, [26] est basé sur les travaux de Bulger, [27] et Iqbal, [28] et la corrélation ainsi développée, à travers laquelle est mise en évidence que la fraction diffuse est non seulement fonction de l'indice de clarté, mais aussi de la hauteur du soleil.

Le modèle mathématique établi pour la fraction diffuse de l'irradiation solaire concernant le territoire Algérien est de la forme :

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \dots + a_j \cdot x_j + \varepsilon \tag{1.5}$$

Où : y est la réponse optimale, a_j est la $j^{i\text{eme}}$ paramètre du modèle, x_j est le $j^{i\text{eme}}$ prédicteur (variable indépendante) et ε est l'erreur de la modélisation.

Des corrélations ont été établies pour trois sites Algériens, à savoir : Alger, Bechar et Tamanrasset, et sont comparées à des corrélations établies par Liu Jordan, [12] Orgill et Hollands, [29] Erbs et al. [30] et DT. Reindl, [31]. Les trois corrélations sont les suivantes (Tableau 1.3) :

Nom du site	$0 \leq K_t \leq 0.175$	$0.175 \leq K_t \leq 0.87$	$K_t \geq 0.87$
	$I_d / I_g \leq 1$	$I_d / I_g \leq 0.97$ et $I_d / I_g \geq 0.1$	$I_d / I_g \geq 0.1$
Alger1	$I_d / I_g = 1 - 0.14k_t - 0.037 \sin(\alpha)$	$1 - 0.43k_t + 0.0237 \sin(\alpha)$	$0.21k_t - 0.74 \sin(\alpha)$
Bechar1	$I_d / I_g = 1 - 0.39k_t - 0.07 \sin(\alpha)$	$1.2 - 1.23k_t + 0.104 \sin(\alpha)$	$0.54k_t - 0.34 \sin(\alpha)$
Tam1	$I_d / I_g = 1 - 0.353k_t - 0.1 \sin(\alpha)$	$1 - 0.91k_t - 0.038 \sin(\alpha)$	$0.4k_t - 0.24 \sin(\alpha)$

Tableau 1.3 : La version finale de l'ensemble des corrélations pour les trois sites, [26].

La validation du modèle établi a été faite, et les performances des modèles établis pour l'Algérie ont été examinées en effectuant des tests statistiques reposant sur le calcul des indicateurs statistiques de validation sur les valeurs de la fraction diffuse estimée du rayonnement solaire. Le premier test est une comparaison simplifiée de résidus composés des sommes quadriques (CRSS). Le deuxième test, il consiste au calcul de l'erreur moyenne absolue (MAB). Ces deux relations sont appliquées sur les données complètes en mettant en évidence l'amélioration apportée par cette nouvelle corrélation de la fraction diffuse, ce qui conclut la nécessité d'avoir des modèles de rayonnement solaire spécifique à l'Algérie (Fig. 1.15).

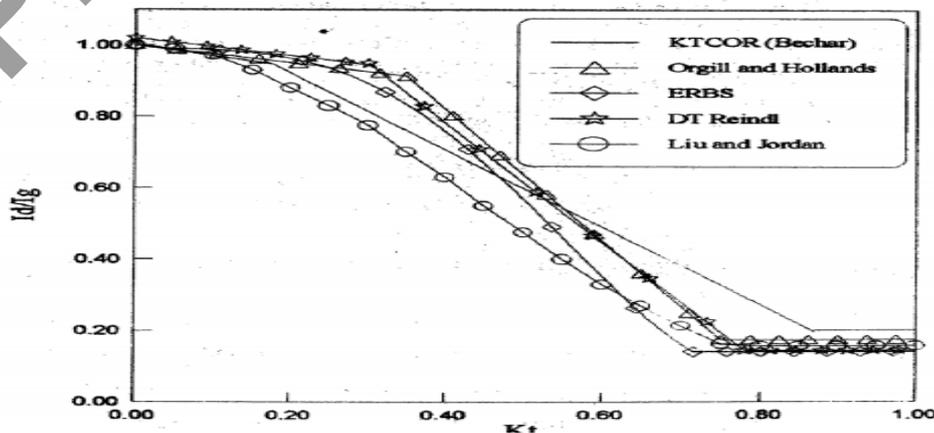


Fig. 1.15 : Corrélation de la fraction diffuse incluant K_t corrigée, [26].

Y. Bouhadda et L. Serir, [32] ont présenté une étude sur la trouble atmosphérique. Ils ont focalisé leur travail sur le facteur de trouble de Linke pour le site de Ghardaïa en Algérie. Il est clair que les radiations solaires sont atténuées en traversant l'atmosphère terrestre. Cette extinction de la radiation solaire est principalement due à la diffusion par les aérosols et à l'absorption par les différents composants atmosphériques tels que : l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène, le dioxyde de carbone et autres. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de trouble atmosphérique. Plusieurs coefficients de trouble ont été introduits pour étudier le trouble atmosphérique comme par exemple, facteur de trouble d'Angstrom, de Linke et d'Unsworth - Monteilh.

Dans cette étude, le travail est localisé sur le facteur de trouble atmosphérique de Linke en particulier pour le site de Ghardaïa. Alors, on peut définir le facteur de trouble de Linke comme étant le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle.

Les auteurs, [32] ont utilisé deux formulations différentes : la première est un modèle de Kasten, [35] tandis que le second est le modèle d'Ineichen, [33].

Le facteur de trouble de Linke a été mesuré sur le site de Ghardaïa durant une période d'une année entre 01.09.2004 et 01.09.2005 (Fig. 1.16).

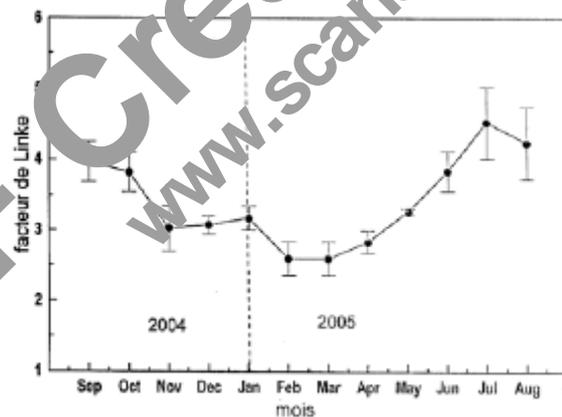


Fig. 1.16 : Variation du facteur de trouble de Linke T_L à Ghardaïa, [32].

Ainsi, le modèle de Kasten exprime le facteur de trouble de Linke T_L à partir de l'irradiation solaire directe reçue sur un plan normal par journée de ciel clair de la façon suivante :

$$T_L = \frac{1}{\delta_{R.m}} \log \left(\frac{I_0}{I_n} \right) \quad (1.6)$$

Où : I_n est l'irradiation solaire directe normale, I_0 est la constante solaire, m est la masse d'air atmosphérique et δ_R est l'épaisseur optique.

Pour le modèle d'Ineichen, le facteur de trouble de Linke T_L peut être défini par la relation suivante :

$$I_n = I_0 \exp(-\delta_{eda} \cdot T_L \cdot m) \quad (1.7)$$

Où : I_n est l'irradiation solaire directe normale, I_0 est la constante solaire, m est la masse d'air atmosphérique et δ_{eda} est l'épaisseur optique d'une atmosphère sans nuage, sans vapeur d'eau et sans aérosols.

La dépendance du facteur de trouble de linke T_L en masse d'air atmosphérique est une conséquence de la forte dépendance de la diffusion de Rayleigh en longueur d'onde.

La masse d'air atmosphérique a été calculée par l'utilisation de la formule de Kasten et Young, où la hauteur du soleil h est déduite à partir de la formule suivante :

$$\sin h = \frac{G_h - D_h}{I_m} \quad (1.8)$$

Où : G_h : est l'irradiation globale sur une surface horizontale.

D_h : est l'irradiation diffuse sur une surface horizontale.

I_m : est l'irradiation directe normale.

La connaissance de la masse d'air atmosphérique peut contribuer à l'étude globale du rayonnement solaire. La formule de Kasten et Young a été choisie parmi plusieurs d'autres, parce qu'elle est la plus récente et la plus utilisée pour l'injecter dans l'étude du trouble atmosphérique (Fig. 1.17).

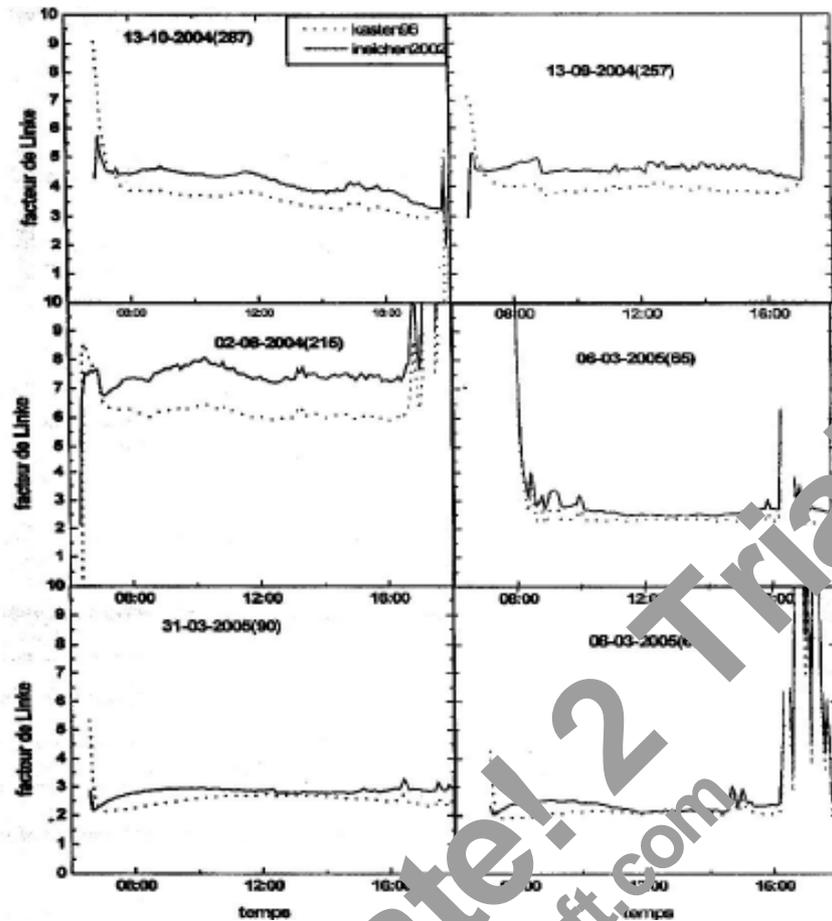


Fig. 1.17 : Estimation du facteur de trouble de Linke selon deux approches : (Kasten : 1996 et Ineichen : 2002), [52].

Enfin, l'étude effectuée peut être améliorée par constitution d'une base de données plus étendue en espace par d'autres sites voisins et en temps par d'au moins de 4 ans, pour proposer un modèle en se basant sur le facteur de trouble atmosphérique de Linke mesuré.

Un travail qui traite la constitution du rayonnement solaire par ciel clair a été présenté par D. Saheb Koussa et al. [4]. Dans une synthèse bibliographique, les auteurs ont retenu le modèle de Bird et Hulstrom, [10] utilisé pour l'estimation des éclairagements dus aux différentes composantes du rayonnement solaire. Or, le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires nécessite la connaissance d'une part, les paramètres météorologiques tels que : la température, la vitesse du vent et l'humidité relative et d'autre part, les différentes composantes du rayonnement solaire.

Les stations météorologiques existants sur le territoire Algérien collectent les différentes données météorologiques et quelques données radio métriques seulement.

A cet effet, il est jugé nécessaire d'appliquer les modèles destinés à estimer les principales composantes du rayonnement solaire incident sur le sol et utilisant comme paramètres d'entrées, des données météorologiques à savoir : la température, l'humidité, la durée d'insolation, la pression...etc.

Dans le modèle retenu de Bird et Hulstrom, des relations empiriques ont été proposées qui permettent d'estimer les différents coefficients de transmission du rayonnement solaire, ainsi que les relations menant au calcul des différentes composantes du rayonnement solaire. Il est à noter ici que, ce modèle n'est applicable que pour une journée claire.

L'éclairement dû au rayonnement direct sur un plan horizontal est donné par la relation suivante :

$$B_H = B_n \cdot \sin h \quad \text{et} \quad B_n = 0.975 \cdot I_{sc} \cdot \tau_r \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a \quad (1.9)$$

Où : I_{sc} : est la constante solaire.

τ_r : coefficient de transmission après diffusion moléculaire de Rayleigh

τ_g : coefficient de transmission après diffusion par les gaz.

τ_w : coefficient de transmission après absorption par la vapeur d'eau.

τ_a : coefficient de transmission après diffusion par les aérosols.

$\sin h$ est la hauteur du soleil.

L'éclairement dû au rayonnement diffus sur un plan horizontal est donné par la relation suivante :

$$D_H = D_r + D_a + D_m$$

Où : D_r est l'éclairement dû au rayonnement diffus issu de la diffusion de Rayleigh.

D_a : l'éclairement dû au rayonnement diffus après diffusion par les aérosols.

D_m : l'éclairement dû au rayonnement dû au phénomène de multi réflexion terre atmosphère.

L'éclairement dû au rayonnement global sur un plan horizontal est donné par la relation suivante :

$$G_H = B_H + D_H$$

Ainsi, des valeurs collectées pour une journée claire (22 juin 2004) sur le site de Ghardaïa en Algérie, ont été utilisées aux quelles sont confrontées les valeurs estimées par le modèle utilisé. Cette comparaison consiste d'une part, à dresser ces valeurs sur un même diagramme (Fig. 1.18) et d'autre part, l'écart relatif maximal entre les valeurs mesurées et celles estimées a été calculé par la relation suivante :

$$E_{\max} = \left| \left[\frac{V_c - V_m}{\min(V_c, V_m)} \right] \right| \quad (1.10)$$

Où : V_c est la valeur calculée, V_m est la valeur mesurée, E_{\max} est l'écart maximal (%).

La validation du modèle, a donné une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles estimées.

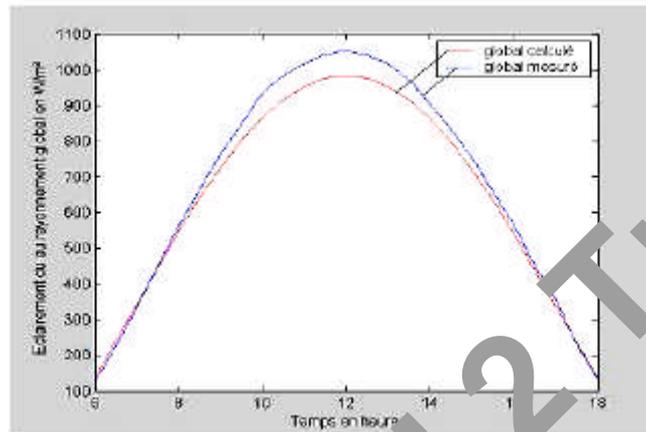


Fig. 1.18 : Comparaison des valeurs de l'éclairement global dû au rayonnement global mesurées et estimées [36]

Dans le but de quantifier les fluctuations aléatoires des éclairements dus au rayonnement solaire, ainsi que les classer en fonction de l'état de ciel, S. Herrouni et A. Maafi, [36] ont proposé un article concernant la modélisation fractale des éclairements solaires.

La modélisation des fluctuations aléatoires du rayonnement solaire a déjà fait l'objet de plusieurs études publiées dans la littérature. Ainsi, des études plus récentes s'intéressent à la modélisation du caractère aléatoire du rayonnement solaire en utilisant les réseaux de neurones et l'analyse fractale.

En plus du caractère inédit de ces nouvelles approches, ces études visent à évaluer l'apport de ces formalismes dans la description du caractère fluctuant du rayonnement solaire. C'est à partir de l'estimation de sa dimension fractale que le modèle proposé permet de quantifier les fluctuations du rayonnement solaire. La mise au point de ce modèle a été effectuée à l'aide de mesures de l'éclairement solaire réalisées à un pas de temps de 10 minutes dans les sites de Tahifet et d'Imehrou situés dans le grand Sud Algérien. L'application de cette modélisation concerne la classification des signaux d'éclairement à l'aide de la dimension fractale.

Cette classification aboutit à la détermination de types de temps : ciel clair, ciel partiellement couvert, ciel couvert...etc. utiles pour le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires et pour

l'analyse de ses performances. En réalité, cette question a été largement traitée dans la littérature mais elle a été abordée sans faire appel à l'analyse fractale.

Pour ce travail, la méthode de classification est basée sur la détermination de seuils de la dimension fractale des signaux d'éclairement solaire pour aboutir à des groupements homogènes des journées selon l'état du ciel. Le choix d'une méthode de seuillage au lieu d'une méthode statistique est dicté par le critère principal qui est la dimension fractale. En effet, les méthodes statistiques bien qu'elles diffèrent par les paramètres utilisés comme critères de classification, la plupart d'entre elles utilisent une distance métrique tel que : la distance Euclidienne afin d'établir l'écart d'homogénéité entre deux journées. Ceci, ne peut être appliqué à la dimension fractale vue qu'une journée pluvieuse et une autre ensoleillée peuvent avoir la même dimension fractale, comme il sera montré dans la présente étude.

La méthode de classification ainsi présentée, aura aussi l'avantage de ne pas nécessiter la condition de stationnarité comme c'est le cas pour les approches markoviennes citées plus haut. Ces méthodes recourent alors à d'autres techniques, afin de rendre le rayonnement solaire stationnaire tel que : la transformée Gaussienne et l'utilisation des fractions de la variable solaire au lieu de la variable elle-même.

Les données utilisées à l'étude sont constituées d'éclairements globaux, enregistrées au cours de l'année 1992 sur un plan incliné de 10° par rapport au plan horizontal dans les deux sites précités : Tahifet et Imehrou.

La modélisation consiste d'abord à recouper le signal d'éclairement journalier dont on veut déterminer la dimension fractale par des rectangles de longueur Δt et de largeur $|E(t_n + \Delta t) - E(t_n)|$, où Δt est l'intervalle de temps et $E(t_n)$ est l'éclairement global à l'instant t_n (Fig. 1.19).

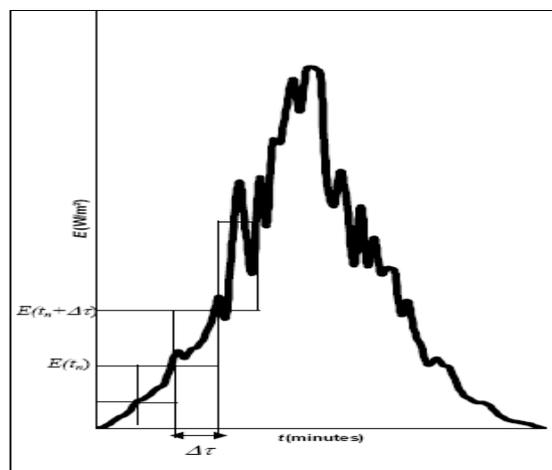


Fig. 1.19 : Recouvrement d'une courbe d'éclairement par des rectangles, [36].

Un programme d'estimation de la dimension fractale à été utilisé, et un traitement fractal des éclairements a été effectué, afin d'estimer leurs dimensions fractales des éclairements journaliers de Tahifet et d'Imehrou.

Les résultats obtenus sont regroupés pour tous les mois de l'année pour les deux sites, ainsi que l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle de la dimension fractale estimée \hat{D} pour les deux sites sont faites (Fig. 1.20).

La classification des éclairements par utilisation de la dimension fractale estimée a été réalisée aboutissant à des types de journées.

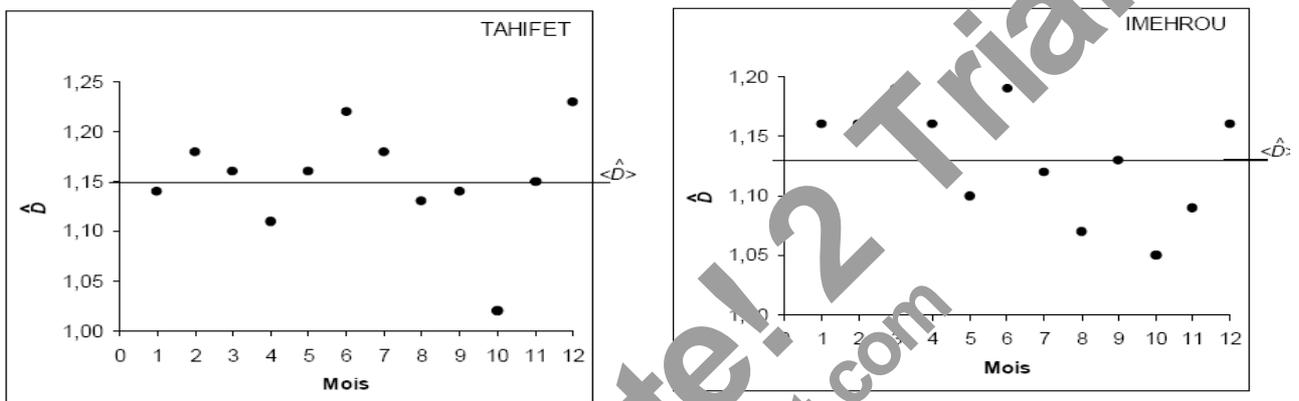


Fig. 1.20 : Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de la dimension fractale estimée \hat{D} pour les deux sites, [36].

A. Khireddine et K. Ben Mohammed, [37] ont consacré leur travail à l'ajustement des données d'ensoleillement caractérisant un site en Algérie (36.43° N et 05.04° E) par une méthodologie aboutissant à la correction du rayonnement solaire. Le modèle de simulation élaboré a été obtenu par le choix de l'approche de Fourier et par le choix des coefficients de corrélation constants durant l'année.

La modélisation statistique est très intéressante pour plusieurs applications pratiques, comme pour l'étude et la prédiction des performances des systèmes énergétiques solaires.

Il est évident que, le rayonnement solaire arrivant à la surface de la terre n'est pas celui émis par le soleil à cause des différents phénomènes d'absorption, de diffusion et de filtrage au niveau des différentes couches atmosphériques, ce qui rend le stockage de l'énergie solaire difficile, car elle fluctue énormément au cours du temps. Ainsi, le rayonnement solaire varie à la fois périodiquement et aléatoirement durant l'année. Les variations périodiques se font au rythme des saisons qui sont

dues aux variations de la déclinaison, tandis que les fluctuations aléatoires sont surtout causées par les troubles atmosphériques.

Dans la plupart des stations météorologiques, les mesures de l'insolation se font en permanence alors que celles de l'irradiation solaire sont plutôt rares. Cependant, différentes approches permettent d'estimer correctement le flux d'irradiation solaire à partir des données d'insolation, à savoir : l'équation d'Angstrom par exemple. Il existe aussi des méthodes qui permettent de décrire ou de reproduire les variations horaires et quotidiennes de l'insolation ou de l'irradiation solaire, ce sont celles qui sont basées sur l'emploi de processus autorégressif.

L'un des plus fréquents problèmes que rencontrent les ingénieurs de systèmes photovoltaïques solaires, est la nature aléatoire des phénomènes. Si la distribution statistique de ces phénomènes est connue, une quantité large des données peuvent être résumées avec seulement quelques paramètres. Ainsi, on peut produire des séquences synthétiques qui ont les mêmes propriétés statistiques que les données réelles.

Une série chronologique est une suite d'observations chiffrées et ordonnées dans le temps. Cette série correspond à des intervalles de temps fixes et réguliers. La première étape de l'étude d'une série chronologique consiste en sa représentation graphique, cette dernière permettra de mettre en évidence les composantes suivantes, qui sont très importantes pour le choix du modèle à appliquer : la tendance, le facteur saisonnier, les irrégularités et les perturbations.

L'étude de la série brute nécessite en premier lieu la stationnarisation de celle-ci. On dit qu'une série est stationnaire, si elle est la réalisation d'un processus stationnaire. Ce qui implique que la série ne comporte pas de tendance de saisonnalité, la variance est constante et son auto corrélation ne dépend pas du temps.

Lorsque le modèle autorégressif $AR(p)$ convenable est obtenu pour représenter la série chronologique $Z(t)$, ce dernier sera utilisé pour simuler une séquence artificielle d'ensoleillement. Une démarche est suivie dans le processus de simulation.

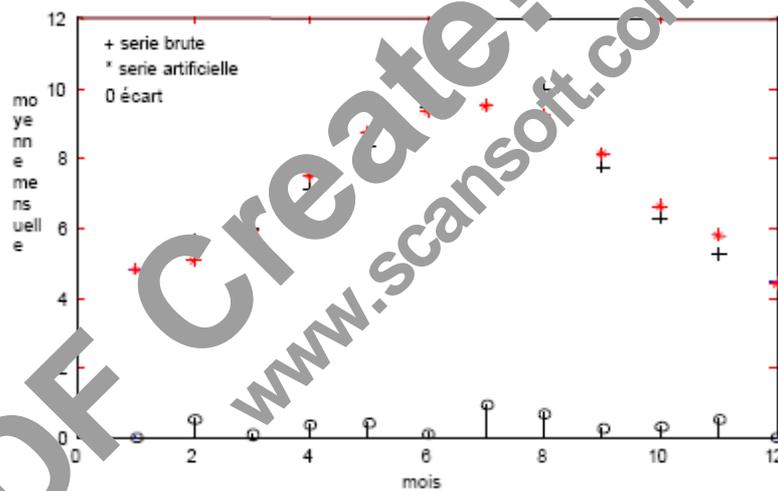
Le résultat de cette analyse est la génération d'une séquence synthétique avec caractéristiques statistiques exactes (moyenne, variance, coefficients d'auto corrélation et d'auto corrélation partielle), (Tableau 1.4).

mois série	Janv.	Fev	Mar s	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc
Brute	4.85	5.64	6.01	7.11	8.27	9.49	10.5	9.97	7.79	6.28	5.26	4.46
Artificielle	4.81	5.09	5.91	7.50	8.74	9.34	9.50	9.25	8.12	6.64	5.81	4.42

Tableau 1.4 : Les moyennes mensuelles des deux séries, [37].

La méthode suivie a permis de trouver le modèle le plus approprié pour la description de la série des données à partir d'éléments simples d'analyse des corrélations temporelles, puis simuler une séquence artificielle d'ensoleillement qui possède toutes les informations et caractéristiques statistiques essentielles du climat et qui sera utile dans la simulation des systèmes de l'énergie solaire (Fig. 1.21).

Pour le comportement aléatoire de l'irradiation solaire, il suffirait d'utiliser l'équation d'Angstrom pour traduire les données d'ensoleillement en données d'irradiation solaire et d'employer une méthode élaborée par Liu et Jordan pour transformer les données d'irradiation solaire obtenues pour un capteur horizontal en données reçues sur un plan incliné.



(Fig. 1.21) : Comparaison des moyennes mensuelles des deux séries, [37].

L'estimation du rayonnement solaire global par utilisation des heures d'ensoleillement est un travail de M. Chegaar et al. [38], qui ont modifié une méthode empirique à l'origine formulé par Sivkov, [39] pour la faire adapter à quelques stations météorologiques Algériennes et Espagnoles. Le modèle ainsi adapté, exige seulement la durée d'insolation et la masse d'air minimum.

Malheureusement, les mesures du rayonnement solaire ne sont pas facilement disponibles pour beaucoup de pays en voie de développement, qui n'ont pas les équipements de mesures et les techniques impliquées. Par conséquent, il est plutôt important d'élaborer des méthodes à estimer le rayonnement solaire sur la base de données météorologiques plus aisément. Plusieurs formules

empiriques ont été développées pour calculer le rayonnement solaire en utilisant de divers paramètres.

Quelques travaux ont employé la durée d'ensoleillement, que d'autres ont employé la durée d'ensoleillement, l'humidité relative et la température, alors que d'autres employaient le nombre de jours pluvieux, le nombre d'heures d'ensoleillement, et un facteur qui dépend de la latitude et de l'altitude.

L'Algérie est un pays à haute insolation, le nombre d'heures d'ensoleillement est presque de 3300 h/an. Le temps est plus favorable pour l'exploitation de l'énergie solaire, mais sa distribution n'est pas encore bien connue. D'où l'importance de cette étude qui se trouve sur le besoin fondamental de la connaissance des données du rayonnement solaire global dans le pays.

Alors, Sivkov a proposé une relation empirique pour calculer l'irradiation solaire globale mensuelle, qui est la suivante :

$$G_m = 4.9 (S_m)^{1.31} + 10500 (\sin h_m)^{2.1} \quad (1.11)$$

Où : G_m : est l'irradiation globale mensuelle (cal. Cm^{-2})

S_m : la moyenne mensuelle du nombre d'heures d'ensoleillement quotidien (h)

h_m : la hauteur du soleil au midi pour le 15^e jour du mois.

Des paramètres appropriés de zone dépendants du climat ont été déterminés pour les stations Algériennes : Alger, Oran, Bechar et Tamanrasset ($K = 19.4 - 19.4 - 21.3 - 23.3$) et un simple paramètre pour toute les stations Espagnoles ($K = 19.9$). Les valeurs de l'irradiation solaire globale moyenne mensuelle journalière incidente sur une surface horizontale sur les stations météorologiques Algériennes et Espagnoles ont été calculées par cette méthode et par utilisation de la durée d'insolation et de la marge d'air minimum. Les valeurs ainsi obtenues sont ensuite comparées à celles calculées par M. Capderou, [1] pour le cas de l'Algérie. Les valeurs mesurées de l'irradiation solaire globale incidente sur une surface horizontale par quelques stations météorologiques Espagnoles sont publiées par J. Canada ont été comparées aux prédictions obtenues par ce modèle. L'exactitude est meilleure que 10.7 % pour Alger et Oran, 6% pour Bechar, est 8.2% pour Tamanrasset est à moins de 8% pour toute les stations Espagnoles (Tableau 1.6).

La formule proposée donne des meilleures évaluations d'irradiation solaire globale une fois comparée aux formules de Capderou et du Canada.

Station	Var.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Algiers	S	4.70	5.98	7.08	7.91	9.91	10.27	11.12	10.73	9.11	6.91	5.15	4.68
	H	32.02	40.32	50.82	62.76	71.96	76.56	74.95	67.60	56.63	45.06	35.00	30.06
	G ₁	8.43	11.82	15.73	19.51	23.52	24.57	25.36	23.72	19.48	14.06	9.60	7.97
	G _m	7.88	10.69	14.87	17.68	21.64	22.21	25.38	22.90	18.43	12.71	9.79	7.42
	G ₂	7.91	11.69	15.95	19.63	23.75	24.47	24.97	23.01	18.51	12.99	8.68	7.09
	E ₁	-6.91	-10.5	-7.83	-10.7	-8.69	-10.6	0.08	-3.62	-5.67	10.65	1.91	-7.47
	E ₂	-0.27	-9.29	-7.26	-11.0	-9.78	-10.1	1.62	-0.50	-0.43	-2.21	11.32	4.37
Oran	S	5.24	5.68	7.55	8.14	9.57	9.91	11.33	10.56	8.85	7.37	5.39	5.11
	H	33.10	41.40	51.90	63.84	73.04	77.64	76.03	68.68	57.71	46.14	36.08	31.14
	G ₁	9.26	11.77	16.54	20.00	23.29	24.28	25.74	23.72	19.44	14.86	10.12	8.67
	G _m	9.36	12.53	18.50	20.28	23.08	27.00	26.60	24.16	20.56	14.00	9.94	8.03
	G ₂	8.75	11.75	16.91	21.24	23.55	24.18	25.52	23.12	18.58	13.90	9.25	7.82
	E ₁	1.11	6.08	10.64	5.85	-0.91	10.09	3.23	1.80	5.44	-6.08	-1.89	-7.99
	E ₂	6.54	6.21	8.60	4.54	-2.06	10.45	4.06	4.29	9.63	0.77	6.88	2.60
Béchar	S	7.91	8.72	9.94	10.75	11.16	11.64	11.63	10.93	10.05	9.03	8.04	7.58
	H	37.10	45.40	55.90	67.83	77.04	81.64	80.03	72.68	61.71	50.14	38.08	35.14
	G ₁	14.00	17.07	21.28	24.90	26.82	27.88	27.74	25.94	22.76	18.68	14.57	13.07
	G _m	14.47	17.14	22.00	24.59	26.03	28.26	26.78	24.52	22.07	18.47	14.58	13.90
	G ₂	13.38	17.39	22.29	24.25	27.77	28.45	27.88	25.62	22.41	18.06	14.03	12.03
	E ₁	3.23	0.385	3.28	-1.27	-3.05	1.33	-3.56	-5.82	-3.15	-1.16	1.11	5.94
	E ₂	7.56	-1.47	-1.34	1.38	-6.53	-0.69	-4.09	-4.49	-1.57	2.11	1.14	13.42
Tam.	S	8.40	9.12	9.98	9.66	9.95	9.23	9.94	9.85	9.09	8.87	8.86	8.40
	H	45.95	54.25	64.75	76.68	85.89	89.51	88.88	81.53	70.56	59.99	48.93	43.99
	G ₁	17.70	20.80	24.39	25.90	27.03	26.11	27.09	26.61	24.06	21.00	19.10	17.19
	G _m	18.25	22.10	22.57	28.19	27.52	26.00	26.87	26.28	23.33	21.41	18.84	16.93
	G ₂	17.86	21.69	25.63	26.78	25.92	26.14	26.35	25.96	24.01	22.07	18.68	16.13
	E ₁	3.02	5.881	-8.06	8.12	-4.28	0.11	-2.79	0.63	0.22	2.13	-2.22	-6.60
	E ₂	2.17	1.86	-13.6	4.98	-6.17	0.52	-1.97	-1.15	0.09	3.00	-0.81	-4.96

Tableau 1.6 : Comparaison entre les valeurs de l'irradiation solaire globale mesurée, calculée, et obtenue par le modèle pour les sites Algériens [38].

Il est possible de déterminer d'autres paramètres de la zone par le prolongement de ce modèle à beaucoup de stations météorologiques Algériennes et à d'autres stations dans la côte Méditerranéenne et prévoir alors l'irradiation solaire globale dans ces différents endroits. Finalement, l'accord entre les valeurs mesurées, calculées et celles obtenues par le présent modèle est remarquable.

Par emploi des mesures de la durée d'ensoleillement quotidienne moyenne mensuelle, A. Mefti et al. [40] ont contribué à la génération du rayonnement solaire horaire pour les surfaces inclinées dans l'important quel emplacement de l'Algérie. Or, les données du rayonnement solaire sont rarement disponibles, tandis que la durée d'ensoleillement est généralement mesurée dans presque toutes les stations météorologiques pendant de longues périodes. Heureusement, le flux de rayonnement solaire peut être évalué en utilisant les modèles statistiques ou physiques, des ordres synthétiques des données solaires peuvent également être produites et utilisées pour classer les systèmes de conversion d'énergie solaires. Deux sortes d'approches ont été rapportées dans la littérature, la première est basée sur l'évaluation du flux de rayonnement solaire en connaissant les mesures au sol des paramètres météorologiques tels que : la durée d'ensoleillement, le flux de rayonnement solaire diffus ou la nébulosité. La seconde approche se compose du calibrage des images satellites en termes du flux de rayonnement solaire. Comme exemple, en 1924, Angstrom,

[41] a trouvé une relation linéaire entre la durée d'ensoleillement relative et l'indice de clarté. Aujourd'hui, cette relation est intensivement employée pour transformer les mesures de la durée d'ensoleillement en flux de rayonnement solaire global reçu sur les surfaces horizontales. En 1961, Liu et Jordan, [42] ont mis en application un modèle isotrope de rayonnement solaire global pour les surfaces inclinées basé sur des mesures solaires directes et diffuses. En 1979, Hay, [43] a traité les données mensuelles du rayonnement de la durée d'ensoleillement relative enregistrées dans les emplacements Nord-américains afin d'évaluer les moyennes mensuelles de rayonnement solaire horaire reçues sur les surfaces inclinées. En 2001, Youcef Ettoumi et al. [44] ont modelé les dispositifs statistiques des mesures solaires pour différents endroits de l'Algérie en employant des bêta distributions. En Algérie, des données quotidiennes de durée d'ensoleillement ont été enregistrées dans 54 stations météorologiques réparties à travers tout le pays. Les mesures ont été effectuées pendant des périodes du temps excédant en grande partie 1 ans. Plus récemment, des données de rayonnement solaires horaires ont été rassemblées sur une surface horizontale dans les endroits d'Alger, de Batna, de Beni Abbés, d'Oran, de Saïda et de Tamanrasset. Il est connu que l'Algérie a un temps ensoleillé, elle est située entre les latitudes 19°N et 37°N , sa surface est d'environ 2500000 Km^2 . Ce pays est approprié aux applications d'énergie solaire.

Par le fait que le réseau météorologique Algérien n'est pas assez dense, les ressources énergétiques solaires ne sont pas vraiment bien connues dans les endroits situés loin des stations météorologiques. Pour surmonter ce problème, une approche statistique basée sur les diverses transformations des données solaires a été mise en application par les auteurs.

Alors, la méthodologie utilisée par les auteurs, se compose de transformations des données solaires basées sur la distribution de probabilité exponentielle de la durée d'ensoleillement quotidienne, l'équation d'Angstrom, la bêta distribution de probabilité du flux de rayonnement solaire global horaire, les relations polynomiales de rayonnement solaire direct et diffus avec le rayonnement solaire global et sur le modèle de Klücher, [45].

Dans cette étude, les valeurs moyennes mensuelle des données quotidiennes de la durée d'ensoleillement enregistrées dans les 54 stations météorologiques Algériennes ont été employées, ainsi que les données horaires du rayonnement solaire rassemblées à Alger, Bechar et Tamanrasset. A savoir, les mesures quotidiennes de la durée d'ensoleillement moyenne mensuelle et les données de rayonnement solaire global horaire sont alors obtenues sur une surface inclinée pour les endroits d'Alger, de Bechar et de Tamanrasset (Fig. 1.22).

Les données horaires du rayonnement solaire global moyennes mensuelles pour Alger ont été estimées et ensuite, une comparaison entre les données estimées et les données expérimentales a été faite. Les deux données sont trouvées dans la concordance raisonnablement bonne (Fig. 1.23).

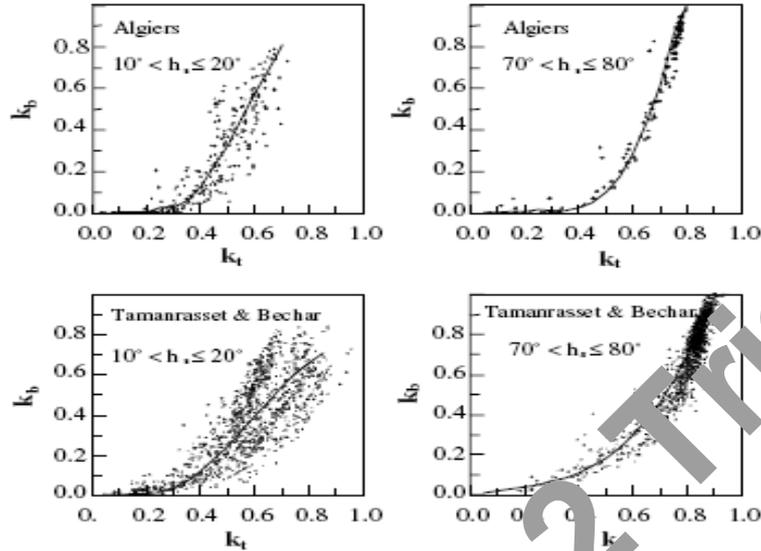


Fig. 1.22a : Rapports des valeurs estimées et mesurées du direct pour Alger, Bechar, et Tamanrasset obtenus en fonction de l'indice de clarté horaire avec angle d'élévation du soleil allant de 10° à 20° et de 70° à 80° [40].

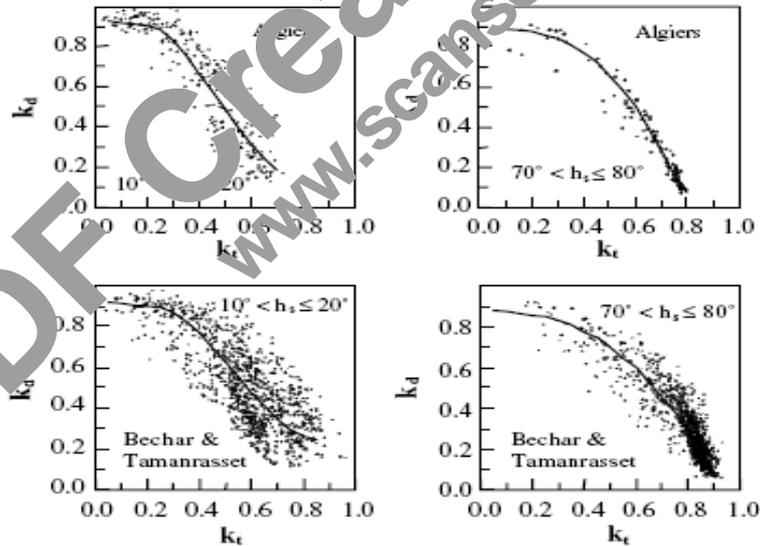


Fig. 1.22b : Rapports des valeurs estimées et mesurées du diffus pour Alger, Bechar, et Tamanrasset obtenus en fonction de l'indice de clarté horaire avec angle d'élévation du soleil allant de 10° à 20° et de 70° à 80° , [40].

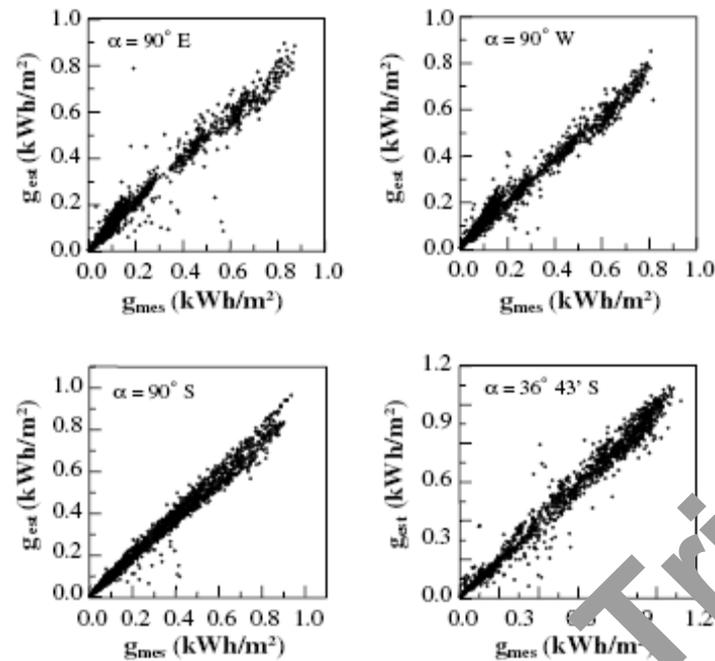


Fig. 1.23 : valeurs du flux de rayonnement solaire global horaire estimées et mesurées obtenues à Alger pour quatre surfaces inclinées [40].

L'analyse du composant principal (CPA) a été alors employée pour la méthode ainsi utilisée, qui a été prolongée à toutes les autres stations météorologiques et les valeurs moyennes mensuelles du flux de rayonnement solaire global horaire incident sur une surface inclinée ont été simulées pour chaque emplacement de l'Algérie. Ceci, rapporte une importante base de données utile pour des applications d'énergie solaire.

Par conséquent, les anomalies observées entre les valeurs estimées et mesurées du flux de rayonnement solaire horaire ont été de l'ordre de 10 % à 33 %.

La méthodologie présentée dans ce travail, rapporte alors une évaluation raisonnablement bonne du flux de rayonnement solaire horaire pour une surface inclinée dans un endroit donné. Cependant, il est évident que les données estimées puissent ne jamais remplacer les mesures du rayonnement solaire.

1.7.3-ETUDES DE L' EVALUATION DU GISEMENT SOLAIRE PAR IMAGES SATELLITAIRES :

Les études effectuées sur le rayonnement solaire pour l'Algérie et utilisant les images satellitaires sont encore rares. Seuls, quelques travaux nationaux ont été effectués dans ce domaine :

Une étude a été effectuée par O. Aissani et al. [46] qui est consacrée à l'estimation du coefficient de réflectance bidirectionnelle $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \phi_s, \phi_v)$ du sol par télédétection, où θ_s est l'angle d'incidence du

soleil, θ_v est l'angle d'incidence d'observation, ϕ_s est l'angle de direction du soleil, et ϕ_v est l'angle de direction d'observation (Fig. 1.24). Le site test est la région de Tamanrasset au Sud-est de l'Algérie ($22^\circ 47'S$, $5^\circ 13'E$) où les mesures au sol de quelques paramètres tels que : l'épaisseur optique des aérosols et le rayonnement global sont disponibles. Le but voulu à travers ce travail est de modéliser le signal télé détecté par le satellite géostationnaire METEOSAT 7.

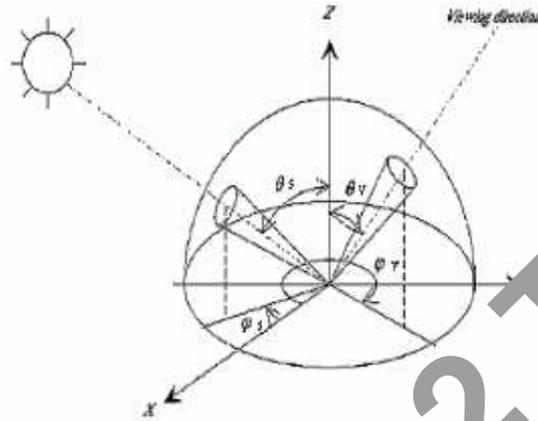


Fig. 1.24 : Le concept de la réflectance bidirectionnelle, [46].

Les auteurs ont établi deux modèles de calcul : le modèle spectral de GUEYMARD (SMARTS 2.9.5 code), [47] et le modèle analytique à bande large [48], pour les trois heures de prise d'image type B2, à 9h00, 12h00 et 15h00 en temps universel, couvrant une période de six mois de l'année 1999.

Les données satellitaires sont souvent utilisées pour les études concernant le bilan radiatif de la terre. Les premiers résultats significatifs obtenus à partir des satellites orbitaux, concernant les variations moyennes saisonnières du bilan global de système terre atmosphère, ont relancé l'idée d'utiliser le deuxième type de satellites qui sont les géostationnaires, pour effectuer des mesures radiométriques.

Les images satellitaires contribuent actuellement en grande partie à l'estimation du gisement solaire disponible au sol et à l'étude de son interaction avec la terre. Le détecteur de satellite METEOSAT, fournit des signaux numérisés codés sur 8 bits, ces comptes numériques représentent le rayonnement réfléchi par le système terre- atmosphère et elles sont souvent utilisées pour estimer le rayonnement solaire global au sol, l'Albédo de la surface, et l'épaisseur optique des aérosols.

Le rayonnement mesuré par le capteur du satellite dépend de la nature du sol et de l'état de l'atmosphère. La surface du sol est caractérisée par le coefficient de réflectance bidirectionnelle ρ_s qui dépend de l'humidité, de la température de la texture, et des conditions géométriques d'éclairement.

Dans ce travail, les auteurs ont essayé d'apporter une correction au modèle à deux composantes dont ils ont ajouté au rayonnement réfléchi par le sol sa composante diffuse. Ils ont trois images par jour, les images de ciel clair seront alors sélectionnées, à partir de la nébulosité total pour une période allant de Mars jusqu'à Août 1999.

Le code élaboré donne les mêmes résultats que le modèle spectral (SMARTS 2.9.5 code), le coefficient de corrélation est égal à 0.999 et l'erreur relative ne dépasse pas les 4% (Fig. 1.25).

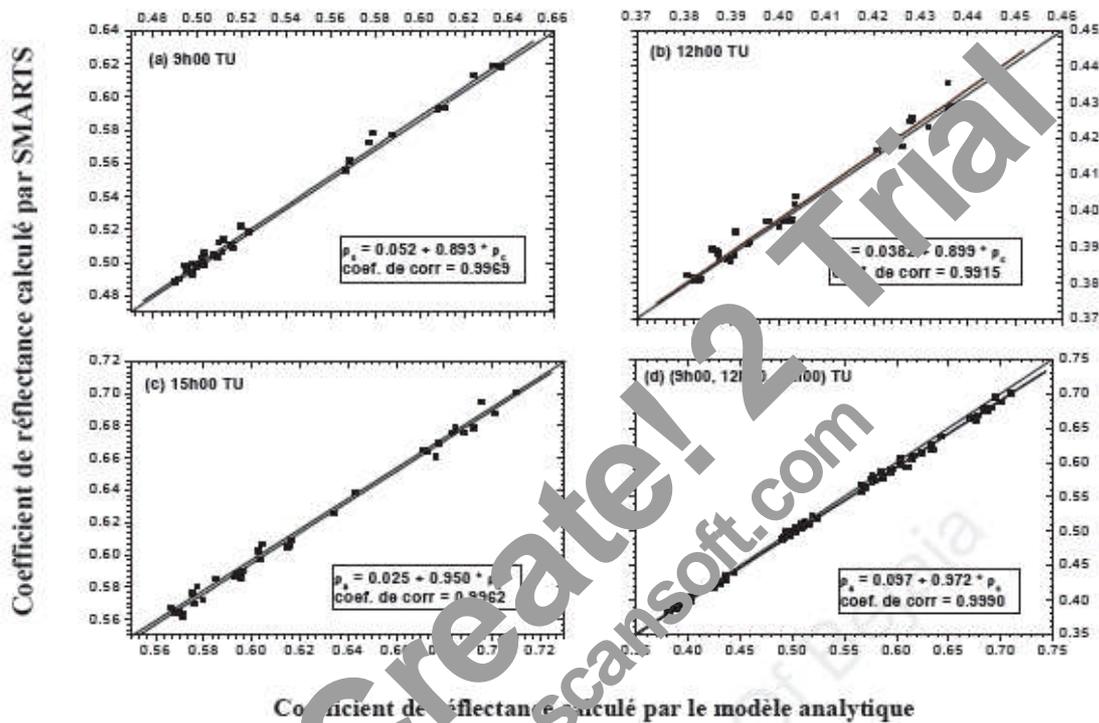


Fig. 1.25 : Comparaison entre les résultats obtenus par le coefficient de réflectance bidirectionnelle calculé par le modèle analytique et le modèle spectral (SMARTS 2.9.5 code), [46].

Il a été constaté que : un fort coefficient de réflectance bidirectionnelle dans le matin et d'une valeur minimale à midi. Aux mois d'été, le coefficient de réflectance est minimum. L'augmentation du sinus de la hauteur solaire $\sin(h)$ porte une diminution dans la valeur du coefficient de réflectance (Fig. 1.26).

Cette étude présente un modèle d'un intérêt pratique considérable pour toute l'Algérie, elle est d'une grande importance pour la maîtrise de l'estimation du gisement solaire, car il peut être un outil d'investigation de rayonnement solaire utile à plusieurs applications.

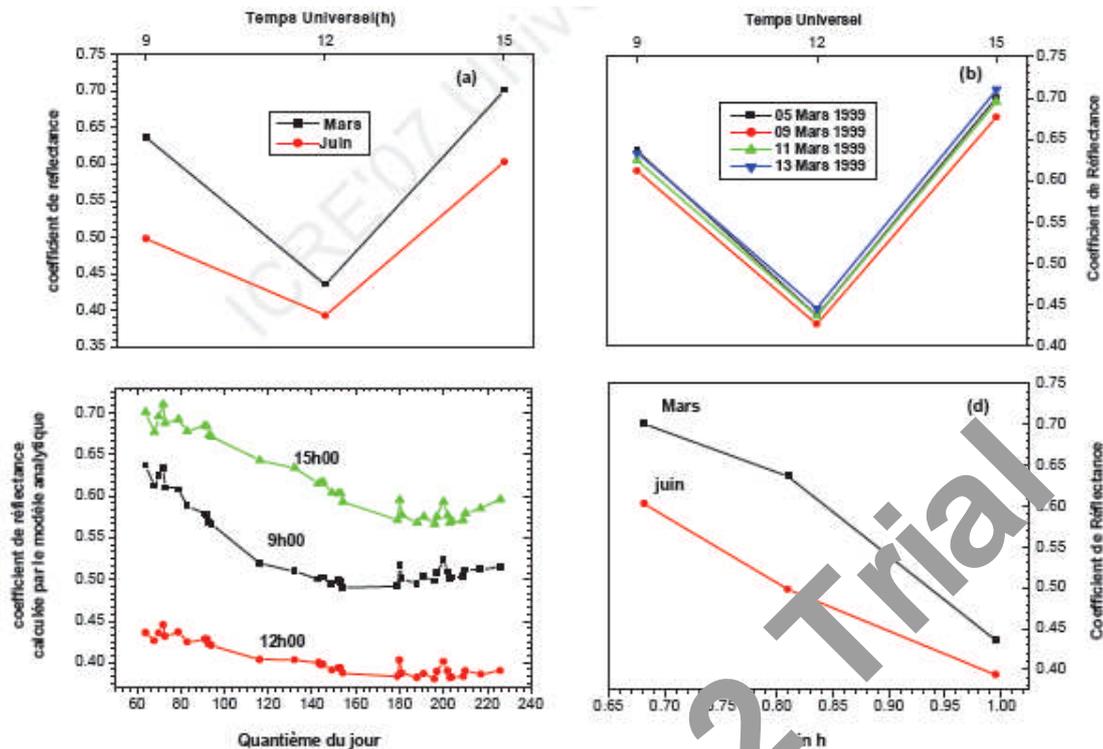


Fig. 1.26 : Evolution du coefficient de réflectance bidirectionnelle selon le temps, le quantième du jour, et le $\sin(\alpha)$ [46].

L'estimation du flux global d'irradiation solaire reçu au sol en Algérie, à partir du bilan radiatif en ciel clair et par traitement d'images du satellite METEOSAT 2 à été effectuée par M. Boulifa et al. [49], en utilisant un modèle analytique basé sur le traitement d'images satellitaires et sur la résolution de l'équation du transfert radiatif. En effet, les satellites météorologiques en mesurant la lumière du soleil réfléchié par le système Terre - Atmosphère, offrent actuellement de nouvelles perspectives pour évaluer et cartographier le rayonnement solaire. Ainsi, les satellites géostationnaires METEOSAT offrent une résolution de 5000 Km^2 et balayent tout le disque terrestre en une demi heure.

Diverses études portant sur les applications des images satellitaires, ont permis d'estimer la composante globale du flux d'irradiation solaire avec une précision acceptable. Très brièvement, les modèles découlant de ces études mettent en jeu, soit les caractéristiques physiques du rayonnement solaire et de l'environnement terrestre, soit leurs propriétés statistiques. Parmi ces modèles, celui établi par C. Gautier, [50] (1980) en traitant les images satellitaires de haute résolution, semble être plus rigoureux et plus performants.

Le modèle utilisé dans ce travail, est initialement élaboré par C. Gautier (1980) qui a utilisé des images de haute résolution, a été adapté au traitement d'images de moindre résolution. Cette dernière est une des images B2 prises en ciel clair et collectées par le satellite METEOSAT 2 dans le canal visible ($0.4 - 1.1 \mu\text{m}$) pendant la période 1986 – 1987, (Fig. 1.27).

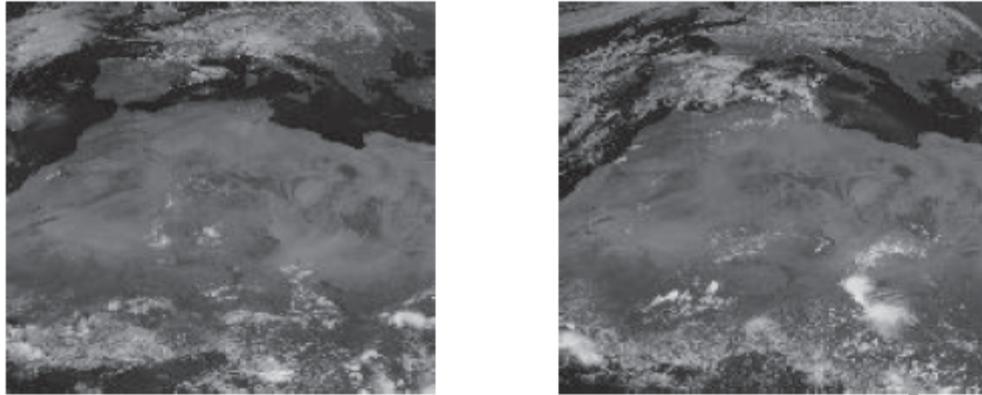


Fig. 1.27 : Images prises par METEOSAT 2 dans le canal visible. [49].

Le flux global d'irradiation solaire reçu sur une surface horizontale au niveau de la surface terrestre a été évalué à l'échelle de l'heure et de la journée à partir de ces images B2 en ciel clair. Le modèle dérivé de celui de C. Gautier est basé sur l'équation de transfert radiatif, qui tient compte des variations de la radiance solaire au cours de la journée (Fig. 1.28).

Les résultats obtenus en ciel clair, dans le visible avec des images METEOSAT, sont très satisfaisants. Ils ont été validés pour les sites de Bouzareah et d'Oran en transformant les radiances en irradiances et en comparant ces dernières aux données au sol. Il a été trouvé que les valeurs des radiances issues de la modélisation sont proches de celles mesurées au sol. Ces résultats montrent que l'approche ainsi développée est bien adaptée au traitement d'images de moindre résolution (Fig. 1.29).

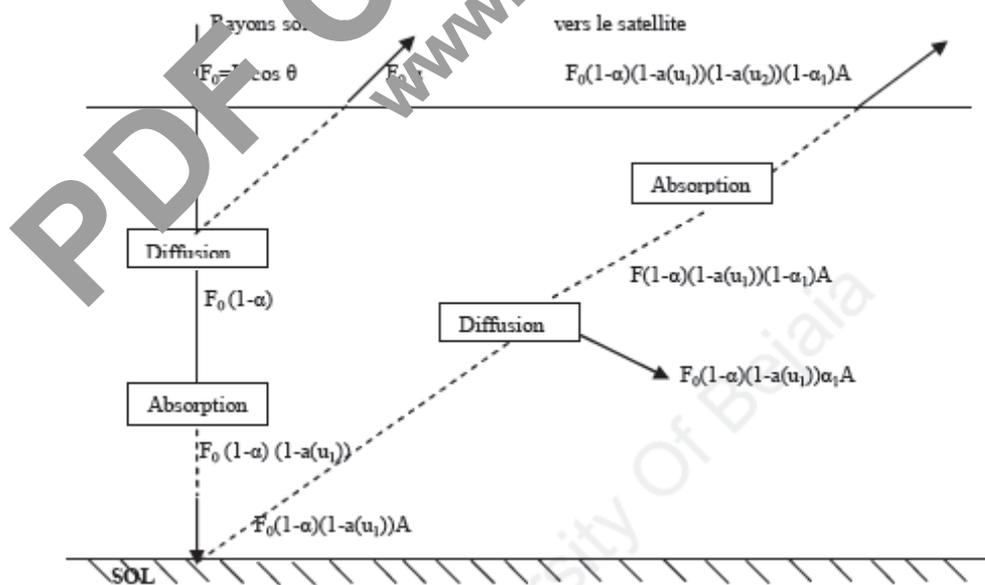


Fig. 1.28 : Echanges radiatifs en ciel clair dans le système Terre-atmosphère, [49].

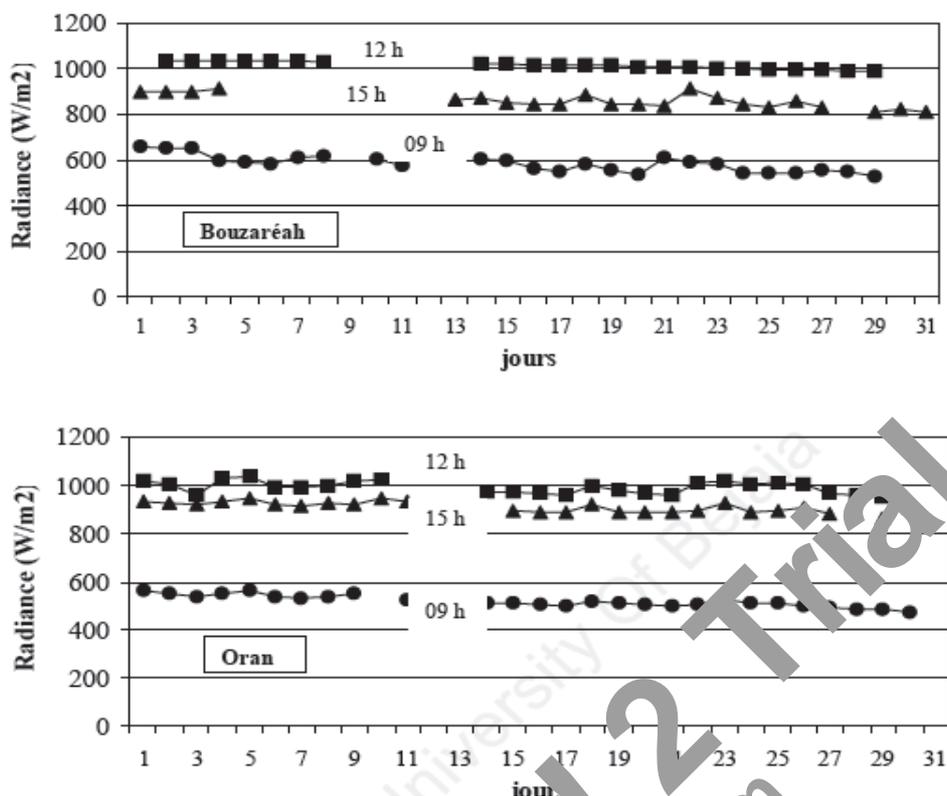


Fig. 1.29a : Radiances estimées au mois d'Avril 1980 pour Bouzaréah et Oran, [49].

Cependant, il existe certains écarts dus à la faible résolution des images et à leur cadence d'acquisition, ces écarts observés entre les deux types de radiance ne dépassant pas 10 %. En effet, les images B2 utilisées ici, sont prises toutes les trois heures et leur résolution est de 36 Km²/pixel. Pour réduire de tels écarts, il serait intéressant d'utiliser des images METEOSAT de nouvelles générations, car celles-ci sont collectées tous les quarts d'heures avec une meilleure résolution. De plus, l'extension de cette approche aux situations de ciel couvert, pourrait être envisagée à condition de prendre en compte l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire par les masses nuageuses.

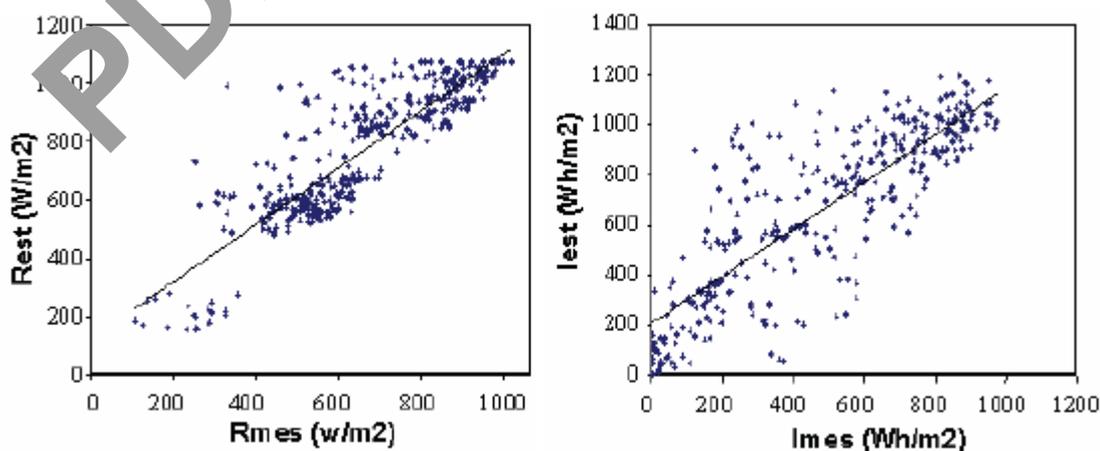


Fig. 1.29b : Radiances (R) et Irradiances (I) mesurées au sol et estimées à partir des images METEOSAT, [49].

L'évaluation du rayonnement solaire global horaire à partir des images de METEOSAT est un travail traité par A. Mefti et al. [51]. Ils ont utilisé l'approche satellitaire basée sur la classification de couverture de nuage. Récemment, une approche statistique basée sur les mesures solaires au sol était utilisée pour générer les séquences du rayonnement solaire global horaire dans chaque endroit de l'Algérie et pour différentes inclinaisons des sondes solaires. Une autre manière de produire des données pour les applications de l'énergie solaire consiste au traitement des images satellites.

Depuis 1980 jusqu'à ce jour, différentes méthodes satellitaires donnant raisonnablement une bonne évaluation du flux de rayonnement solaire global sur une surface horizontale ont été rapportées dans la littérature. Ces méthodes sont principalement classifiées comme des approches statistiques et physiques.

Les approches statistiques consistent en la recherche des rapports empiriques ou des équations de régression entre les données satellitaires et les mesures au sol. Les approches physiques sont établies en exprimant l'équation de transfert du rayonnement dans l'environnement terrestre.

Comme exemple, Tapley, [52] a traité les images de GOES satellite en 1979, il a obtenu un modèle de rayonnement solaire représenté par trois équations de régression pour les ciels clairs, partiellement couverts, et obscurcis. En 1980, Gautier, [53] a analysé le bilan du rayonnement solaire dans le système terre atmosphère et a estimé l'intensité du rayonnement solaire pour les ciels clairs et nuageux en employant les deux images de GOES. En 1986, Cano et al. [54] ont construit un modèle statistique HELIOSAT consistant en une relation empirique entre les mesures au sol du rayonnement solaire global et de l'index de la couverture de nuage calculé à partir des images de METEOSAT. En 1987, Delorme et al. [55] ont installé leur modèle GISTEL (Gisement Solaire par Télédétection) par le traitement des images de METEOSAT. Ce modèle est essentiellement basé sur le calcul du coefficient de réflexion pour ciel clair, partiellement couvert et obscurcis et par la détermination d'un rapport entre l'index de clarté et de couverture de nuage. Malgré leur bonne performance, toutes ces approches impliquent des calculs complexes et exigent un grand nombre de données expérimentales pour la validation de données estimées.

Selon le modèle utilisé, les évaluations du flux d'irradiation solaire global sont habituellement exprimées quotidiennement. Ils sont en bon accord avec les mesures au sol correspondantes, puisque leur erreur d'évaluation moyenne est de 10 % à 20 %. L'évaluation des données du rayonnement solaire horaire des images satellites est assez précise autour de 12 h UTC, mais l'erreur d'évaluation moyenne peut excéder 40 % pour des petites valeurs de l'élévation du soleil. Cette erreur a pu être réduite, si la variabilité horaire du rayonnement solaire est prise en considération dans le modèle.

Pour ces conditions, un modèle comprenant les variations de l'indice de clarté contre la couverture de nuage et l'élévation du soleil est présenté dans l'étude, [51]. Ce modèle, appelé SICIC (Solar Irradiation from Cloud Image Classification) qui signifie irradiation solaire par classification d'image de nuage, est dérivé des mêmes principes généraux que ceux régis les modèles statistiques. Pour compenser le manque des mesures du rayonnement solaire en Algérie, 25 stations météorologiques françaises, produisant de telles données en permanence, sont considérées pour la conception de SICIC. La performance de ce modèle sera alors comparée à celle de GISTEL. Appliqué aux images de METEOSAT, SICIC produit des données de rayonnement solaire global horaire et journalière sur une surface horizontale pour la France et l'Algérie.

Le modèle SICIC est établi par METEOSAT des images visibles de haute résolution de traitement, et mesure le flux du rayonnement solaire de la terre ressemblé dans divers endroits de la France pendant la période de 1994/1995. Pour chaque endroit et chaque classe, l'indice de clarté est alors calculé et les niveaux gris de pixels des images visibles de METEOSAT sont couverts en indice de couverture de nuage, partiellement couvert, et obscurcis (Fig. 1.30).

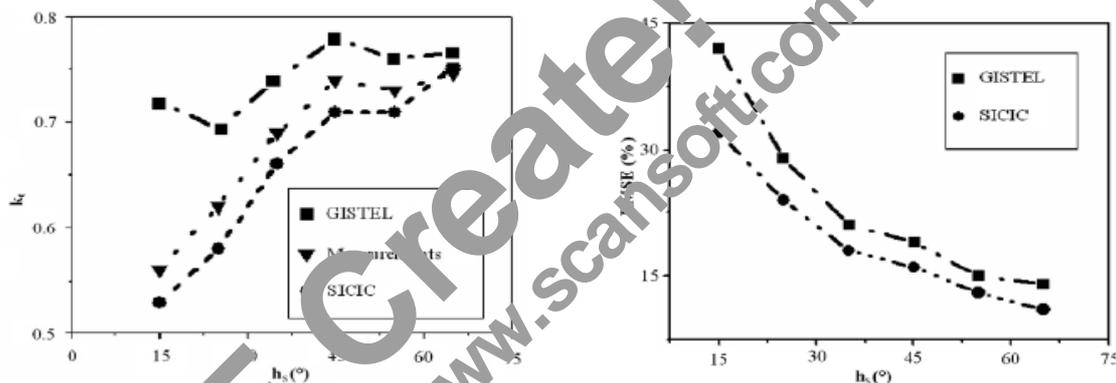


Fig. 1.30 : Valeurs horaires de l'indice de clarté (K_t) et variations de l'erreur relative quadratique moyenne (RMSE) en fonction de l'élévation du soleil (h_s), [51].

Trois équations de régression liant les indices de clarté et de couverture de nuage sont obtenus pour les trois catégories de ciel. Dans ces équations, les paramètres de SICIC (les coefficients de régression et tous les seuils) changent contre l'angle d'élévation solaire. SICIC rapporte une bonne évaluation du flux d'irradiation solaire global horaire pour chaque endroit montré dans les images de METEOSAT. Ainsi, ce modèle est comparé au modèle GISTEL, qui est un modèle régi par les mêmes hypothèses comme SICIC, mais différant par l'invariabilité de ses paramètres dans le temps, SICIC est trouvé plus précis que GISTEL, (Fig. 1.31).

Les données solaires sont estimées avec une erreur RMSE variant de 32 % à 12 % pour SICIC et de 44% à 14% pour GISTEL quand l'angle d'élévation du soleil augmente de 15° à 75°.

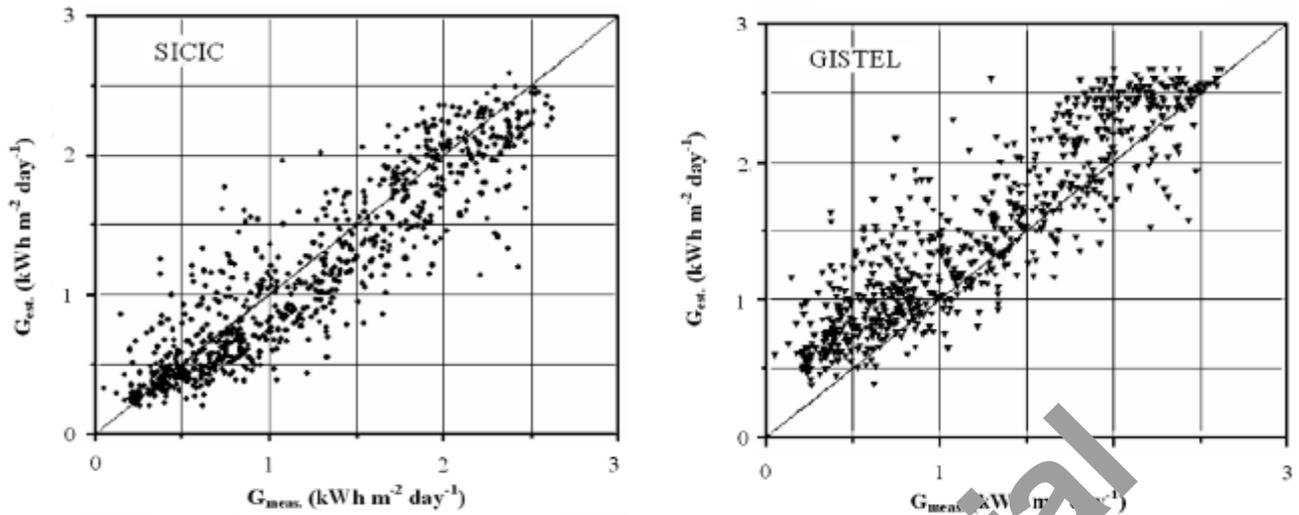


Fig. 1.31 : Comparaison des valeurs des flux d'irradiation globale estimés et mesurés en utilisant SICIC et GISTEL respectivement, [51].

A la balance quotidienne, SICIC est trouvé également plus efficace que GISTEL, il a été d'une manière satisfaisante de s'appliquer en d'autres endroits de la France et de l'Algérie (Tableau 1.7). Les essais faits sur des images METEOSAT, Wefax et D2 prouvent que ce modèle peut être facilement prolongé à d'autres types d'images satellites (Fig. 1.32).

Il est à noter que, la capacité de SICIC de rapporter des bonnes évaluations des données solaires horaires, particulièrement à des petits angles d'élevation du soleil, qui en résulte de l'utilisation de deux seuils et les coefficients de régression qui varient avec le temps. Un des avantages de ce modèle, est sa polyvalence motivée par son insensibilité à la diversité du climat pour la France et l'Algérie. En conséquence, la bonne précision des données solaires produites par SICIC le fait bien adapté à la conception des systèmes de conversion d'énergie solaire pour tous endroit représenté dans ces images. Un autre avantage de SICIC, est sa capacité de remplacer le réseau météorologique et produire des données solaires dans n'importe quel endroit où aucune mesure n'est exécutée.

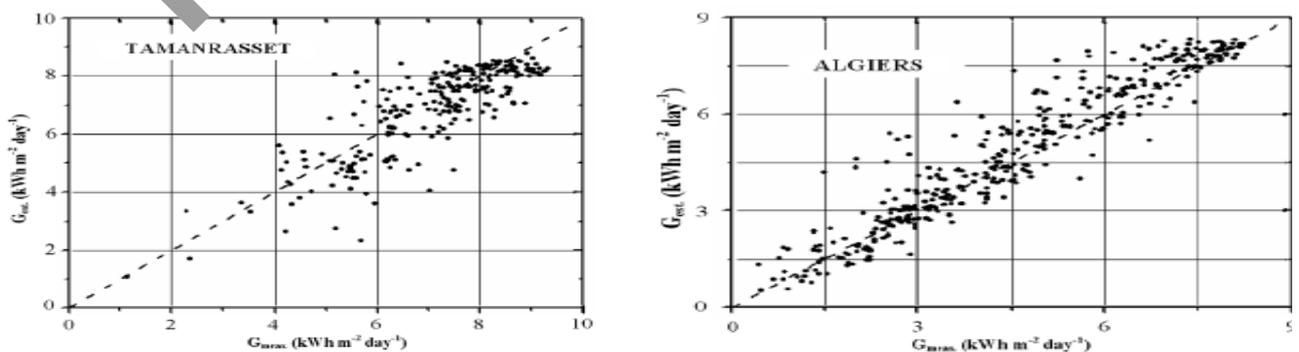


Fig. 1.32 : Comparaison des valeurs des flux d'irradiation globale estimés et mesurés en utilisant SICIC pour Tamanrasset et Alger aux images B2 de METEOSAT, [51].

Dans des travaux précédents le flux d'irradiation solaire global horaire a été simulé pour l'usage des surfaces inclinées en utilisant des analyses statistiques des données mesurées au sol. La méthodologie utilisée dans ce travail, se compose des transformations que l'on peut employer pour accomplir la transition des données du rayonnement solaire global horaires produites par ce modèle d'une surface horizontale à une surface inclinée.

	1994						1995			
	July	August	September	October	November	December	February	March	May	June
<i>(a) RMSE (%)</i>										
SICIC	9.2	11.2	15.2	16.7	27.7	24.8	19.3	14.6	10.3	10.2
GISTEL	12.5	13.4	17.9	20.3	30.7	28.8	24.4	17.2	11.1	11.2
<i>(b) C</i>										
SICIC	0.93	0.93	0.94	0.93	0.89	0.94	0.94	0.94	0.97	0.94
GISTEL	0.90	0.91	0.92	0.91	0.88	0.93	0.93	0.94	0.94	0.93
<i>(c) BE (%)</i>										
SICIC	0.9	2	-0.2	5	12	19	2	4	0.6	2
GISTEL	1	3	-7	-11	-18	-14	-14	-8	-2	-0.5

Tableau 1.7 : Erreur relative quadratique moyenne (RMSE), Coefficient de corrélation (C), et Erreur moyenne (MBE) obtenues pour le flux de radiation global journalier par traitement des images Wefax de METEOSAT en utilisant SICIC et GISTEL, [51].

1.8-CONCLUSION :

Le présent chapitre est consacré à la connaissance de l'évaluation du potentiel énergétique solaire à travers l'Algérie. On a examiné une variété d'articles sur l'estimation du gisement solaire de l'Algérie. L'étude dresse des différents modèles de calcul utilisés pour l'estimation du gisement solaire et donne le niveau de réalisation d'une description réaliste du gisement solaire en Algérie.

Quelques travaux ont traité la situation du potentiel énergétique solaire pour toute la surface du territoire en vue de parvenir à l'établissement des atlas solaires, tandis que la majorité des études ont mis l'accent seulement sur des sites dispersés donnant des résultats spécifiques à ces sites. Ces études sont basées essentiellement sur l'utilisation des modèles de calcul empiriques et semi empiriques utilisant les données météorologiques et radio métriques rassemblées dans les stations de l'ONM telles que, la durée d'insolation, la fraction d'ensoleillement, la nébulosité totale, l'état de ciel, les composantes directe, diffuse et global, l'Albédo du sol. Quelques méthodes d'estimation du rayonnement solaire disponible au sol à partir des images de satellites ont été aussi proposées et analysées par des chercheurs. L'avantage du traitement des images numériques de satellites devient donc certains dans la mesure où il apporte dans la connaissance du rayonnement global en donnant à la fois, une meilleure résolution temporelle et une meilleure résolution géographique.

On constate que les résultats obtenus sur le sujet de l'évaluation du potentiel énergétique solaire sont encore insuffisants et certains endroits situés loin des stations de mesure ne sont pas bien connus jusqu'à nos jours.

On souligne ici que :

- vu la plus grande superficie de l'Algérie, les stations de mesure sont encore éloignées et peu denses, certains endroits du pays leurs potentiels énergétiques solaires s'avèrent mal connus.
- les études effectuées sur le gisement solaire pour l'Algérie sont encore moins nombreux et ne touchant pas la quasi totalité de la superficie du territoire. Ces études sont moins denses.
- l'utilisation des images satellitaires pour la description du gisement solaire en Algérie est un moyen qu'on ne doit pas l'ignorer et le négliger. Les travaux sur ce sujet sont encore rares concernant l'Algérie.
- à travers les études examinées, l'existence d'un écart d'incertitudes remarquable entre les calculs théoriques et les mesures expérimentales qui mène dans certains cas à des résultats peu réalistes et peu probables sur le potentiel énergétique solaire.

On peut dire enfin que, même si la connaissance du gisement solaire en Algérie n'est pas bien totale et réaliste, des études microclimatiques sur ce gisement s'avèrent nécessaires et indispensables avant toute installation d'un système énergétique solaire, afin d'affiner le choix final et optimal de l'endroit d'installation.

1.9- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

[1] M.CAPPELLEUX «Atlas solaire de l'Algérie, en 3 Tomes». Office des Publications universitaires, Alger, (1987).

[2] A. MEFTI, M. Y. BOUROUBI et H. MIMOUNI, «Evaluation du potentiel énergétique solaire» Bulletin des énergies renouvelables n°2 décembre 2002.

[3] A. ATTAF, A. ADANE, S. AMEUR et M. LAGHROUCHE, «Conception et réalisation d'un système de mesuré d'insolation» International Conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).

[4] S. BENLAHMIDI, N. MOUMMI, A. MOUMMI, K. AOUES, N. CHOUCANE et A. BRIMA, «Contribution à la réalisation d'un logiciel de simulation des performances des systèmes solaires»

International Conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).

[5] A.MOUMMI, N. HAMANI, N. MOUMMI, et Z. MOKHTARI, «Estimation du rayonnement solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra» 8^{ème} Séminaire Internationale sur la physique énergétique (2006) SIPE'8, Bechar (Algérie).

[6] M.BOUBEKRI et A. SHAKER, «Etude et simulation de rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine » International Conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).

[7] C.ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulation de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidentes sur un capteur plan pour la ville de Tlemcen en Algérie» Rev. Ener. Ren. Vol.6 (2003) pp. 69 – 76.

[8] A.BAIG, P. AKHTER and A. MUFTI, «A novel approach to estimate the clear day global radiation» Renewable Energy vol.1, N°1; pp 119-123 (1991).

[9] EL.H..AROUDAM, M. EL HAMMOUTI and H. FWBAKHE, «Determination of correlations of solar measured in Tetouan» Renewable Energy vol.21, 4-5 pp. 473-476 (1992).

[10] A. MECHAGRANE, M. CHAOUI ROUAÏ and J. BURET BAHRAOUI, «Modèle d'Estimation de l'irradiation solaire globale d'une surface horizontale au sol à partir des images satellitaires» Journal de physique III, vol.3, issue 5, Mai (1993), pp. 1005 – 1019.

[11] M. KOUSSA et B. BOUEN, « Application d'un simple modèle spectral pour quelques sites Algériens» International conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaïa, Algeria (2007).

[12] B.Y.H. Liu and R.L. JORDAN, «The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation». Solar Energy vol.4, pp 1-19, (1960).

[13] ZEROUAL, M.ANKRIM and A.J. WILKINSON, «The diffuse global correlation: Its Application to estimating solar radiation on tilted surface in Marrakech, Morocco», Renewable Energy vol.7 N° 1, pp. 1 - 13 (1996).

[14] M. M. HUSSAIN, «Estimation of Global and diffuse irradiation from sunshine duration and atmospheric water vapor content» Solar Energy vol.33, N°2, pp 217 – 220 , (1984).

- [15] M. KOUSSA et M. HADDADI et A. MALEK, «Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque» Revue des Energies Renouvelables vol.10, N° 1, Avril (2007).
- [16] BIRD and HULSTROM, «Direct insolation Models, Trans. ASME» Journal of Solar Energy Engineering vol.103, pp 182 – 192, (1982).
- [17] B. E. PSILOGLOU et al. «A new parameterization of the integral ozone transmittance». Solar Energy, vol.56, N° 6, pp 573 – 581, (1996).
- [18] RICHARD BIRD, «A simple model for direct normal and diffuse horizontal irradiance» Solar Energy, vol.32, N° 4, (1984).
- [19] B. LECKNER, «The spectral distribution of solar radiation at the Earth surface element of a model» Solar Energy, vol.29, N° 6, (1978).
- [20] C. FROHLICH and J. LONDON, «Revised instruction manual on radiation instruments and measurement» Publication N° 7 WMOTD N° 149, (1980).
- [21] Y. SAHNOUNE et M. CHEGAAR, «Effet de la durée du jour sur l'estimation de l'irradiation solaire en Algérie» International Conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [22] K. GAIRAA, S. BEN KACIALI et M. SFIRIR, «Estimation of horizontal diffuse solar radiation in Ghardaia site » International Conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [23] M. IQBAL, «An introduction to solar radiation» Academic Press, Canada, (1983).
- [24] A. JOHN TUFFUR, WILLIAM A. BECKMAN, «Solar Engineering of thermal processes». A Wiley Interscience Publication, second edition.
- [25] R. CHEHNI, E. MATAGNE et T. KERBACHE, « Etude et optimisation du rayonnement solaire dans les applications photovoltaïques» International Conference on Renewable Energies ICRE'07, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [26] M. CHIKH, A. MAAFI et A. MALEK, «Establishment d'un modèle mathématique pour la fraction diffuse de l'irradiation solaire en Algérie» Rev. Energie renouvelable : Chemss 2000, pp. 75 - 81.

- [27] J. M. BULGER, «The determination of hourly Insolation on Inclined plane using a diffuse irradiation model based on hourly measured global horizontal insolation» *Sola Energy*, vol.19, pp. 477 – 491, (1977).
- [28] M. IQBAL, «Prediction of hourly diffuse solar radiation from measured hourly global radiation on horizontal surface» *Solar Energy* vol. 24, pp. 491 - 503, (1980).
- [29] 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).
- [30] D. G. ERBS, S. A. KLEIN and J. A. DUFFIE, «Estimation of diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly average global radiation» *Solar Energy* vol.23, N° 3, pp. 293 – 302, (1982).
- [31] D. T. REINDEL, W. A. BECKMAN and J. A. DUFFIE, «Diffuse fraction correlation» *Solar Energy* vol.45, N°1, pp. 1-7, (1990).
- [32] Y. BOUHADDA et L. SERIR, «Contribution l'étude de trouble atmosphérique de linke sur le site de Ghardaïa» *Revue des Energies Renouvelables* vol.9, N°4, pp.277-284, (2006).
- [33] P. INEICHEN and R. PEREZ, «A new air mass independent formulation for the linke Turbidity coefficient» *Solar Energy*, vol.73, N°3, pp.151-157, (2002).
- [34] D. SAHEB-KOUSSA et M. BENHAMMEL, «Reconstitution du rayonnement solaire par ciel clair» *Revue des Energies Renouvelables* vol.9, N°2, pp.91 - 97, (2006).
- [35] BIRD and HULSTROM, «Direct insolation Modèles, Trans. ASME» *Journal of Solar Energy Engineering* vol.103, pp. 187 – 192, (1981).
- [36] S. HARROUNI et A. MAAFI, «Classification des éclaircissements solaires à l'aide de l'analyse Fractale» *Revue des Energies Renouvelables* vol.5, pp.107 - 122, (2002).
- [37] A. KHLEDDINE et K. BEN MAHAMMED, «Méthodologie de correction de rayonnement solaire» *Revue des Energies Renouvelables* vol.4, pp.79 - 87, (2001).
- [38] M. CHEGAAR, A. LAMRI et A. CHIBANI, «Estimation du rayonnement solaire global en utilisant les heures d'ensoleillement» *Revue des Energies Renouvelables physique énergétique*, pp. 7-11, (1998).
- [39] J. CANADA, "Global solar radiation in Pais Valencia using sunshine hours", *International Journal of Ambient Energy*, 4, p. 197, (1988).

- [40] A. MEFTI, M. Y. BOUROUBI et A. ADANE, «Génération de rayonnement solaire horaire pour les surfaces inclinées en utilisant la durée d'insolation moyenne mensuelle en Algérie» *Energy Conversion and Management* vol. 44, pp. 3125 – 3141, (2003)
- [41] A. ANGSTROM, «Solar and Terrestrial radiation» *Q J Roy Meteo Soc* vol. 50, pp. 121 – 125, (1924).
- [42] B. Y. H. Lu and R. C. JORMAN, «Daily Insolation on surfaces titled toward equator» *ASHRAF J*, vol.3 pp. 53 – 59, (1961).
- [43] J. E. HAY, «Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces» *Solar Energy*, vol. 23, pp. 301 - 307, (1979).
- [44] F. YOUCEF-ETTOUMI, A. MEFTI, A. ADANE and M. Y. BOUROUBI, «Statistical analysis of solar measurements in Algeria using beta distribution» *Renewable Energy* vol. 26, N° 1, pp. 47 – 67, (2002).
- [45] T. M. KLUCHER, «Evaluation of models to predict insolation on titled surfaces» *Solar Energy*, vol. 23, pp. 111 - 117, (1979).
- [46] O. AISSANI, S. SEGHIRI, S. TOURTA, ET M. LABBI, «Estimation de la réflectance bidirectionnelle par télédétection » *International Conference on Renewable Energies ICRE'07*, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [47] C. GUEYMARD, «A Simple Model of the atmospheric radiative transfer of sunshine, Algorithms and performance assessment, SmartS 2» A research institute of the university.
- [48] CH. PERRIN ET P. RICHAMBAUT, «Estimation des ressources énergétiques en France» *Cahier, A.F.E.D.F.S*, n°1, (1975).
- [49] M. BOULFA, A. ADANE, A. MEFTI et S. AMEUR, «Estimation de flux global d'irradiation solaire à partir du bilan radiatif en ciel clair et par traitement d'image météoat» *International Conference on Renewable Energies ICRE'07*, November 25 – 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [50] C. GAUTIER, G. DIAK and S. MASSE, «A Simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data» *J. Appl. Meteorol.* Vol.19, pp. 1005 – 1012, (1980).
- [51] A. MEFTI, A. ADANE et M. Y. BOUROUBI, «Satellite approach based on cloud cover classification : Estimation of Hourly global solar radiation from météoat images» *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 652 - 659, (2008).

[52] J. D. TAPLEY, «Estimating incident solar radiation at the earth's surface from Geostationary satellite data», J. Appl, meteorol. Vol.18, pp. 1172 - 1181, (1979).

[53] C. GAUTIER, G. DIAK and S. MASSE, «A Simple physical model to estimate incident solar radiation at the surface from GOES satellite data» J. Appl. Meteorol. Vol.19, pp. 1005 – 1012, (1980).

[54] D. CANO, J. M. MONGET, M. ALBUISSON, H. GUILLARD, N. REGAS and L. WALD, «A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data» Solar Energy vol.37, pp. 31-3(1986).

[55] C. DELORME and N. GROS, «About Gistel, discussion on the method of estimation of Solar Energy potential with the help of meteosat digital images» Veille climatique vol.18, pp. 24-30, (1987).

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 2

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 2

SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES

2.1-INTRODUCTION :

Les ressources énergétiques solaires à tout point du territoire Algérien sont énormes et inépuisables mais qui ne sont pas exploitées convenablement. Pour une meilleure exploitation dans les différentes filières des applications solaires, il fallait au premier lieu commencer par les études de recherche approfondies sur les systèmes énergétiques solaires concernant leurs dimensionnements et performances selon les potentiels énergétiques disponibles.

L'implantation d'un système énergétique solaire pour satisfaire un besoin précis en un lieu donné ne doit se faire qu'après avoir estimé la productivité du système en fonction du gisement solaire local c'est-à-dire de l'énergie solaire réellement disponible et non en considérant seulement les jours de beau temps.

Pour dimensionner un système énergétique solaire pour une région quelconque, de définir le profil des fluctuations annuelles du rayonnement solaire en intensité, et en qualité, à partir d'une étude statistique sur plusieurs années. On peut admettre que les rendements des dispositifs de captation et éventuellement les fluctuations de la demande de l'utilisateur varient avec les conditions météorologiques du lieu et de l'instant.

On s'intéresse dans ce chapitre à l'étude de la situation des applications de l'énergie solaire en Algérie, on veut connaître les différentes filières proposées et traitées par les travaux de recherche sur les systèmes énergétiques solaires, ainsi que les résultats obtenus vis-à-vis de l'utilisation de cette énergie gratuite et prometteuse. L'étude de l'amélioration des performances de ces systèmes énergétiques solaires est un but essentiel qu'on cherche à l'accomplir.

Dans ce chapitre qui est consacré à la structuration des systèmes énergétiques solaires et par quelques définitions des besoins spécifiques de ces systèmes en vue d'une meilleure connaissance et plus complète du gisement solaire. Ensuite, différents capteurs solaires sont cités, ainsi que les niveaux de température lors de l'emploi de ces capteurs pour produire de l'énergie thermique ou mécanique. L'orientation d'un capteur est aussi traitée, pour capter le maximum d'énergie solaire où plusieurs cas d'orientations sont envisagés.

Enfin, quelques travaux de recherche effectués concernant l'alimentation des systèmes énergétiques solaires pour différentes applications telles que : le chauffage des locaux, le chauffage d'eau sanitaire, la distillation, le séchage, la climatisation et le froid, et les systèmes hybrides thermo-solaires.

2.2-SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES :

Un système énergétique solaire est mis en place en un lieu donné pour fournir de l'énergie sous une forme ou une autre, par exemple : thermique, mécanique, ou électrique (Fig. 2.1). D'une façon générale sa structure est comme suit :

- Entrée, qui comprend le gisement solaire local, l'environnement géographique et climatique, et éventuellement une ou plusieurs sources énergétiques d'appoint.
- Transfert, qui comprend des dispositifs de captation du rayonnement solaire avec ou sans concentration, des éléments de conversion d'énergie d'une forme en une autre, et des organes de pilotage et de régulation.
- Sortie, qui comprend des dispositifs de distribution pour une ou plusieurs utilisations.
- Stockage, qui comprend des éléments tels que des réservoirs d'eau, des masses calorifiques à chaleur sensible ou latente, des batteries électriques ...etc.

Aussi, des capteurs de mesure, de contrôle, et de sécurité doivent équiper les divers éléments.

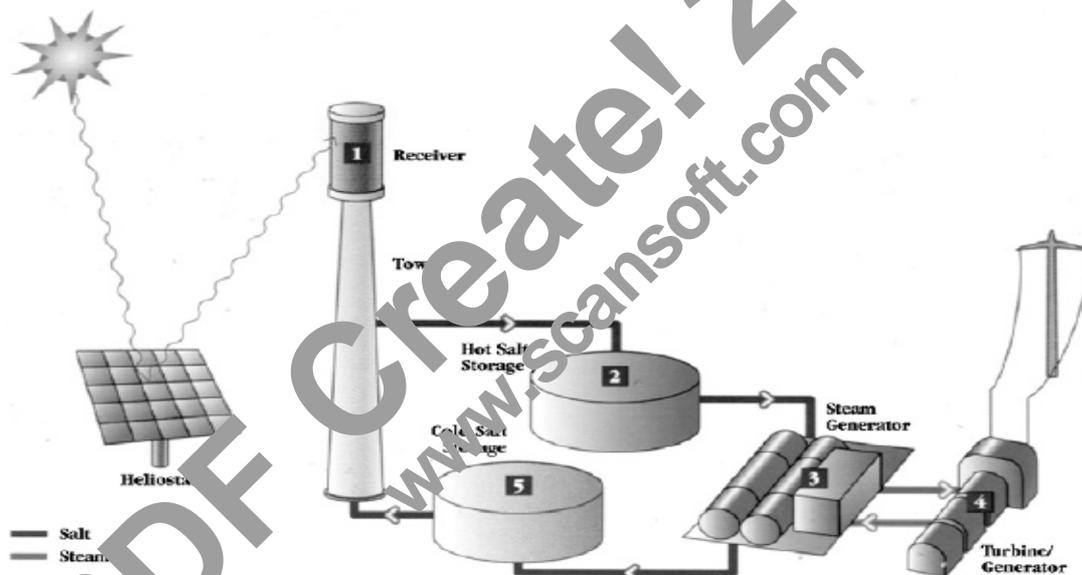


Fig. 2.1 Schématisation d'un système énergétique solaire pour générer de l'énergie électrique.

2.3-SPÉCIFICITÉ DES SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES :

Pour une meilleure connaissance et complète du gisement solaire, on souligne ici les besoins spécifiques des systèmes énergétiques solaires :

- Seuil d'éclairement : au-dessus d'une valeur d'éclairement, le système ne fonctionne pas, donc une part de l'énergie journalière reçue peut ne pas être utilisable. Ce seuil peut aussi varier avec les conditions extérieures, température et vent par exemple.
- Seuil de durée pour un éclairement suffisant : les systèmes photovoltaïques convertissent le rayonnement solaire en énergie électrique, si le seuil d'éclairement est dépassé et quelle que soit la

durée pendant laquelle cet éclairement suffisant se maintient. Par contre les systèmes thermodynamiques, à cause de l'inertie thermique du convertisseur, ne convertiront l'énergie du rayonnement en énergie mécanique que si l'éclairement a dépassé le seuil pendant une durée continue suffisante. Cette durée minimale est fonction de l'éclairement.

- Exigences de la concentration : les systèmes dont le convertisseur exige des températures supérieures à 150 °C doivent être munis de dispositifs de concentration, miroirs ou lentilles, mais il ne faut pas oublier que ces dispositifs ne fonctionnent qu'avec le rayonnement direct.

Pour leur implantation et dimensionnement, il faut connaître les fluctuations du direct au pas de temps le plus fin possible. Les exigences sont d'autant plus grandes que les températures envisagées sont élevées.

- Stockage : quelle que soit la nature de l'énergie stockée, il existe une capacité maximale de stockage (la contrainte principale étant d'ordre économique) et parfois une capacité minimale (batterie électrique par exemple). Le stock diminue plus ou moins, même si on ne l'utilise pas, et il faut dans tous les cas le reconstituer quand la puissance disponible est supérieure à la demande.

Le stockage est fait pour concilier une demande et une production qui ont chacune leurs fluctuations propres.

- Environnement : il ne faut pas oublier l'environnement dans l'implantation d'un système énergétique solaire. Le rendement des éléments de captation dépend des conditions météorologiques, un abaissement de température ambiante augmentera le rendement d'un capteur photovoltaïque, et au contraire, diminuera celui d'un capteur plan thermique. Un système thermodynamique exige la présence d'une source froide.

Dans les systèmes à concentration les miroirs aptes à suivre le soleil ne sont utilisables que si la vitesse du vent est inférieure à un seuil, sinon le miroir est mis en position de survie, hors service.

2.4-UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE ET DIFFERENTES SORTES DES CAPTEURS SOLAIRES :

L'énergie solaire peut être utilisée soit par conversion directe en électricité dans des dispositifs photovoltaïques. Cette solution est en théorie séduisante, soit transformée en chaleur à des niveaux de température plus ou moins élevés peut être utilisée, où encore transformée en énergie mécanique grâce à un cycle thermodynamique, (Fig. 2.2) :

- Basses températures 40 à 90 °C : On emploie des capteurs plans fixes et de conception simple utilisant le rayonnement global (direct + diffus).

Ces éléments ont reçu un début de développement industriel et sont destinés principalement au chauffage des locaux par intégration, en général, à l'espace architectural.

- Moyennes températures 100 à 300°C : ce sont des capteurs plans fixes, mais équipés de dispositifs plus sophistiqués (surfaces sélectives, structures anti-rayonnement global).

A ces niveaux de température, il est possible d'envisager une conversion mécanique pour des puissances produites d'environ 100 KW.

Pour les seuils supérieurs de température, des capteurs cylindriques sont également utilisés.

- Hautes températures à 800°C et plus : des capteurs à concentration, mobiles, plus élaborés et utilisant le rayonnement direct seulement sont employés. Ils permettent une production en masse de chaleur à haute température facilitant le transport, la distribution et la conversion efficace en énergie mécanique, en particulier pour la production des puissances électriques importantes, seule cette technique est envisageable dans l'immédiat.

Cette conversion peut s'effectuer, soit par l'intermédiaire d'un cycle thermodynamique dit "long" comprenant une chaudière, une turbine, un condenseur...etc. soit, grâce à un cycle thermodynamique dit "court" utilisant un moteur à air chaud de type Stirling ou Philips installé directement au foyer de concentration des rayons lumineux (Fig.2.3).

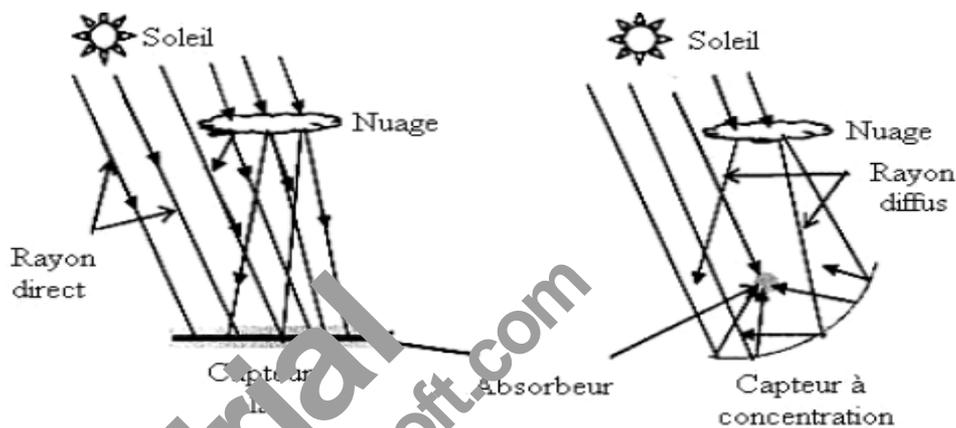


Fig. 2.2 : Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire.

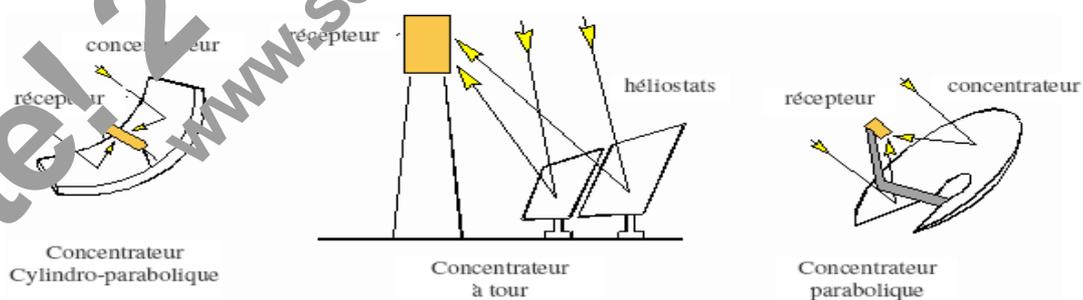


Fig. 2.3 : Schéma de principe des filières solaires à concentration.

2.5-ORIENTATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE :

L'orientation d'un capteur quelconque est définie par deux angles γ et α :

- La hauteur du capteur γ :

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du capteur γ varie entre -90° et $+90^\circ$:

$\gamma > 0$ le plan est tourné vers le haut.

$\gamma < 0$ le plan est tourné vers le bas.

$\gamma = +90^\circ$ le plan est horizontal tourné vers le haut.

$\gamma = -90^\circ$ le plan est horizontal tourné vers le bas.

$\gamma = 0$ le plan est vertical.

- L'azimut du capteur α :

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du Sud.

L'azimut du capteur α varie entre -90° et $+90^\circ$:

$\alpha > 0$ le plan est orienté vers l'Ouest.

$\alpha < 0$ le plan est orienté vers l'Est.

$\alpha = 0$ le plan est orienté vers le Sud.

$\alpha = -90^\circ$ le plan est orienté vers l'Est.

$\alpha = +90^\circ$ le plan est orienté vers l'Ouest.

- L'inclinaison du capteur β :

L'inclinaison du capteur β est un angle donné par la relation $\beta = 90 - \gamma$ par rapport au plan horizontal.

L'énergie reçue par un capteur dépend de son orientation β et de son angle d'incidence i , ainsi que de sa configuration (Fig. 2.4). Parmi les capteurs recevant une énergie instantanée, journalière et annuelle élevée, on trouve :

- Le capteur TEL : est un capteur orienté face au Sud (hémisphère Nord) et incliné d'un angle $\beta = \varphi$ (latitude) par rapport à l'horizontal. Ces coordonnées sont : $\alpha = 0$, $\gamma = 90 - \varphi$ et $i = 0$ uniquement aux équinoxes et à 12h P.M.
- Le capteur à un axe : est un capteur qui suit le soleil en azimut et il est généralement incliné d'un angle $\beta = \varphi$ (latitude) par rapport à l'horizontal. Ces coordonnées sont : $\alpha = a$ (azimut du soleil), $\gamma = 90 - \varphi$ et $i = 0$ uniquement aux équinoxes.
- Le capteur à deux axes : est un capteur qui suit le soleil en site et en azimut et il est généralement perpendiculaire aux rayons solaires à chaque instant de la journée. Ces coordonnées sont : $\alpha = a$ (azimut du soleil), $\gamma = h$ (hauteur du soleil) et $i = 0$.

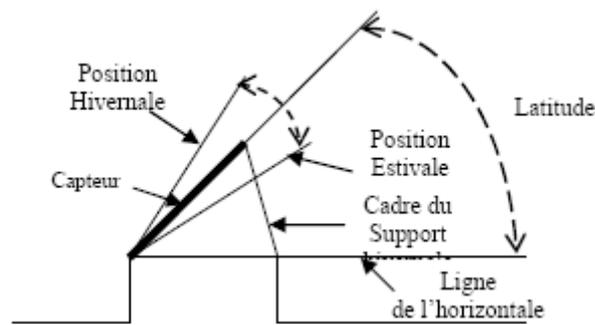


Fig. 2.4 : Installation d'un capteur solaire.

2.6-TRAVAUX DE RECHERCHES SUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES SOLAIRES :

La modélisation et le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires nécessitent la connaissance d'une part, des paramètres météorologiques dont la température, la vitesse du vent, l'humidité relative et d'autre part, des différentes composantes du rayonnement solaire.

A l'heure actuelle, des différentes études et recherches se réalisent sur ce sujet pour différents endroits de l'Algérie, de nombreux prototypes des systèmes solaires ont été conçus, étudiés et examinés afin d'améliorer leur rendement, efficacité, et performances dans toutes les domaines d'application de l'énergie solaire.

2.6.1-TRAVAUX SUR LE CHAUFFAGE SOLAIRE :

Un Travail a été effectué par E. Achouyab et B. Bahar [1] concernant la conception et la réalisation d'un chauffe-eau solaire destiné aux régions où l'eau ne gèle pas. Ce modèle de chauffe-eau solaire permet des économies de 70 à 80% de la facture énergétique en moyenne annuelle et possédant deux modes de fonctionnement (mode saison solaire SS et mode saison froide SF) et offre la possibilité d'utiliser directement de l'eau chaude dans le cas de l'ensoleillement faible. A titre d'application, les auteurs ont réalisé un prototype de ce système (Fig. 2.5). Le chauffe-eau ainsi étudié, présente l'avantage d'avoir une conception simple ainsi qu'une totale autonomie énergétique pendant la production de l'eau chaude. Le prototype, réalisé sans vitrage, est expérimenté et donne de bons résultats.

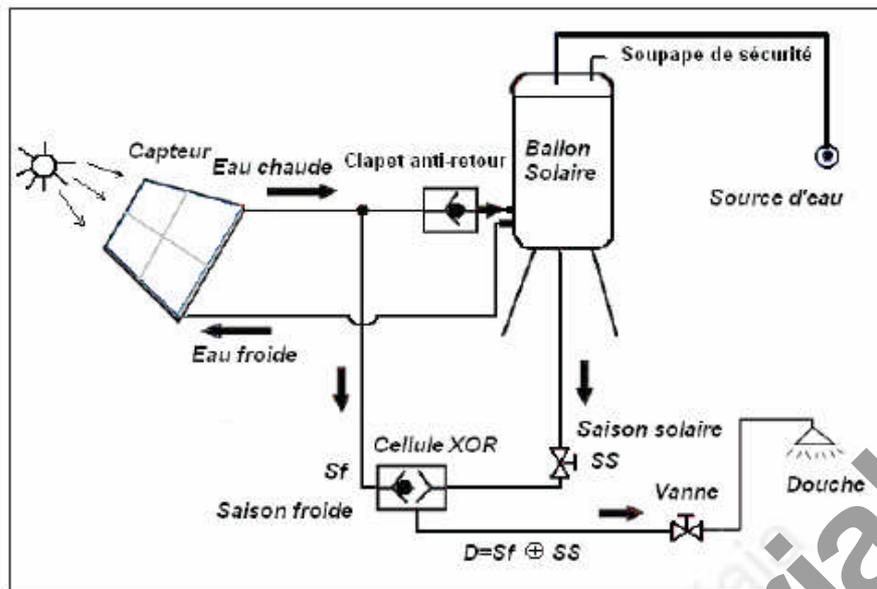


Fig. 2.5 : Schéma de principe du chauffe-eau solaire, [1].

Ce chauffe-eau solaire peut donner de meilleurs résultats, avec un stockage et isolation renforcée c'est-à-dire en appliquant une totale étanchéité.

Le capteur solaire de ce système et le calcul de sa productivité et rendement sont bien étudiés (Fig. 2.6). Dans une prochaine étude, les auteurs projettent l'objectif d'évaluer, à travers son rendement, sa productivité, et les matériaux isolants, les performances de ce produit.

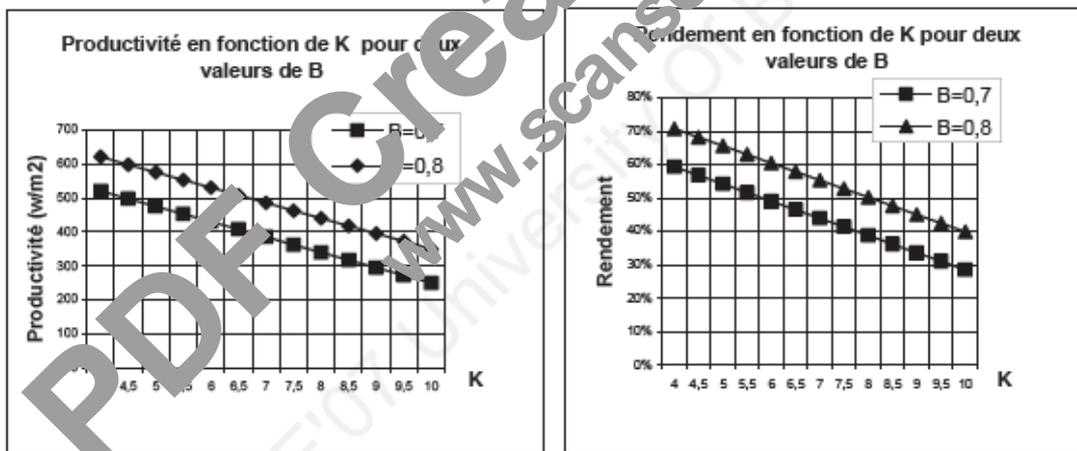


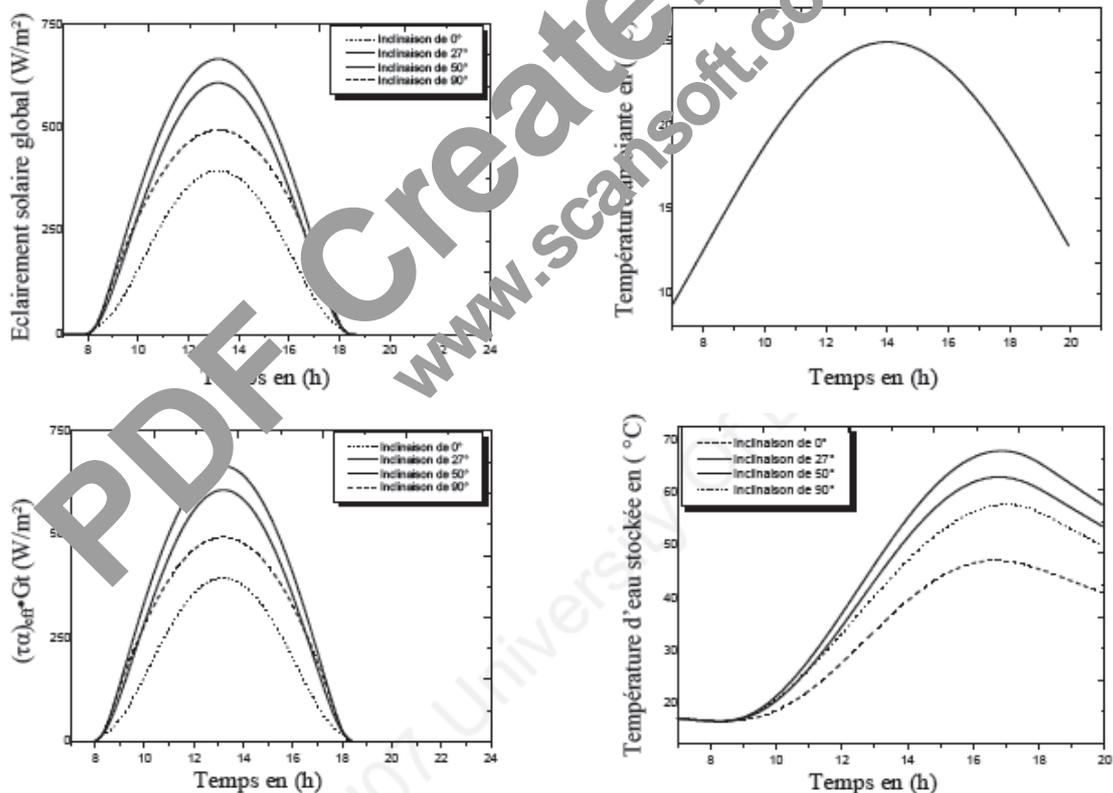
Fig. 2.6 : Productivité et rendement en fonction de K (coefficient des pertes du capteur) et B (coefficient de gain du capteur), [1].

Si l'on veut porter à bien le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire, il faut d'abord commencer d'améliorer le rendement thermique du capteur, c'est pourquoi M. Ben Hammou et al. [2] ont fait un travail qui est l'objet d'une étude d'un système photo thermique de production et de stockage d'eau chaude sanitaire.

L'étude a pour objectif de déterminer les performances thermiques d'un chauffe-eau solaire en fonction de l'inclinaison du capteur dans la période hivernale où la demande sur l'eau chaude sanitaire est souvent élevée.

Pour montrer l'influence de l'inclinaison du capteur solaire sur les performances thermiques du chauffe-eau solaire en hivers où le rayonnement solaire est faible et la température ambiante est plus basse, les auteurs ont étudié la variation au fil du temps du rayonnement solaire global en fonction de l'inclinaison du capteur, la variation de la température ambiante journalière en fonction du temps, la variation au fil du temps de la partie du rayonnement réellement absorbée par la plaque en fonction de l'inclinaison du capteur, l'évolution temporelle de la température d'eau stockée dans la cuve selon l'inclinaison du capteur, et la variation de la chaleur utile apportée par le fluide à la cuve en fonction de l'inclinaison du capteur, et cela pour le mois de Janvier (Figure 2.5).

Les résultats obtenus montrent que l'angle d'inclinaison du capteur a une grande influence sur le rendement thermique du capteur et une inclinaison égale à la latitude du lieu donne un bon rendement.



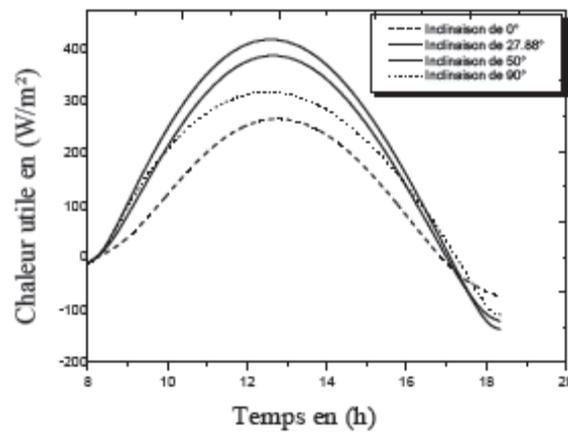


Fig. 2.7 : L'influence de l'inclinaison du capteur solaire sur les performances thermiques du chauffe-eau dans la période hivernale, [2].

Un projet pilote (MEDA) a été lancé en 2004, premier de son genre en Algérie qui concerne l'installation d'un chauffe-eau collectif utilisant l'énergie solaire au siège de l'ex RD Sonelgaz équipé d'un système de télé contrôle, permet la mesure à distance du rendement énergétique et vérifie les performances et le bon fonctionnement de l'installation à tout moment, et donc l'obtention des résultats garantis, dont est l'objectif d'un travail effectué par F. Bouhired et al. [3]. Ce type de système nécessite un ensemble de matériels de mesure reliés à une centrale d'acquisition de données raccordée au réseau téléphonique (Fig. 2.8).

Le calcul des performances mensuelles de l'installation de production d'eau chaude solaire est fait par le logiciel Solo développé par CSTC France, qui est un logiciel de dimensionnement et un moyen pour garantir les résultats solaires, ils ont calculé les taux de couverture solaire en fonction des mois, l'irradiation des capteurs pour le site d'Alger et les apports solaires mensuels (Fig. 2.9).

Les résultats de dimensionnement sont très satisfaisants avec un taux de couverture solaire de 78,2% et une productivité annuelle de 506 KWh/m²/an. Un bon dimensionnement doit conduire à satisfaire 50 à 70% des besoins en eau chaude.

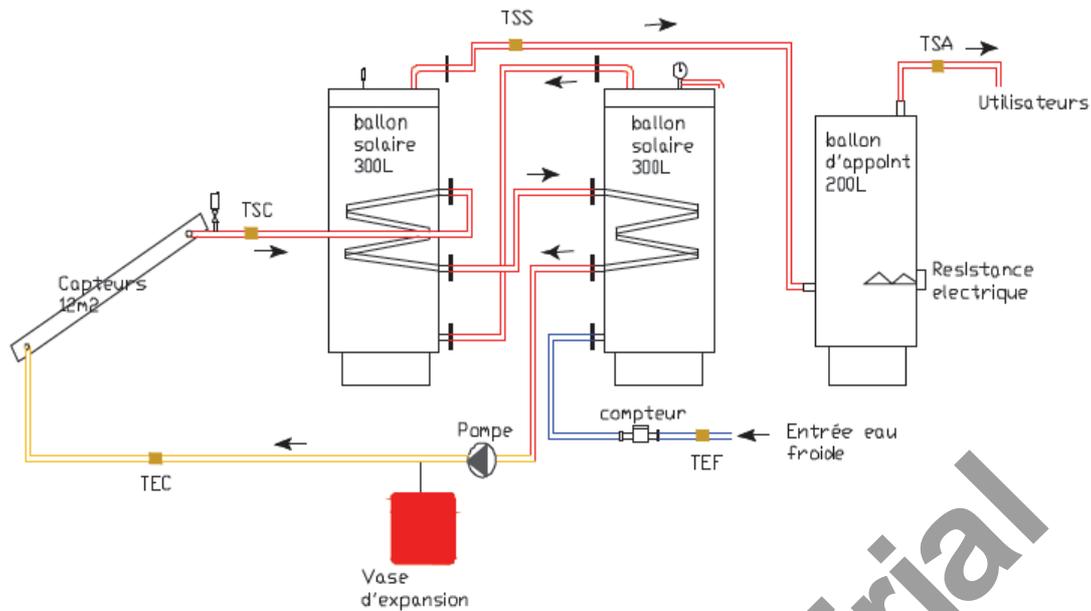


Fig. 2.8 : Schéma hydraulique de l'installation [3].

Le suivi des performances des installations solaires impose la mise en place d'équipements spécifiques de mesure et de télé suivi qui permettent de garantir les résultats solaires et de promouvoir des bonnes installations.

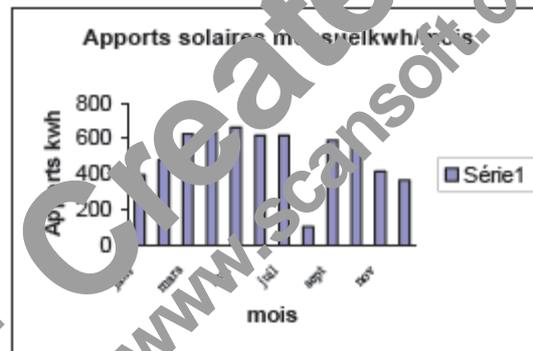


Fig. 2.9 : Résultat de dimensionnement (Apports solaires mensuels), [3].

Une évaluation d'un système solaire combiné dans le cas d'une famille de cinq personnes a été réalisée par R. Kharchi et al. [4]. Le système solaire combiné est une installation qui fournit à la fois de l'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage des locaux, dite aussi "combi système" (Fig. 2.10).

La surface chauffée par le plancher solaire direct est de 100 m² avec un niveau d'isolation moyen.

Le système solaire ainsi étudié est composé de :

- capteurs solaires, sont souvent disposés en toiture.
- une dalle (PSD) dans laquelle circule le fluide caloporteur chauffé par les capteurs.
- un ballon de stockage, qui gère le chauffage du bâtiment et la production d'eau chaude sanitaire.

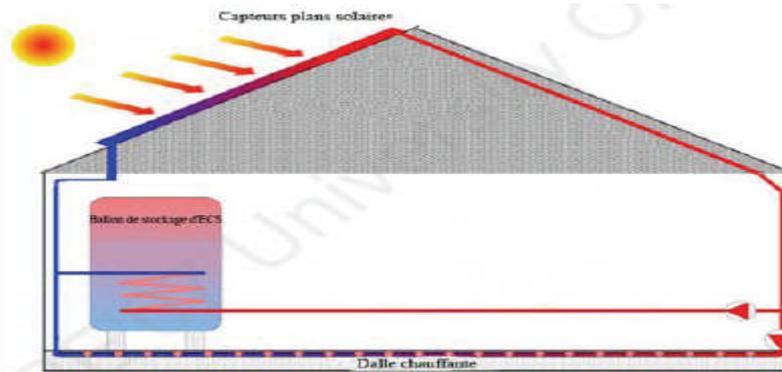


Fig. 2.10 : Schéma d'une installation de chauffage solaire par le plancher et l'eau chaude sanitaire, [4].

Les auteurs ont effectué la formulation mathématique de :

- la demande mensuelle de chauffage.
- la demande mensuelle d' ECS.
- l'estimation de l'irradiation solaire mensuelle pour l'année 2005.
- le calcul de la puissance solaire disponible.

L'estimation de la surface de captation pour le système, c'est-à-dire le calcul de la surface de captation pour l'eau chaude sanitaire et pour le plancher solaire direct. Ainsi, le chauffage solaire et l'appoint doivent être conçus ensemble afin d'assurer le rendement global du système et s'il y a la possibilité de chauffer une piscine en été l'installation sera rentabilisée davantage.

R. Sellami et al. [5] ont effectué une étude qui a pour objet d'évaluer les performances d'un chauffe-eau solaire dans un cas d'utilisation réel.

Pour cela, un système de chauffe-eau solaire raccordé en série à un appoint électrique (Cumulus) a été installé pour alimenter une cantine assurant 60 repas par jour en eau chaude sanitaire (ECS) pour divers utilisations (Fig. 2.11).

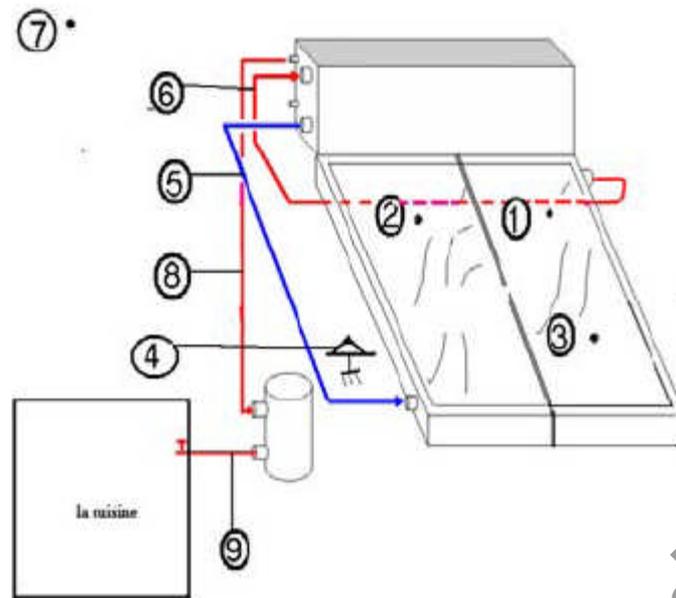


Fig. 2.11: Schéma du dispositif étudié et positions des points dont la température a été suivie, [5].

Les essais sont effectués sur un système à thermosiphon à ballon de stockage horizontal et un Cumulus pour étudier l'influence de l'appoint électrique séparé sur les performances du système et sur les économies d'énergie réalisées.

La consommation de l'eau chaude diminue lorsque la température de puisage augmente et l'appoint électrique joue un rôle décisif pour limiter la quantité d'eau chaude consommée (Fig. 2.12).

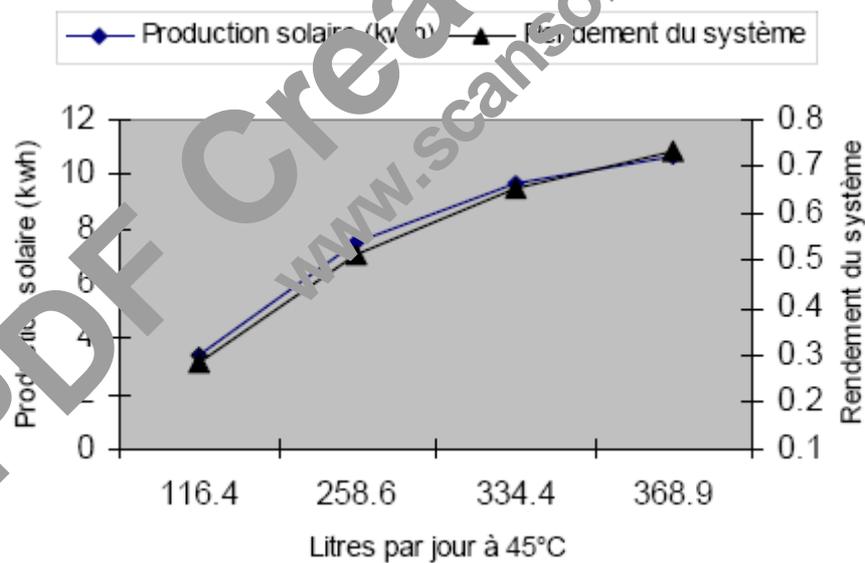


Fig. 2.12 : Evolution de la production solaire et du rendement du système en fonction de la consommation journalière en eau, [5].

2.6.2-TRAVAUX SUR LE SECHAGE SOLAIRE :

A. Boubghal et al. [6] sont intéressé à l'étude thermique d'un système solaire pour le séchage des produits agroalimentaires. Or, le séchage à basse température est un phénomène complexe, où

interviennent de nombreux autres événements qui ressortent de la thermodynamique et des transferts de chaleur et de masse.

Dans cette étude, le fluide séchant qui est l'air chauffé à travers la serre, sert d'une part à apporter l'énergie nécessaire à la vaporisation, et d'autre part à évacuer la vapeur d'eau sortant du produit (Fig. 2.13).

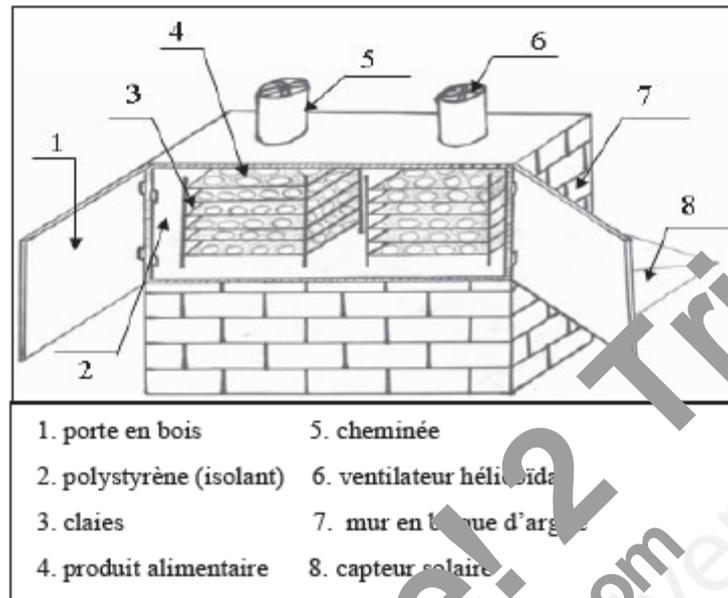


Fig. 2.13 : Schéma représentatif du séchoir solaire indirect, [6].

Un modèle mathématique simulant le fonctionnement du système de séchage a été élaboré ainsi que les résultats d'une étude numérique concernant l'effet de différents paramètres de la cinétique de séchage a été présenté. Il s'agit de l'étude de l'effet de l'ordre de claies sur la teneur d'eau du produit, l'effet du diamètre du produit, l'effet de la masse du produit, et de l'effet de la température de l'air chauffé à l'entrée de l'événement de séchage. Pour la résolution numérique, les auteurs ont utilisé la méthode des différences finies.

La progression de l'air chauffé en hauteur, c'est-à-dire son passage par plusieurs claies dans le séchoir, conduit à l'augmentation de la teneur en eau du produit de ces claies à cause de l'eau dégagée du produit sous forme de vapeur d'eau récupérée par l'air, ce qui diminue sa température et par conséquent, la chaleur apportée à ce produit. Pour ces motifs, il est nécessaire de bien choisir les paramètres pour avoir un séchage de tout le produit se trouvant dans le séchoir avec une optimisation du temps de séchage.

Enfin, les résultats obtenus montrent que le passage de l'air chauffé par plusieurs claies dans le séchoir, conduit à l'augmentation de la teneur en eau du produit (Fig.2.14). L'augmentation de la température de l'air de 50°C à 70°C a pour conséquence une réduction de 25% du temps de séchage. La diminution de la taille et de la masse du produit conduit à des vitesses de séchage plus élevées.

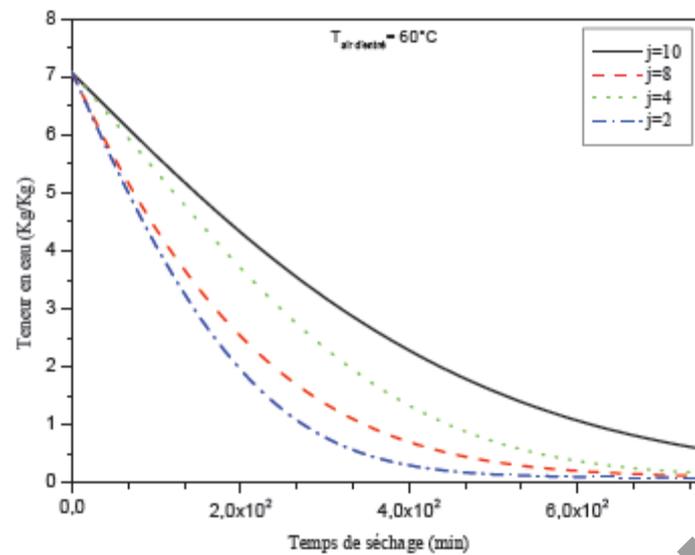


Fig. 2.14 : Effet de l'ordre des claies sur la teneur d'eau du produit, [6].

A. Idlimam et al. [7] ont établi une modélisation expérimentale et théorique de la cinétique de séchage par l'énergie solaire de la plante guérissante (*Zygophyllum gaetulum*).

La plante guérissante est séchée dans un séchoir indirect partiellement à couche mince, fonctionnant en convection forcée et muni d'une source auxiliaire d'énergie (Fig. 2.15).

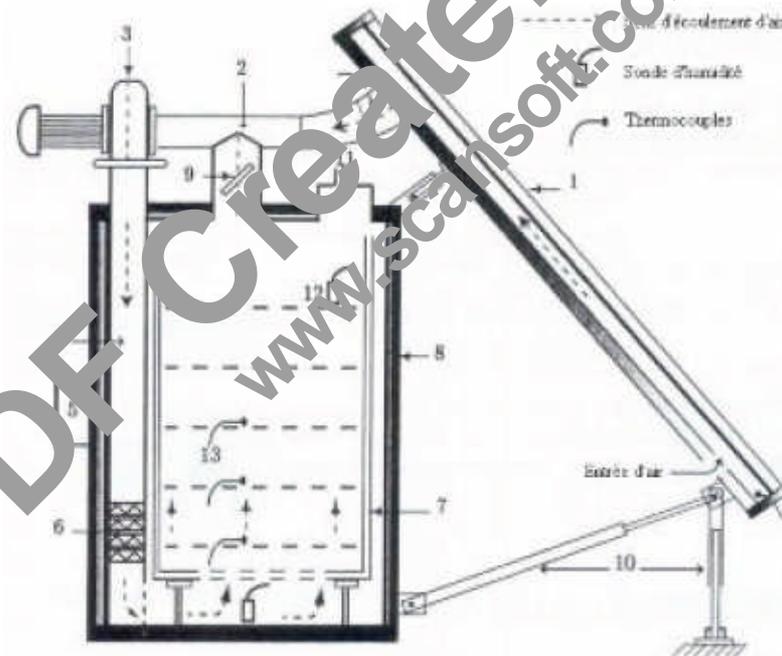


Fig. 2.15 : Coupe schématique du séchoir solaire indirect, [7].

Ce travail est axé sur l'étude de la cinétique de séchage en déterminant :

- les courbes de séchage pour différentes conditions de l'air.
- l'influence de la température et du débit d'air sur la cinétique de séchage.
- le modèle mathématique qui décrit le mieux les courbes de séchages obtenus.

Onze modèles mathématiques ont été utilisés pour la description des courbes de séchage. La vitesse de séchage est déterminée empiriquement à partir de la courbe caractéristique de séchage.

Parmi les modèles statistiques étudiés, le modèle de Midilli-Kucuk qui présente une bonne corrélation avec les données expérimentales obtenues. Les courbes de séchage ont montré l'existence de trois phases classiques. La température de l'air asséchant est le facteur principal qui influence la cinétique de séchage (Fig. 2.16).

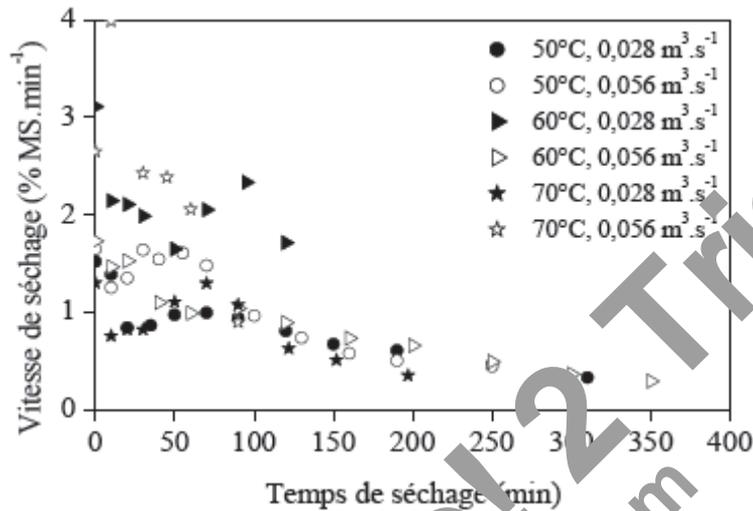


Fig. 2.16 : Evolution de la vitesse de séchage en fonction du temps pour différentes conditions de l'air asséchant [7].

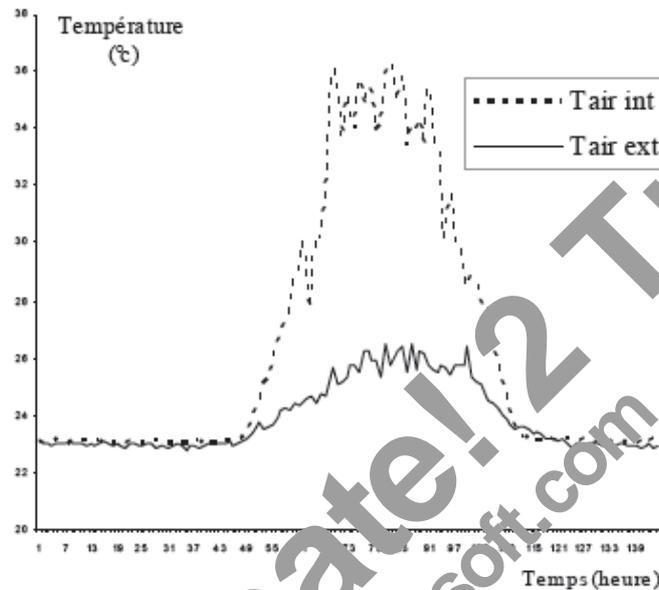
La méthode de Midilli-Kucuk est plus satisfaisante pour tracer les courbes de séchage de la plante médicinale.

Le séchoir expérimental qui a été étudié a été réalisé par S. Kherrou et al. [8], réalisé au sein de l'unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables de Ghardaïa (URAER), est un séchoir solaire direct type serre, composé de cinq vitres : deux latérales, par contre la troisième vitre est inclinée de 55° maximisant la capture de l'énergie solaire pendant la période froide, la quatrième vitre est inclinée de 15° permettant d'optimiser aussi la transmission du rayonnement en saison estivale, alors que la cinquième est inclinée de 35° à l'horizontale qui joue le rôle d'intermédiaire (Fig. 2.17).



Fig. 2.17 : Différentes inclinaisons des vitres du séchoir étudié, [8].

L'étude expérimentale a permis ensuite de tirer le bilan énergétique du séchoir et le calcul des différents paramètres comme le rayonnement solaire, les coefficients d'échanges intervenant dans le séchoir et les températures des différentes parois à savoir : la variation de la température de l'air extérieur et intérieur du séchoir, l'évolution de la température des absorbeurs, l'évolution de la température des différents surfaces du séchoir et l'évolution de la température de la surface interne des vitres (Fig. 2.18).

**Fig. 2.18 :** Variation de la température de l'air extérieur et de l'air intérieur du séchoir, [8].

S. Oudjedi et al. [9] ont étudié une simulation numérique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage de tomate. C'est un insolateur à simple passe entre l'absorbeur et la vitre (Fig. 2.19). Une analyse des échanges thermiques instationnaires dans un tel capteur est présentée. Cette analyse est basée sur l'établissement des équations de transfert et la modélisation des coefficients d'échanges thermiques. Il est bien montré qu'en régime quasi stationnaire, les équations de bilan thermique des composants du capteur cascaded en une équation différentielle ordinaire de premier ordre, qui régit le comportement thermique du capteur. La solution de cette équation différentielle est écrite sous la forme d'une expression explicite de la température locale du fluide caloporteur en fonction du flux solaire variable dans le temps.

L'influence de divers paramètres tels que : la température d'entrée du fluide, la vitesse et la hauteur du canal d'écoulement d'air sur les performances thermiques du capteur solaire plan à air sont aussi étudiées.

La capacité de production du séchoir solaire peut être estimée par le coefficient d'efficacité qui est défini par le masse à sécher par unité de temps. Ce coefficient dépend des paramètres aérothermiques et de la masse totale contenue dans le séchoir.

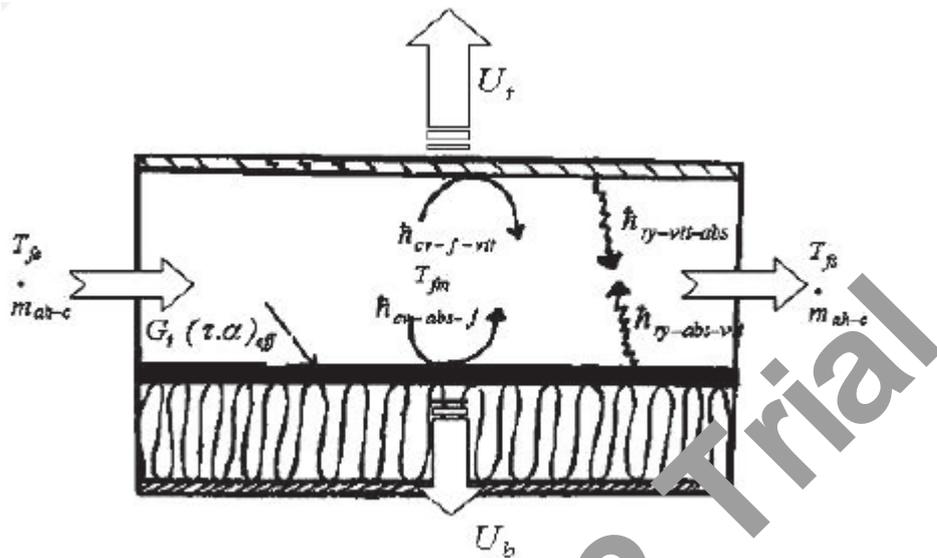


Fig. 2.19 : Vue schématique du capteur solaire à air, [9].

L'étude des performances d'un séchoir solaire par Saadi Ali-Youcef, [10], qui a examiné les variations du coefficient d'efficacité en fonction des paramètres sur les quels il peut agir. Avant tout, l'auteur a évoqué brièvement le modèle théorique élaboré qui régit le code de calcul permettant de simuler le comportement de la chaîne énergétique capteur-séchoir fonctionnant en convection forcée (Fig. 2.20).

Le séchage de la pomme de terre par utilisation comme source de chaleur un capteur plan à air, relié à l'armoire de séchage, souvent utilisée dans les pays où l'ensoleillement est important.

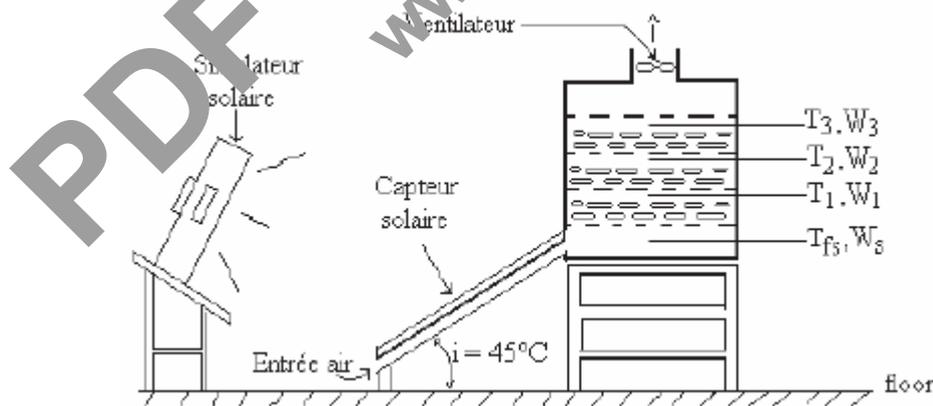


Fig. 2.20 : Schéma du dispositif expérimental utilisé, [10].

Deux modèles mathématiques sont développés séparément, le premier permet la détermination des performances du capteur solaire à air et le second, pour lequel les données d'entrée de l'air sont celles de sortie du capteur, permet de déterminer les cinétiques de séchage.

Les variations du coefficient d'efficacité et du temps de séchage total en fonction du débit, et l'influences de l'intensité de flux solaire global sur l'évolution de la température de l'air à la sortie du capteur solaire plan, de la quantité de produit à sécher sur l'évolution du coefficient d'efficacité et du temps de séchage total en fonction du débit d'air massique, et de la quantité de produit à sécher sur l'évolution du coefficient d'efficacité et du temps de séchage total en fonction de l'intensité de flux solaire global incident sont tous étudiés et analysés par l'auteur (Fig. 2.21).

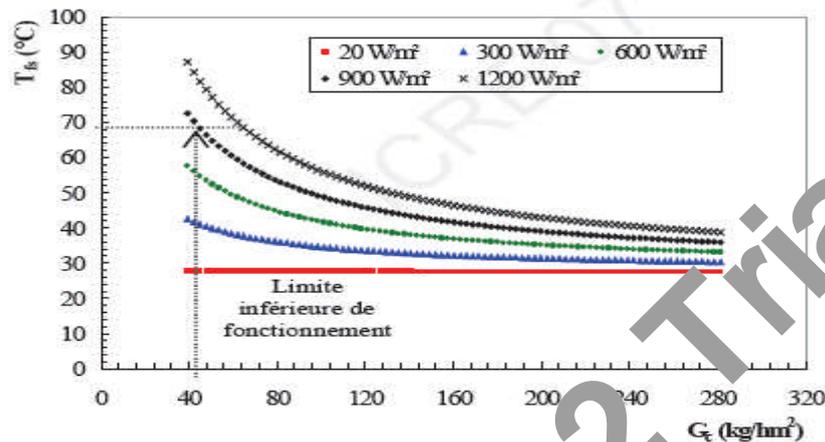


Fig. 2.21 : Influence de l'intensité de flux sur l'évolution de la température de l'air à la sortie du capteur plan en fonction du débit d'air massique [10].

Il a constaté qu'à flux solaire global fixé, le coefficient d'efficacité croît avec le débit d'air, mais tend vers une limite d'autant plus élevée que la masse introduite au départ est importante.

Le travail de W. Taane et al. [11] porte sur l'étude expérimentale pour l'évaluation des performances d'un capteur plan à air à circulation naturelle destiné au séchage solaire.

Afin d'améliorer le transfert thermique, des chicanes de forme rectangulaire soudées sur la plaque qui recouvre l'isolant, augmentant ainsi la surface d'échange (Fig. 2.22).

Les résultats expérimentaux trouvés sont plus que satisfaisants en terme de température de l'air à la sortie du capteur, de l'ordre de 70° C, elle dépasse de loin la température requise pour le séchage des produits agricoles aux quels ce capteur plan est destiné. Ceci est dû au fait que le temps de séjour de l'air dans le capteur est important à cause des faibles débits (convection naturelle) et à la présence des chicanes.



Fig. 2.22 : Disposition et géométrie des chicanes, [11].

Le rendement du capteur a été de l'ordre de 22%, considéré comme acceptable en comparaison aux travaux antérieurs (Fig. 2.23).

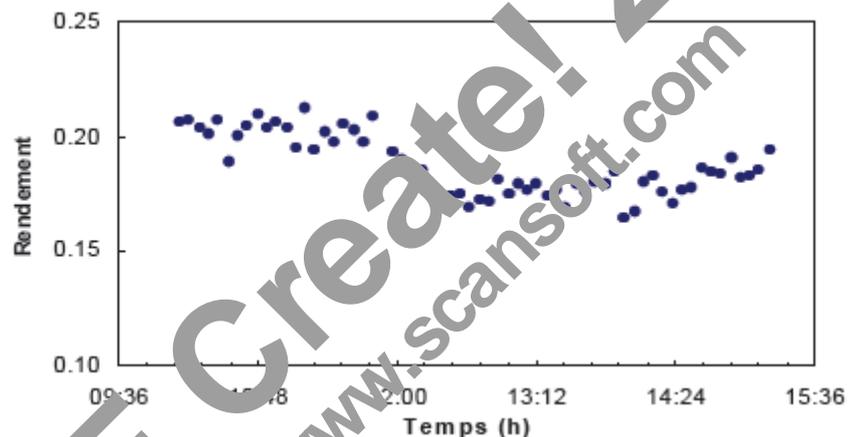


Fig. 2.23 : Evolution du rendement du capteur en fonction du temps, [11].

Les résultats ont permis d'envisager d'autres applications pour ce capteur, autre que le séchage tels que : le chauffage, le froid, la climatisation,etc.

2.6.3-TRAVAUX SUR LA DISTILLATION SOLAIRE :

Afin d'améliorer le rendement des distillateurs, plusieurs études théoriques et expérimentales ont été abordées. Parmi ces études, le travail qui a été effectué par M. Ben Hammou et al. [12]. Il consiste à mener une étude thermique d'un distillateur solaire muni d'un condenseur couplé à un capteur. Cette configuration du système a été choisie pour la raison que la séparation du condenseur de l'évaporateur permet de maintenir ce dernier chaud pour longtemps, le capteur va fournir au distillateur de l'eau déjà préchauffée, chose qui permet d'élever la température de l'eau à distiller et par conséquent, la production en eau distillée augmente (Fig. 2.24). L'étude a été faite en 2007.

L'amélioration du rendement sera la conséquence de l'augmentation du taux d'évaporation ou de condensation.

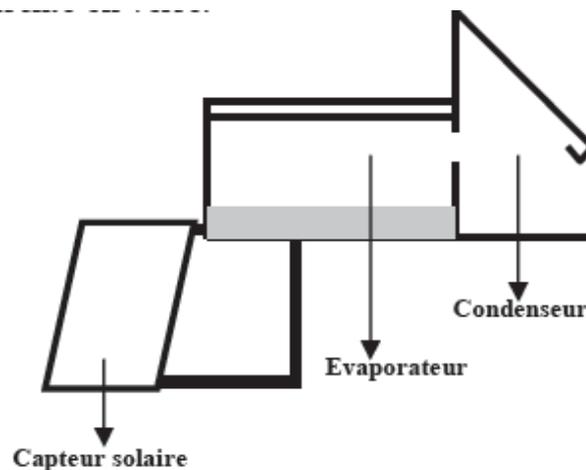


Fig. 2.24 : Schéma représentatif du système, [12].

La modélisation du système a conduit au bilan énergétique de ce système au niveau de chaque élément constituant, c'est-à-dire au niveau de la saumure, du vitrage intérieur, du vitrage extérieur, et au niveau du condenseur.

Pour améliorer la rentabilité du distillateur solaire en matière de quantité d'eau distillée produite, les auteurs ont fait coupler le distillateur avec un capteur plan solaire.

L'étude a été menée sur deux voies, la première a pour objectif d'optimiser les paramètres du capteur plan, à savoir, l'inclinaison et l'orientation. Ils ont abouti au résultat que par suite de la déclinaison du soleil, pour le site d'Aggar et dans la période hivernale, il convient d'incliner le capteur avec un angle de 60° dans la direction du sud. Quant à l'effet du capteur sur la production du distillateur, ils ont constaté que d'une part, la quantité du distillat a été très importante, qui peut dépasser les cinq litres. D'autre part, la production du distillateur dépend fortement de l'inclinaison et de l'orientation du capteur (Fig. 2.25).

M. Boukar et al. [13] ont examiné les résultats préliminaires obtenus lors des tests effectués sur un distillateur vertical à deux bassins dans des conditions réelles du milieu saharien durant la période allant d'Avril au Juillet 2006.

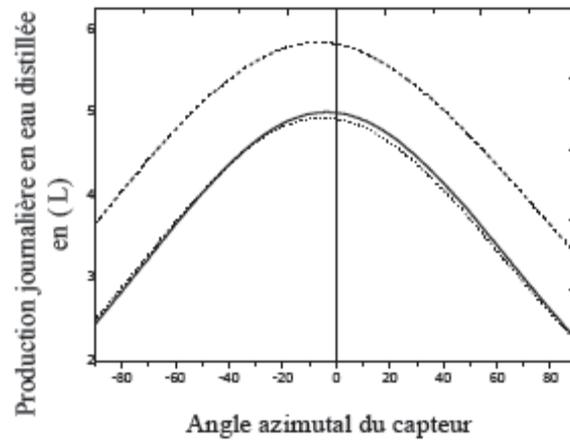


Fig. 2.25 : Variation de la production journalière du distillateur en fonction de l'orientation du capteur pour une inclinaison de 60° , [12].

Le distillateur solaire étudié, est composé de deux bassins, un bassin supérieur et un bassin inférieur. Le prototype réalisé peut pivoter autour d'un axe vertical permettant l'orientation du distillateur de l'Est à l'Ouest (Fig. 2.26).

Les auteurs ont étudié les évolutions de la température des bassins, de la température des vitres, du rayonnement, de la température ambiante et de la productivité horaire par le temps (eau distillée collectée).

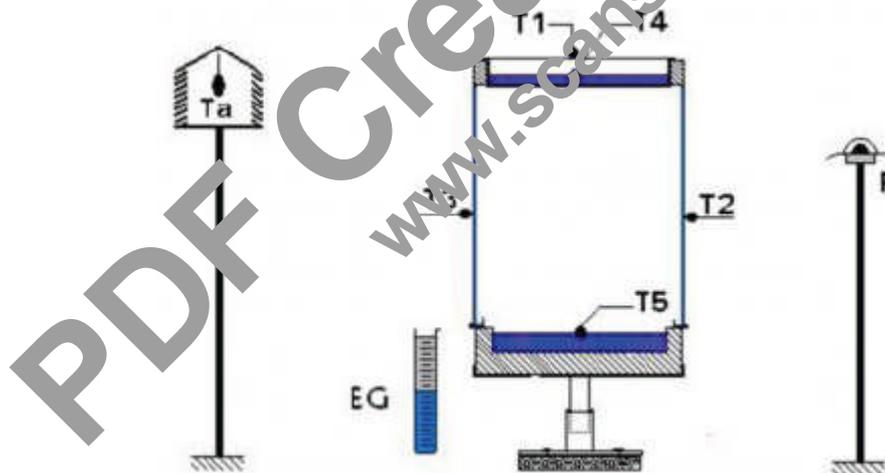


Fig. 2.26 : Montage expérimental du distillateur et emplacement des différents instruments de mesure, [13].

Le bassin supérieur est exposé directement au rayonnement solaire, la quantité d'eau saumâtre contenue dans les marches est faible, c'est pour cette raison que la vaporisation se produit rapidement, mais le temps de séjour de l'eau dans les marches est très court, le bassin n'est pas isolé thermiquement. Le bassin inférieur avec sa contenance en eau, une quantité de chaleur est

emmagasinée, c'est pour cette raison que la température de l'eau saumâtre après le coucher du soleil est supérieure à la température de l'eau saumâtre contenue dans le bassin supérieur (Fig.2.27).

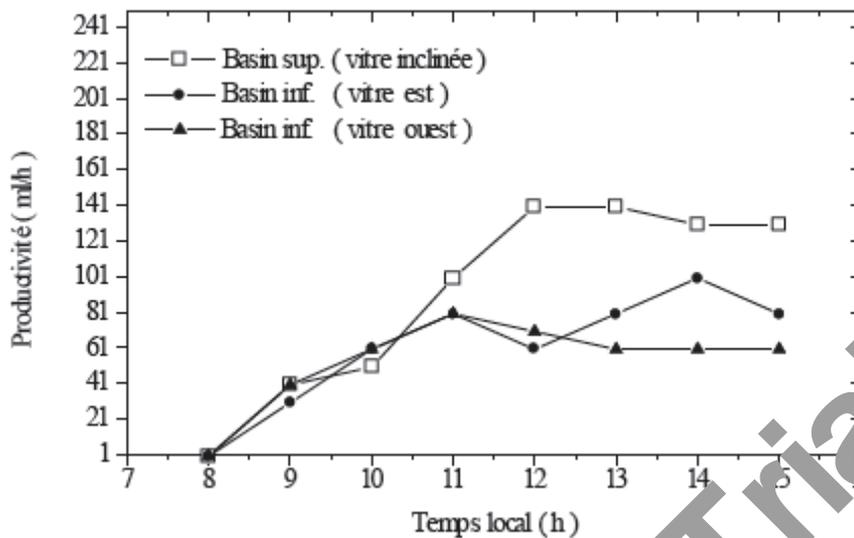


Fig. 2.27 : Evolution de la productivité horaire le 3 avril 2006, [13]

Pour améliorer le rendement du prototype, il faut faire l'isolation du bassin supérieur et tirer profit de rayonnement solaire par l'ajout des réflecteurs.

Le travail effectué par N. Boukerzaza et al. [14], consiste à déterminer la production d'un distillateur solaire. Ce travail est particulièrement attaché à l'étude de l'influence des paramètres externes tels que l'irradiation globale, la vitesse du vent, ainsi que la température ambiante et internes à savoir la température de l'eau, l'épaisseur de la masse d'eau ainsi que l'isolation thermique sur cette caractéristique. Cette étude a été menée sur un distillateur solaire à effet de serre.

Ils ont étudié les variations de la production en fonction de la température de l'eau, de l'irradiation globale, de la température ambiante, de l'écart de température, de la vitesse du vent et en fonction de la température ambiante pour différentes vitesses du vent (Fig. 2.28).

L'analyse est basée sur les résultats numériques de la résolution des équations régissant les transferts de chaleur dans la saumure et dans la vitre du côté intérieur et extérieur.

De cette analyse émerge les principales conclusions suivantes :

- une augmentation de l'irradiation globale conduit à un accroissement de la production. Néanmoins, une trop grande puissance incidente peut produire l'effet inverse.

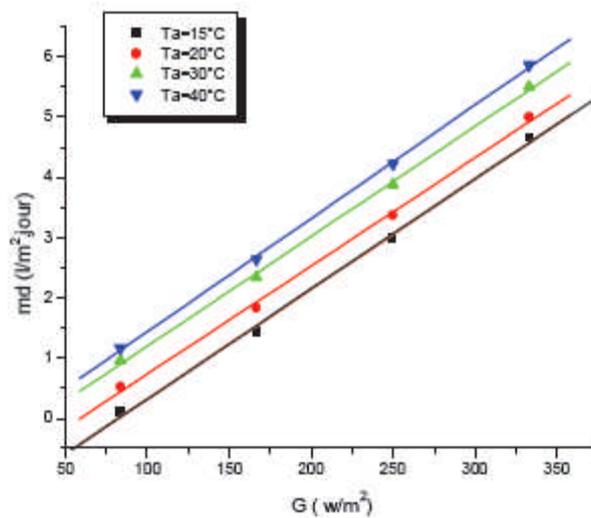


Fig. 2.28 : Variation de la production en fonction de l'irradiation globale pour différentes températures ambiantes, [14].

- la production augmente avec la température ambiante et avec la température de l'eau.
- aux fortes vitesses du vent, ce dernier aura un effet défavorable.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de ces paramètres sur la production du distillateur solaire. Pour améliorer la production, il faut minimiser les pertes thermiques vers l'ambiance par renforcement adéquat de l'isolation thermique.

Dans le cadre de leur travail, Z. Haddad et al. [15], ont envisagé d'améliorer le rendement de la distillation solaire par le couplage d'un distillateur avec un capteur solaire plan. Or, la distillation solaire est une technique dont le rendement reste fort limité.

Le dispositif utilisé dans cette étude est constitué essentiellement d'un distillateur en plexiglas composé d'une demi sphère inférieure et d'une demi sphère supérieure qui sert à transmettre le rayonnement solaire d'une part et joue le rôle de surface de condensation d'autre part, et d'un capteur solaire plan à circulation de liquide caloporteur (qui est l'eau). Le distillateur raccordé par des tubes au capteur et le système fonctionne en thermosiphon (Fig. 2.29).

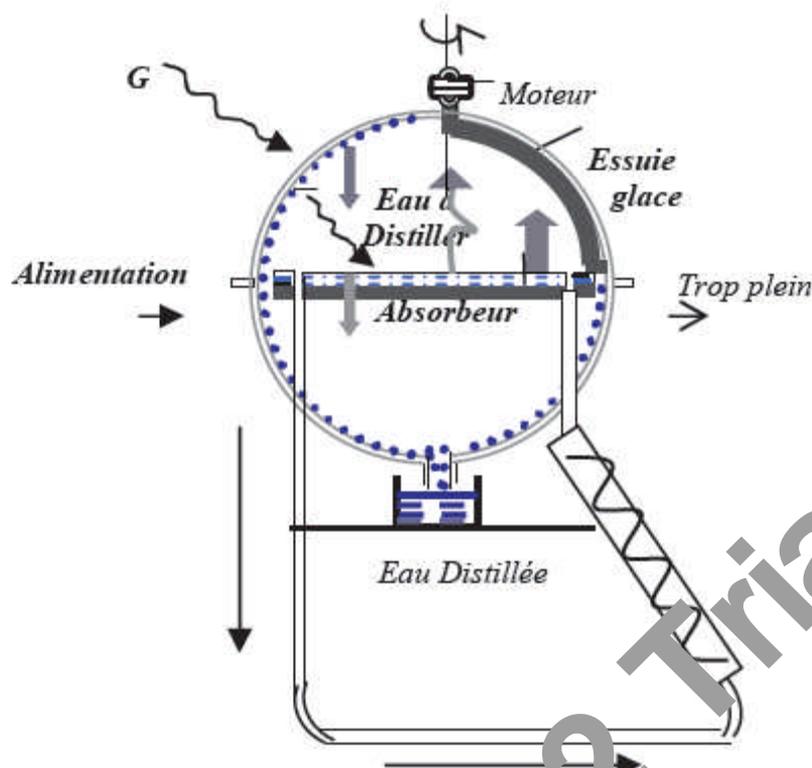


Fig. 2.29 : Système distillateur capteur [15].

Les auteurs ont établi le bilan thermique du système et calculé, puis calculé les températures au niveau de chaque partie, ainsi que les caractéristiques de fonctionnement du système en fonction des paramètres externes.

Les équations régissant le fonctionnement de ce système sont résolues en utilisant la méthode itérative de Gauss-Seidel. Ils ont développé un programme en langage Fortran qui consiste à calculer les températures au niveau de chaque partie du système et les caractéristiques de fonctionnement du système (la production et l'efficacité) en fonction des paramètres externes (l'irradiation solaire globale, la température ambiante, la vitesse du vent) (Fig. 2.30).

L'influence de nombreux paramètres externes, en particulier l'éclairement énergétique et les conditions météorologiques sur les caractéristiques de fonctionnement est également présentée. Une confrontation des résultats numériques avec les valeurs issues de l'expérience montre une bonne fiabilité du code de calcul élaboré.

De l'analyse des résultats, il en résulte les observations suivantes :

- une augmentation de l'irradiation globale conduit à un accroissement des caractéristiques de fonctionnement néanmoins, une trop grande puissance incidente peut produire l'effet inverse.
- la vitesse du vent favorise l'échange, donc une augmentation de la production, mais au-delà d'une valeur de 2m/s, l'effet devient défavorable.

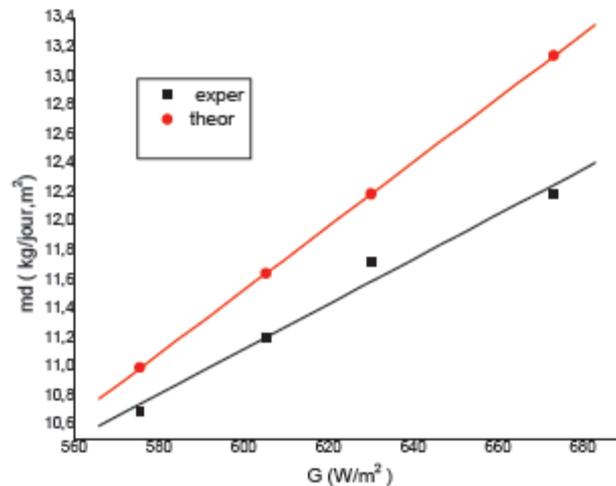


Fig. 2.30 : Variation de la production (théorique et expérimentale) en fonction de l'irradiation globale, [15].

- le choix de la forme sphérique du distillateur solaire permet de minimiser l'effet de la position du soleil sur la production.

Il s'agit d'un essai expérimental pour un modèle de distillateur plan à effet de serre effectué par N. Retiel et al. [16]. Le problème à traiter consiste à améliorer la production d'eau distillée par apport des modifications sur ce nouveau modèle de distillateur (Fig. 2.31).

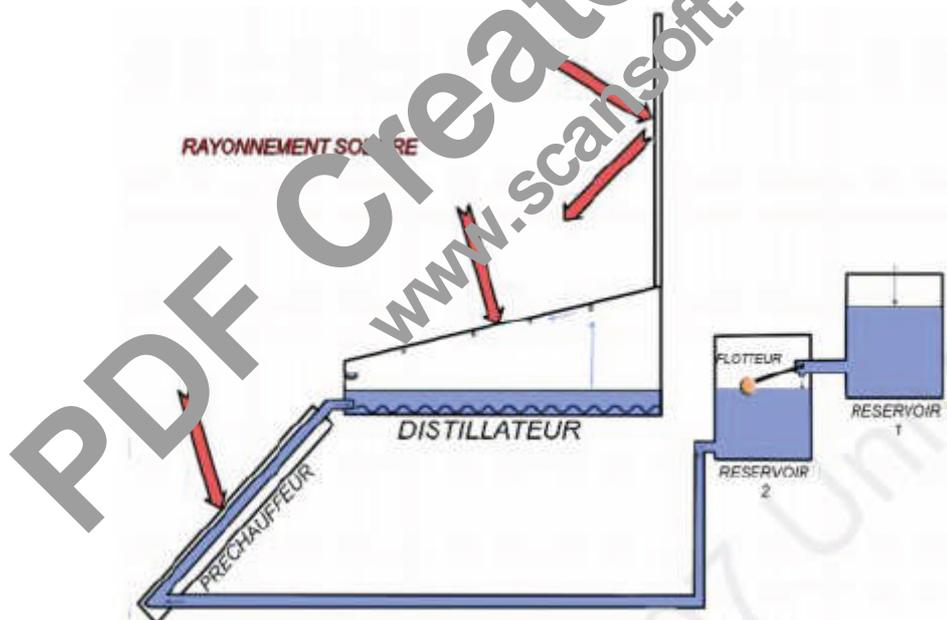


Fig. 2.31 : Principe de réalisation et de fonctionnement du banc d'essai, [16].

Les modifications appliquées sur le distillateur sont : l'utilisation d'un réflecteur plan afin d'augmenter le flux solaire global reçu, l'utilisation d'un système de préchauffage d'eau d'appoint du distillateur et enfin, l'utilisation d'un absorbeur ondulé pour augmenter la surface d'absorption du flux solaire. Une série de tests a été faite pour voir l'efficacité apportée par chacun de ces éléments (Fig. 2.32).

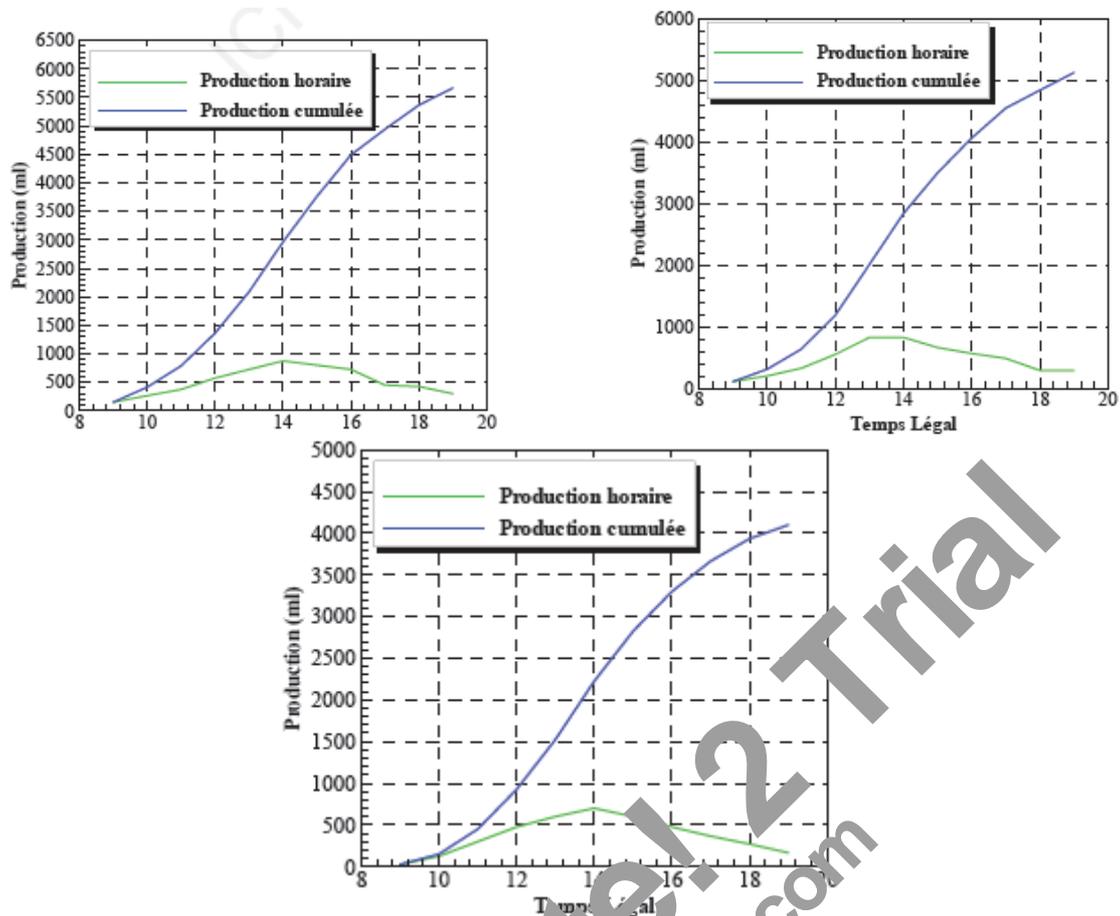


Fig. 2.32 : Production d'eau distillée : (distillateur - pré-chauffeur), (distillateur - miroir) et (distillateur seul) de droite à gauche, [16].

En effet, ils ont étudié la production d'eau distillée et l'évolution de la température de la masse d'eau dans le distillateur pour différents cas des modifications ainsi appliquées. L'effet d'utilisation d'eau de mer et d'eau douce est aussi étudié.

Ils ont constaté que le pré-chauffeur d'eau solaire a le meilleur rendement par rapport aux autres éléments mais, du fait qu'il occupe une surface au sol il serait plus intéressant d'agrandir la surface du distillateur.

2.6.4-TRAVAUX SUR LE FROID ET LA CLIMATISATION SOLAIRES :

Un travail concernant les locaux d'habitation qui vise à l'objectif de l'obtention d'un niveau de confort thermique, en ayant une consommation énergétique optimale. Pour atteindre cet objectif, N. Oudjehani et A. Tahakourt, [17] ont étudié l'amélioration du comportement thermique des bâtiments par des techniques passives.

Des simulations ont été faites par l'utilisation d'un logiciel thermique TRNSYS, il s'agit d'un programme informatique de simulation d'échanges thermiques en régime transitoire, qui permet de simuler les performances d'un système de chauffage, de ventilation ou de climatisation solaire ou pas, faisant partie d'un bâtiment soumis à diverses conditions climatologiques.

Cette étude est préliminaire analysant les performances thermiques des locaux situés dans une région semi-aride (Fig. 2.33). Les effets de la toiture, de la masse thermique (choix des matériaux de construction) et de l'épaisseur de l'isolant sont étudiés et commenté (Fig. 2.34).

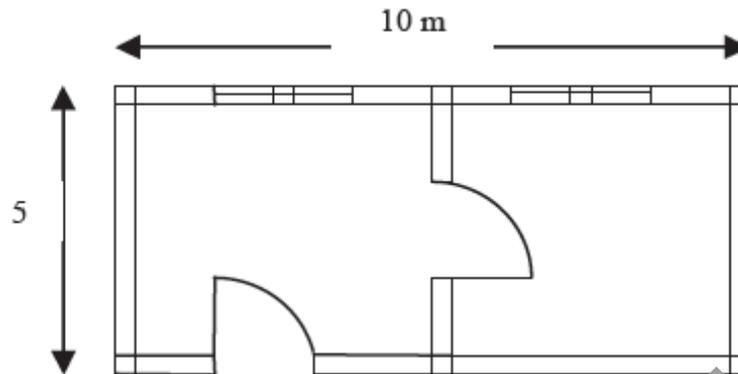


Fig. 2.33 : Schéma du local simulé, [17].

Les résultats obtenus ont permis de donner une idée sur la meilleure structure massive de l'enveloppe avec une toiture inclinée en tuile, ainsi que l'ordre de grandeur de la température ambiante du local et l'effet de l'inertie qui semble être la solution la plus efficace du point de vue énergétique.

Après avoir montré l'utilité du choix d'une construction avec la toiture inclinée en tuile dans la réduction de la température intérieure du local, on a montré que les techniques passives ne suffisent pas seules pour maintenir une température de confort acceptable, d'où l'intégration d'une construction lourde et l'épaisseur optimale de l'isolant permettant une nette amélioration des performances thermiques.

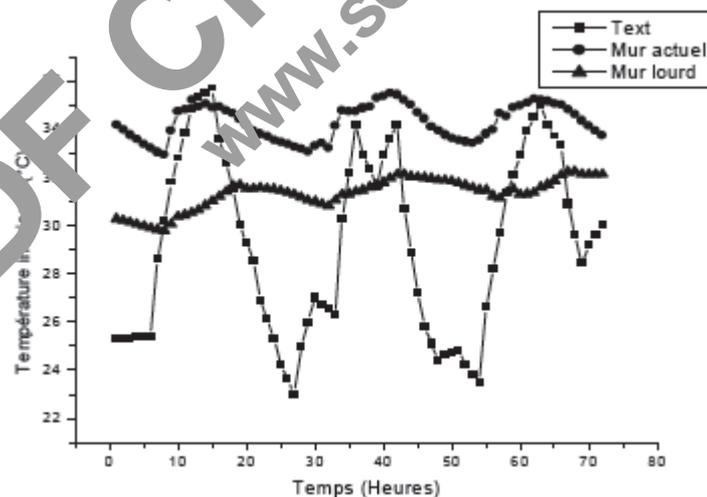


Fig. 2.34 : Effet de la masse thermique sur la température intérieure, [17].

Z. Ben Saïd et al. [18] ont présenté quelques notions essentielles sur l'estimation et la transmission d'énergie solaire incidente dans le contexte de la réduction de la pollution par la conception des maisons solaires économes.

Une maison bioclimatique est un habitat très agréable, lumineux et confortable qui économise l'énergie. De ce fait, il permet d'éviter l'émission de poussières et de gaz polluants dans l'atmosphère. Par sa conception, la maison doit être capable de satisfaire quatre fonctions principales : capter le rayonnement solaire, stocker l'énergie captée, distribuer la chaleur et réguler la température interne.

Ensuite, ils ont cherché à étudier une dynamique globale par la maîtrise de l'architecture, l'orientation, la production, le captage, le stockage et la régulation de la chaleur dans les maisons solaires, dans le but de transformer un climat extérieur agréable en toute saison.

Pour cela, les auteurs ont réalisé un programme de simulation de la course du soleil sur une maison type au site de Tlemcen. Ce dernier a permis l'estimation des énergies incidentes nécessaires au dimensionnement adéquat des maisons solaires. La maison solaire ainsi étudiée est constituée par quatre façades Est, Ouest, Sud et Nord, ainsi qu'un toit de forme pyramidale (Fig. 2.35 et 2.36).

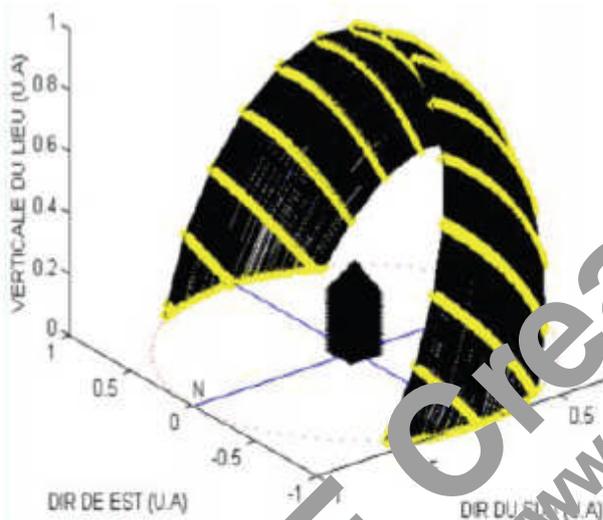


Fig. 2.35 : Course du soleil sur une maison type à Tlemcen, [18].

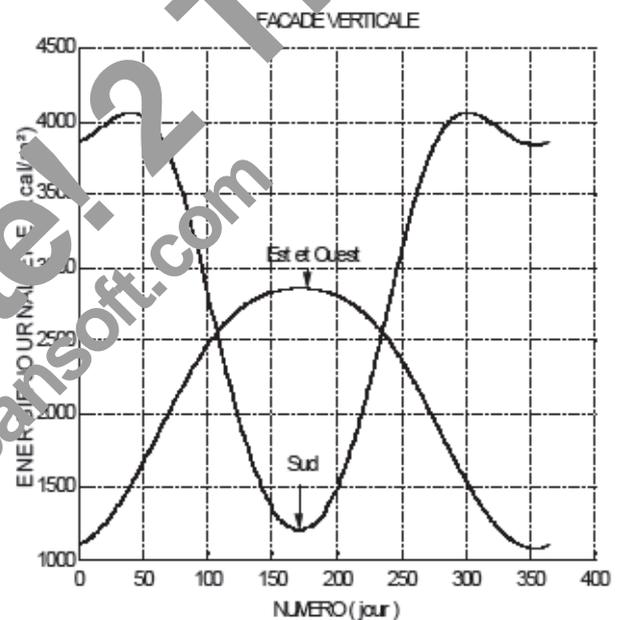


Fig. 2.36 : Energie journalière reçue par les façades Est, Ouest et Sud d'une maison à Tlemcen par ciel bleu clair, [18]

Le travail de M. Berdja et al. [19] a pour objectif essentiel de remettre le point sur la situation de l'Algérie vis-à-vis de l'exploitation du gisement solaire dans le domaine du rafraîchissement pendant les séquences chaudes de l'année qui coïncident avec les périodes de l'ensoleillement maximal. C'est une étude qui a pour but de développer les actions innovantes contribuant à maîtriser l'utilisation de l'énergie solaire dans le conditionnement d'air. Elle permettra de dimensionner les divers équipements constituant l'installation du système de climatisation solaire tels que : le déshumidificateur, l'humidificateur, l'échangeur air-air et le capteur solaire en fonction des conditions climatiques locales.

Dans une phase finale, une étude technico-économique a été effectuée, qui favorise l'estimation de la rentabilité du système choisi qui est un système fermé utilisant une machine à adsorption (Fig. 2.37).

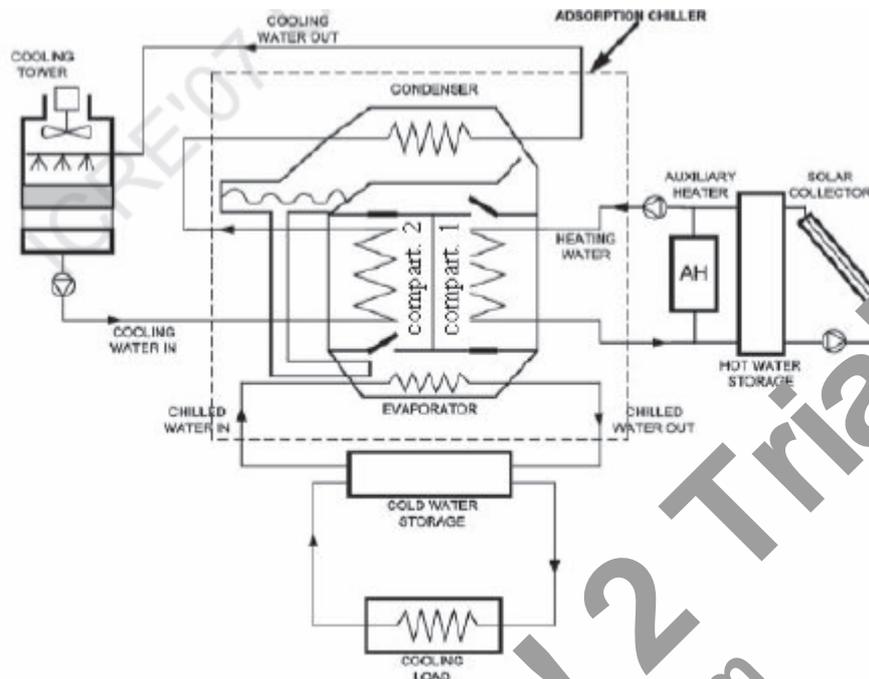


Fig. 2.37 : Schéma de principe d'une installation de rafraîchissement solaire utilisant une machine frigorifique à adsorption. [19]

Le choix du procédé à adsorption a été retenu par l'unité de développement de l'énergie solaire (UDES) pour la raison suivante :

- la machine à adsorption utilise pour son fonctionnement des températures relativement faibles (50 à 100° C) d'où la possibilité d'utiliser des capteurs solaires plans à eau qui peuvent être fabriqués localement.
- la disponibilité des matériaux adsorbants (charbon actif, silica gel, zéolithe,...etc) et les fluides frigorigènes (méthanol, eau).
- l'appareillage est totalement statique (ou presque).
- la conduite d'un tel système est très simple et peut être automatisée facilement.

Dans le souci de créer un microclimat de confort à l'intérieur d'un local situé dans les régions chaudes fortement ensoleillées durant les périodes d'Eté, A. Dobbi et al. [20] ont proposé une étude qui s'intéresse à l'optimisation de la consommation d'énergie au niveau d'une installation de climatisation solaire à adsorption, et à la recherche des modèles de calcul de densité du flux de chaleur à travers les surfaces opaques (murs et toits) et les surfaces vitrées tout en évitant les calculs complexes par les équations classiques.

Des modèles simples permettant le calcul de la densité du flux thermique à travers des surfaces opaques et vitrées ont été élaborés afin de choisir judicieusement les matériaux de construction et par la suite, l'optimisation de la consommation d'énergie au niveau des installations de climatisation.

Le comportement thermique du milieu à conditionner vis-à-vis des charges thermodynamiques de l'ambiance extérieure est lié au type de construction, notamment :

- La conception du local qui doit être adapté à la région considérée.
- Les matériaux utilisés.
- Le type d'isolation, en plus l'orientation des façades à travers leur exposition au rayonnement solaire.

Pour le calcul de la quantité de chaleur transmise par les surfaces opaques, Q_t , des études expérimentales et des tableaux ont été élaborés par plusieurs auteurs, [21] ont mis la différence de température équivalente $\Delta t_{\text{éq}}$ en degrés avec un coefficient d'échange global K pour plusieurs types des murs et des toitures en tenant compte des conditions suivantes :

- Les coefficients d'absorption pour le rayonnement solaire sont 0.7 pour les murs, et 0.9 pour les toits.
- Le coefficient d'émission pour le rayonnement thermique est 0.9.
- $Q_t = K \cdot F \cdot \Delta t_{\text{éq}}$ en (Kcal/h)
- $\Delta t_{\text{éq}} = \Delta t_{\text{éq}} + (T_{\text{am}} - 24.5) + (26 - T_i) + a$

Où : T_{am} est la température de l'air extérieur, T_i est la température de l'air intérieur du local (prise égale à 28.5), $\Delta t_{\text{éq}}$ est la différence de température équivalente calculée, F est la surface d'échange thermique, et a est un coefficient correctif d'obscurcissement (égale à 1.15).

Un exemple de calcul pour un mur Sud avec une température de l'air extérieur T_{am} donnée, on obtient le (Tableau 2.1), la variation du flux de la chaleur q en fonction du temps t sera donné par la relation :

$$q = 0.025 t^4 + 0.112 t^3 - 1.577 t^2 + 7.8126 t + (T_{\text{am}} - 38) - 1.164 \quad (2.1)$$

La courbe de variation du flux de la chaleur en fonction du temps est donnée par la (Fig. 2.38) :

Un autre exemple de calcul pour un mur Ouest avec une température de l'air extérieur T_{am} donnée on obtient le (Tableau 2.2), et la variation du flux de la chaleur q en fonction du temps t sera donné par la relation :

$$q = 0.1865 t^2 - 4.2541 t + 1.03(T_{\text{am}} - 38) + 31.327 \quad (2.2)$$

La courbe de variation du flux de la chaleur en fonction du temps est donnée par la (Fig. 2.39) :

Alors, les modèles du flux spécifiques à travers une surface opaque avec différentes orientations (Sud, Nord, Ouest, et Est) permettent de calculer à n'importe quel moment le flux de chaleur traversant le mur d'un local. Il suffit de mesurer simplement la température de l'air extérieur, qui représente le seul paramètre à définir (par mesure). Ces modèles ont donné des bons résultats avec un coefficient de détermination R^2 proche de 1. Aussi, ces modèles sont simples et peuvent être appliqués pour d'autres types de construction.

Temps	Δt_{eq}	Δt_{eqc}	q_{s1}
6	-2.6	4.55	4.69
7	-3.8	3.35	3.45
8	-4.8	2.35	2.42
9	-5.6	1.55	1.60
10	-6.1	1.05	1.08
11	-6	1.15	1.18
12	-5.4	1.75	1.80
13	-4	3.15	3.24
14	-2.1	5.05	5.20
15	0.3	7.45	7.67
16	2.7	9.85	10.15
17	4.8	11.95	12.31
18	6.4	13.55	13.96
19	7.5	14.65	15.09
20	7.9	15.05	15.50

Tableau 2.1 : Les valeurs de Δt_{eq} , Δt_{eqc} , et q_{s1} selon les heures du jour pour un mur sud, [20]

Temps	Δt_{eq}	Δt_{eqc}	q_{o1}
6	-0.3	10.85	11.18
7	-1.8	9.35	9.63
8	-3	8.15	8.39
9	-4	7.5	7.36
10	-4.7	7.15	6.64
11	-5.2	5.95	6.13
12	-5.2	5.95	6.13
13	-5	6.15	6.33
14	-4.3	6.85	7.06
15	-3.2	7.95	8.19
16	-1.7	9.45	9.73
17	0	11.55	11.90
18	1.9	14.05	14.47
19	5.5	16.65	17.15
20	7.8	18.95	19.52

Tableau 2.2 : Les valeurs de Δt_{eq} , Δt_{eqc} , et q_{o1} selon les heures du jour pour un mur ouest, [20]

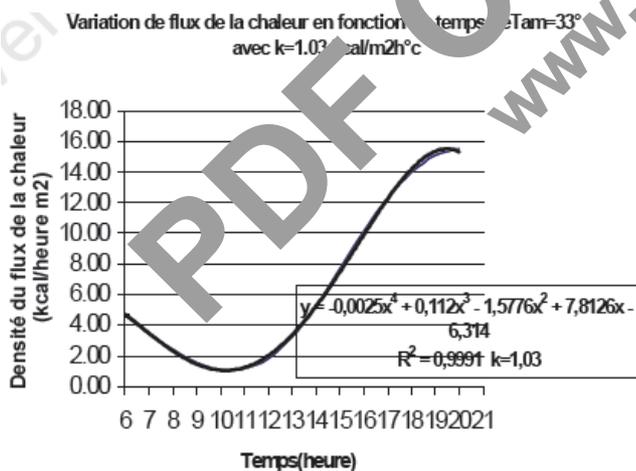


Fig. 2.38 : Variation du flux de la chaleur en fonction du temps (cas d'un mur sud), [20]

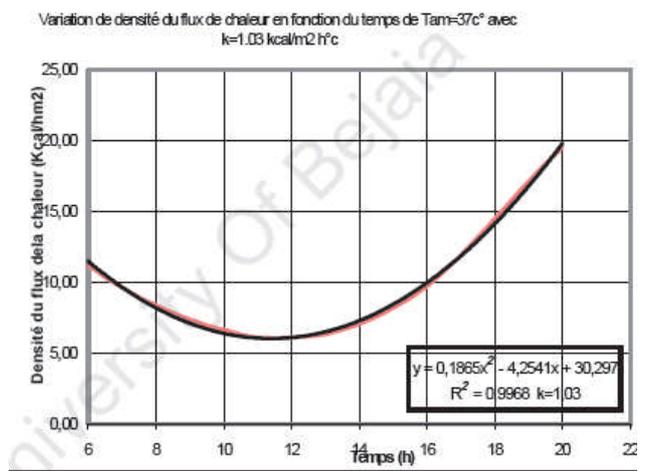


Fig. 2.39 : Variation du flux de la chaleur en fonction du temps (cas d'un mur ouest), [20]

condenseur (C) où il se liquéfie. Le liquide passe à travers une valve à l'évaporateur (E) où il se vaporise et absorbe de la chaleur. Finalement, l'ammoniac vapeur est dirigé vers l'absorbeur (A) où il est absorbé par la solution de faible concentration en produisant une solution de forte concentration qui sera acheminée du nouveau vers le générateur (G) par l'intermédiaire d'une pompe (P) et en passant par l'échangeur (E_c).

Le critère considéré pour caractériser la performance du cycle de réfrigération est :

$$\text{- le coefficient de performance : } COP = \frac{Q_E}{W_p + Q_G} \quad (2.3)$$

$$\text{- la capacité de réfrigération : } P_F = Q_E \quad (2.4)$$

A partir de la simulation, ils ont établi l'expression du débit massique de réfrigérant comme suit :

$$\dot{m}(t) = -10^{-6} \cdot t^2 + 4 \cdot 10^{-5} \cdot t - 0.0002 \quad (2.5)$$

L'expression de la capacité de réfrigération est comme suit :

$$P_F(t) = -0.0189 \cdot t^2 + 0.4696 \cdot t - 2.2159 \quad (2.6)$$

Les deux relations précédentes qui caractérisent le mode transitoire permettent de calculer la masse de l'ammoniac récupérée durant un jour par le collecteur de 1 m².

Les auteurs ont présenté les effets du rayonnement solaire global durant la journée sur le coefficient de performance COP et sur la capacité de réfrigération P_F, ainsi que sur le débit massique du réfrigérant, (Fig. 2.41).

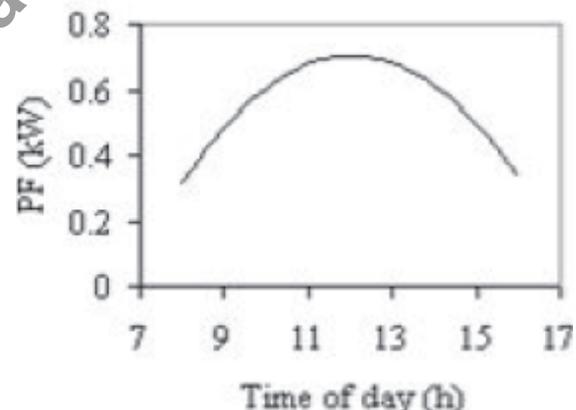
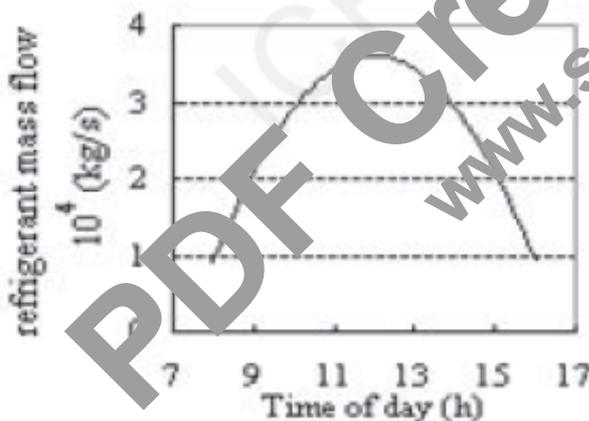


Fig. 2.41a : Variation horaire de débit massique du réfrigérant, [22]

Fig. 2.41b : Variation horaire de la capacité de réfrigération, [22]

Il est à conclure que la masse d'ammoniac récupérée, la capacité de réfrigération et le coefficient de performance du cycle de réfrigération sont suffisants pour certaines applications domestiques et l'unité peut être considérée comme un prototype qui économise de l'énergie.

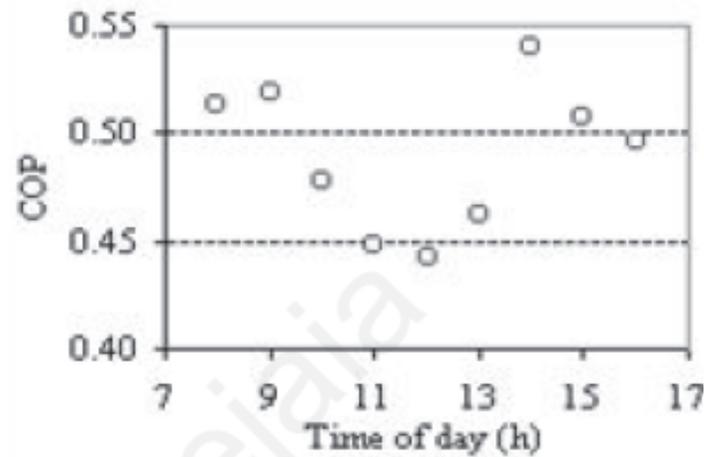


Fig. 2.41c : Variation horaire du coefficient de performance [21]

2.6.5-TRAVAUX SUR LA PRODUCTION DE L' ENERGIE ELECTRIQUE SOLAIRE :

H. Derbal et al. [23] ont proposé un communiqué sur le projet de la centrale thermo solaire à cycle combiné intégré de Hassi R'mel en Algérie. Ce projet de la centrale hybride (solaire/gaz), premier du genre en Algérie, marque un jalon important dans la concrétisation de la politique de promotion des énergies renouvelables et d'économie d'énergie basée sur la diversification et la combinaison des sources, sur l'économie des combustibles fossiles et sur le développement d'un système énergétique durable conforté par le grand potentiel solaire de l'Algérie (Fig. 2.42). Implanté à Hassi R'mel, cette nouvelle centrale a pour configuration un cycle combiné gaz de 130 MW et un champ solaire de concentrateurs solaires de puissance de 30 MW environ.

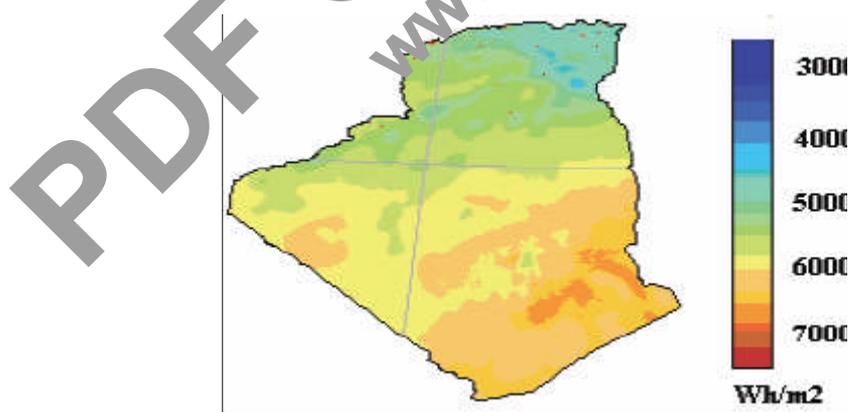


Fig. 2.42 : Rayonnement solaire global sur horizontal, [23].

Une centrale solaire à cycle combiné ISCCS (Integrated Solar Combined Cycle System) a comme principe, l'utilisation des gaz d'échappement d'un générateur électrique d'une turbine à gaz pour alimenter une chaudière de récupération afin de produire la vapeur alimentant la turbine à vapeur

qui entraîne un autre générateur électrique. Dans le cas discuté, le champ solaire à concentrateurs cylindro-paraboliques apporte un flux thermique supplémentaire dans la chaudière de récupération, ce qui augmente la quantité de vapeur alimentant la turbine à vapeur (Fig. 2.43).

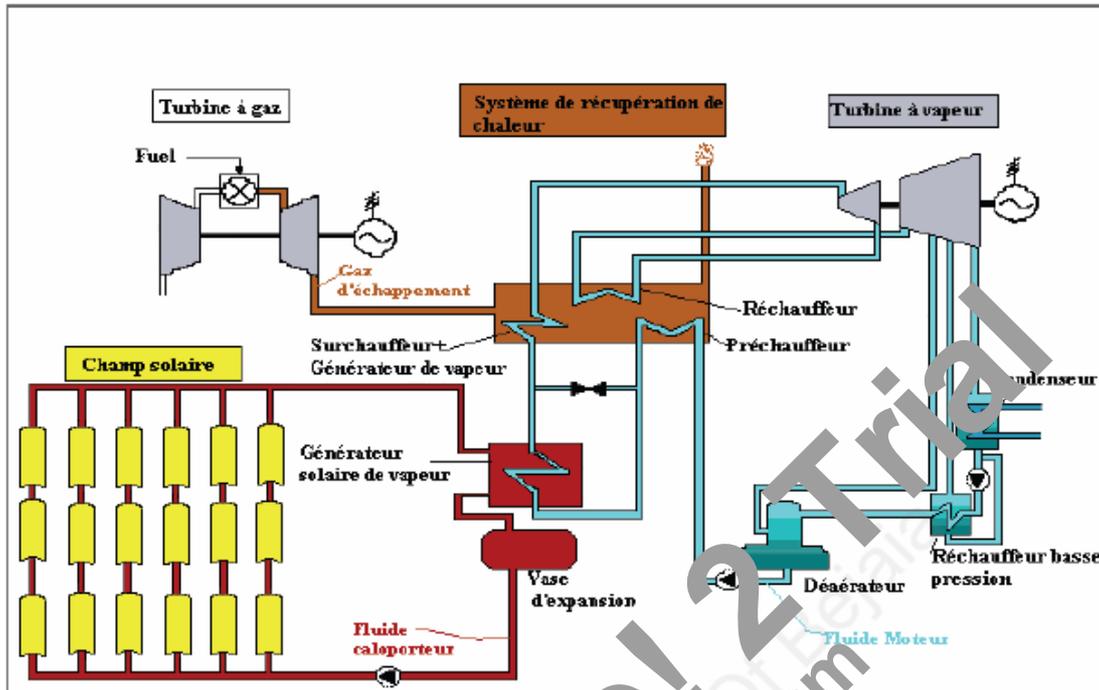


Fig. 2.43 : Configuration hybride solaire (SEGS)/cycle combiné, [23]

Le choix final du site s'est porté sur Hassi Bme qui offre les avantages suivants : une arrivée de gaz existante et suffisante pour les besoins du projet, l'accès au réseau électrique déjà disponible, le projet sera mitoyen à ce réseau, une source d'eau de près de 300 m³/jour.

Le potentiel journalier moyen d'insolation solaire directe normale est équivalent à 5465.73 Wh/m². La durée d'insolation journalière est de 4399 heures, avec une moyenne annuelle d'insolation de 12 heures par jour.

Le projet répondra aux exigences de protection de l'environnement définies par la loi Algérienne en la matière et permet un développement durable.

Le travail de D. Rekioua et al. [24] est orienté vers l'étude d'une centrale de production électrique hybride, qui combine entre deux sources d'énergie renouvelables (éolienne, solaire photovoltaïque) avec stockage et un groupe électrogène de secours. La gestion d'énergie des différentes sources est assurée par un gestionnaire qui commande l'ouverture et la fermeture des commutateurs selon les conditions météorologiques (éclairage et vitesse du vent), (Fig. 2.44).

Les auteurs ont simulé le système hybride (éolienne photovoltaïque groupe diesel) et ont présenté les résultats obtenus pour différents cas : journée d'hiver, journée d'été ou journée quelconque

durant l'année, et appliqués à la région de Bejaia (Latitude : 36.45N, longitude : 05.04E, Altitude : 2m).

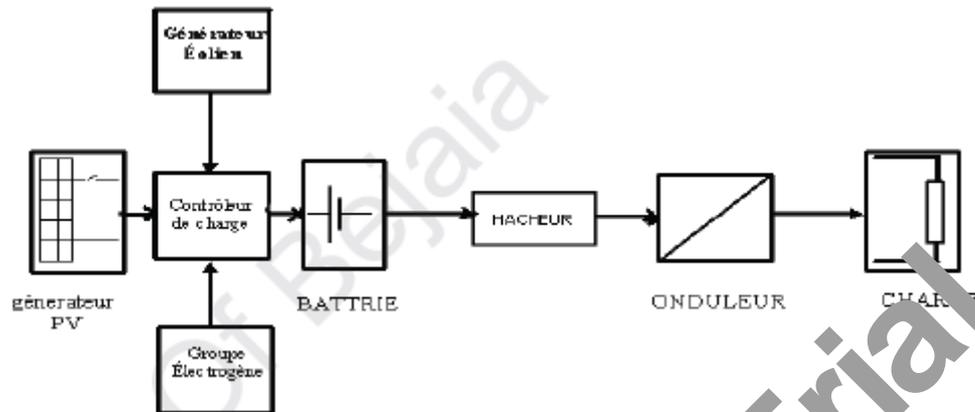


Fig. 2.44 : Schéma d'une installation type d'un système hybride (PV Eolienne groupe Diesel) [24].

Un système de production hybride alterné est une association d'un système éolien, photovoltaïque et un groupe électrogène relié par un système de commutation entre les trois permettant d'assurer le passage d'un fonctionnement d'une source à une autre selon les conditions.

Un système de production hybride parallèle est un système qui relie les deux sources éolienne et photovoltaïque en même temps à la batterie et le groupe électrogène intervient en secours quand les batteries sont déchargées.

La modélisation des différents composants du système a été effectuée, notamment la modélisation du générateur photovoltaïque, de la batterie et de l'aérogénérateur. Des relevés de la variation de l'éclairement et de la variation de la vitesse du vent pour les mois de Mars et d'Avril en fonction du jour ont été établis par les auteurs (Fig. 2.45).

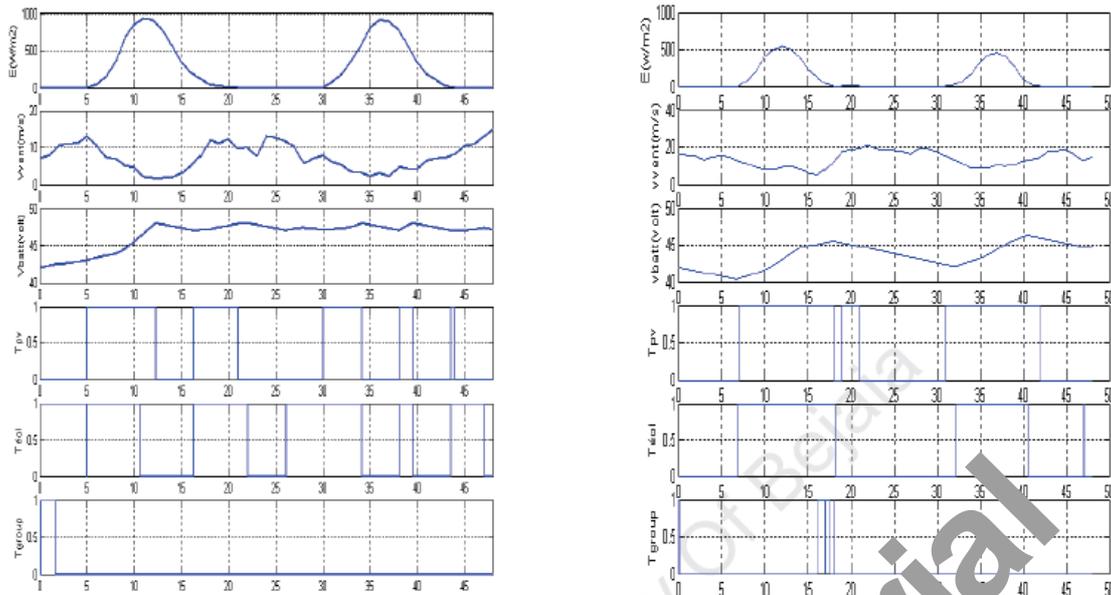


Fig. 2.45 : Fonctionnement hybride pour deux journées d'Été (gauche) et pour deux journées d'Hiver (droite), [24].

Pour simuler le système hybride (éolienne photovoltaïque groupe Diesel), ils ont réalisé le schéma de simulation sous le logiciel Matlab- Simulink et la gestion qui commande l'ouverture et la fermeture des commutateurs selon les conditions météorologiques.

La simulation du système hybride a été effectuée par l'introduction des valeurs de l'ensoleillement et de la vitesse du vent d'une journée.

A partir des données indispensables telles que le potentiel énergétique journalier disponible et la puissance demandée par l'utilisateur, le dimensionnement du champ photovoltaïque, de la turbine éolienne avec son générateur et d'un groupe diesel qui convient à l'installation a été réalisé. La simulation numérique de chaque générateur et de toute la chaîne hybride montre l'efficacité et la fiabilité de ce dispositif.

2.6.6-TRAVAU SUR LES DISPOSITIFS DE CAPTATION SOLAIRES :

A. Merzali et al. [25] ont réalisé un travail qui élabore un ensemble d'outils répondant à l'analyse des pertes thermiques dans un concentrateur cylindro-parabolique, qui est une problématique complexe émergeant de contextes applicatifs variés. Ces outils seront appliqués à la résolution de ce problème. Un travail analytique a été effectué qui consiste à calculer les pertes de chaleur par conduction thermique et par convection naturelle dans les géométries de l'espace annulaire de l'absorbeur solaire par des méthodes numériques et par l'utilisation d'un programme informatique en Pascal. Les techniques étudiées pour réduire les pertes de chaleur incluent l'usage d'autres gaz que l'air dans l'espace annulaire.

La configuration de l'absorbeur choisie pour l'étude est typique de celle utilisée dans les systèmes testés au laboratoire du Sandia (Fig. 2.46).

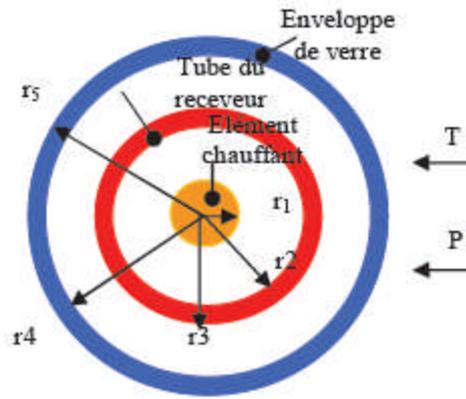


Fig. 2.46 : Coupe du tube absorbeur, [25].

L'étude numérique et expérimentale ont montré qu'il est possible de calculer d'une façon approchée, les pertes thermiques et les températures correspondantes du tube absorbeur ainsi que du tube en verre qui enveloppe le tube receveur, comme étant en fonction de la pression de l'espace annulaire. Les techniques utilisées pour la réduction du transfert de chaleur par conduction incluent l'utilisation d'autres gaz, autre que l'air dans l'espace annulaire (Fig. 2.47).

L'utilisation de l'Argon comme gaz annulaire est une pratique rentable pour réduire les pertes thermiques, tandis que l'utilisation du Krypton et du Xénon est moins abordable, du point de vue économique est très chère.

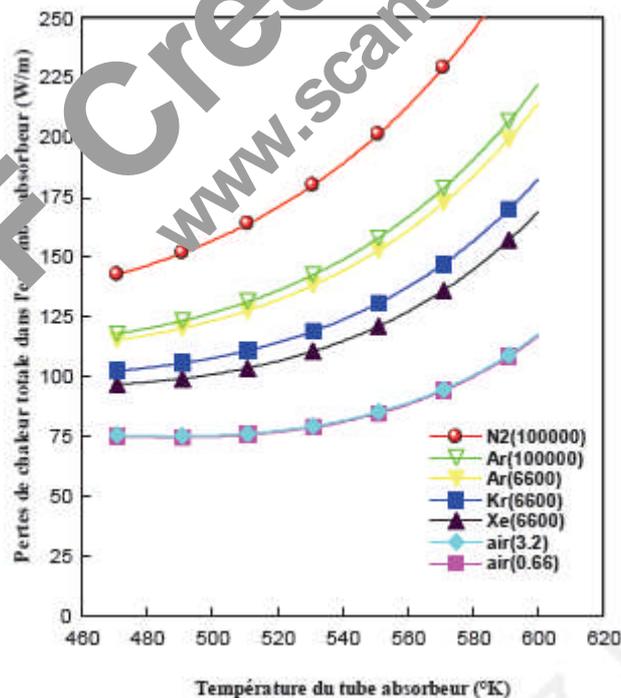


Fig. 2.47 : Pertes thermiques totales en fonction de la température du tube absorbeur pour des gaz alternatifs maintenus à différentes pressions, [25].

Dans une étude, A. Boubeghal et al. [26] ont proposé de comparer le capteur solaire à air classique avec une serre à couverture transparente avec deux surfaces noires d'absorption, une surface horizontale et l'autre verticale. Ce choix est associé à un effort qui vise à minimiser le coût de la serre et à faciliter sa construction et ce grâce à un choix de matériaux spécifiques et une géométrie relativement simple.

Un modèle numérique simulant le fonctionnement du capteur à air plan, est validé par la confrontation des résultats de la simulation avec ceux de l'expérience. L'analyse montre que le capteur plan à air ainsi étudié, mêmes dans des périodes automnales, reste performant et peut assurer le séchage des produits.

Aussi, le modèle mathématique établi, ainsi que le programme de calcul élaborés sont utilisés pour déterminer le comportement thermique d'un capteur à air sous forme d'une serre au cours d'une année.

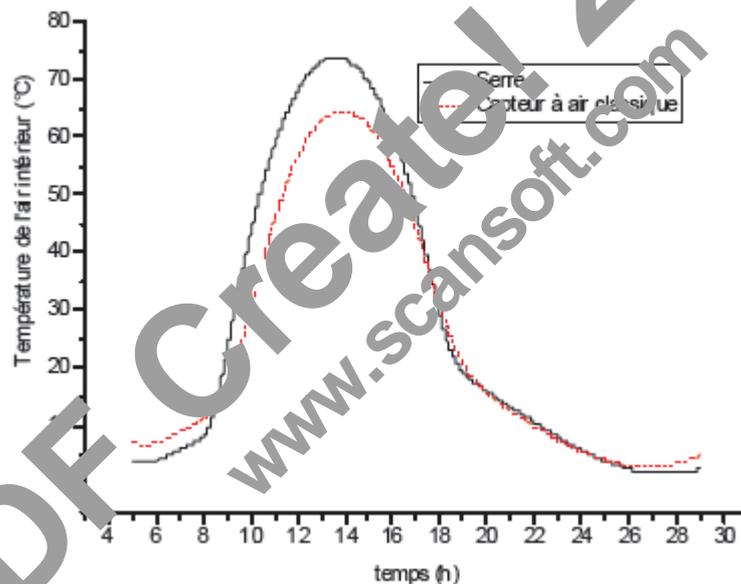


Fig. 2.48 : Évolution de la température de l'air intérieur de la serre et du capteur classique pour le 17 Janvier, [26].

Sur la lumière des résultats obtenus, ils ont trouvé que la serre est plus performante que le capteur à air classique. Grâce à l'absorbeur vertical, ils ont pu atteindre des températures très élevées dans la période hivernale (Fig. 2.48). De plus, l'existence de l'isolation permet d'améliorer les performances thermiques de la serre.

L'étude effectuée par A. Bouras et N. Bellel, [27] consiste à mettre en relief l'effet des paramètres externes tels que le flux du rayonnement solaire, le débit du fluide et la vitesse du vent sur un capteur solaire plan incliné (Fig. 2.49). Une méthode nodale a été utilisée, qui consiste à découper le

capteur solaire en tranches fictives c'est-à-dire des mailles de longueur Δx dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à établir les bilans des échanges thermiques qui interviennent au niveau des nœuds considérés : l'extérieur et l'intérieur de la vitre, l'absorbeur, dans le fluide caloporteur ainsi que l'intérieur et l'extérieur de l'isolant.

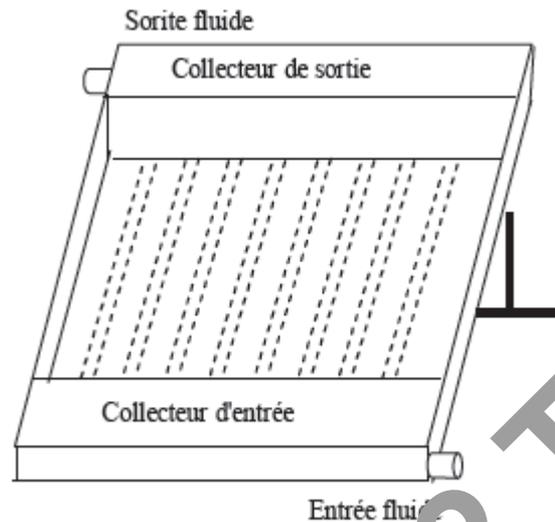


Fig. 2.49 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

Alors, l'étude théorique effectuée par les auteurs consiste à mettre en équations les échanges énergétiques intervenant au niveau du capteur qui sera tranché en mailles. Autrement, avant la résolution du système ainsi obtenu par une approche numérique basée sur la méthode itérative de Gauss-Seidel, des nœuds ont été placés au sein des mailles. De plus, il est commode d'utiliser l'analogie qui existe entre les transferts et les lois électriques.

Un programme a été élaboré et est validé par une étude comparative des résultats théoriques et expérimentaux pris dans les mêmes conditions et les évolutions de la température en fonction de l'irradiation solaire globale, en fonction du temps pour différentes vitesse du vent et en fonction du temps pour différents débits d'eau ont été présentées (Fig. 2.50).

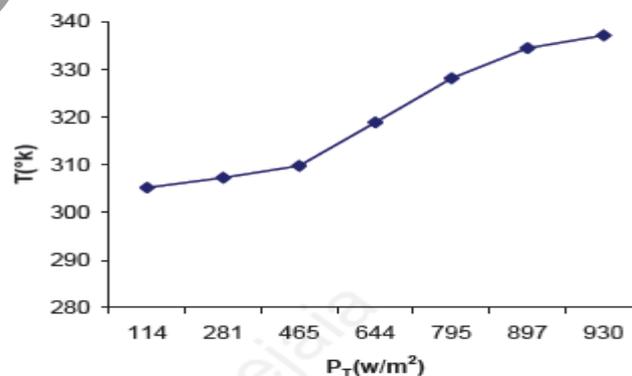


Fig. 2.50 : Evolution de la température en fonction de l'irradiation solaire globale, [27].

Les résultats obtenus par l'application de la méthode nodale sur le capteur solaire plan incliné ont permis de mettre en évidence l'effet de nombreux paramètres sur les caractéristiques de fonctionnement. Il apparaît en particulier, qu'une augmentation de l'irradiation solaire reste le paramètre le plus influant par rapport au débit et à la vitesse du vent.

Dans une communication qui s'intéresse à la valorisation du gisement solaire dans divers sites de climat différents en Algérie, S. Benlahmidi et al. [28] ont contribué à la réalisation d'un logiciel de simulation des performances des systèmes solaires. C'est une interface graphique des calculs qui sera généralisée pour une démarche globale de maîtrise de l'énergie (Fig. 2.51).

La modélisation des paramètres de fonctionnement des systèmes solaires a été effectuée tels que :

- Le rayonnement incident par les modèles de Perrin de Brichambaut pour le global et de Hottel Liu et Jordan pour le diffus, direct et global.
- La température à l'entrée de l'insolateur par un modèle qui introduit le midi thermique, instant de la journée où la température ambiante atteint sa valeur maximale, la valeur minimale est au lever du soleil. La température maximale n'est atteinte en réalité au midi solaire vrai.

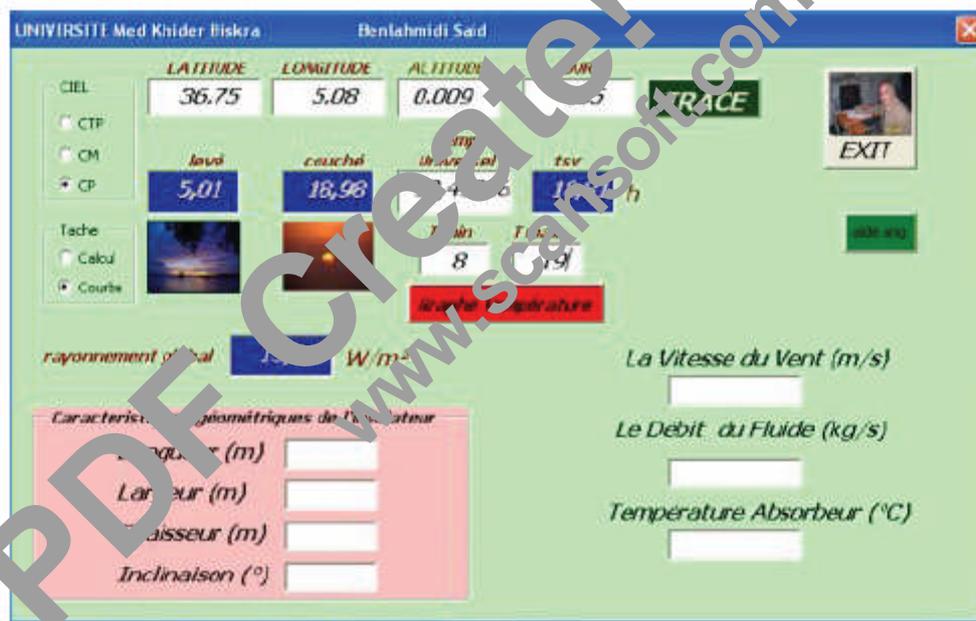


Fig. 2.51 : Interface graphique des calculs, [28].

Un programme informatique sous forme d'une interface pour le calcul du rayonnement et de la température d'entrée a été établi, qui introduit les données suivantes : les coordonnées du site, l'état du ciel, le numéro du jour considéré et la température minimale et maximale enregistrée le jour considéré.

Le programme permettra de calculer, le lever et le coucher du soleil en temps solaire vrai, la durée du jour, le rayonnement solaire global sur un plan horizontal pour diverses situations climatiques ainsi que la température ambiante à m'importe quel instant de la journée.

Cette étude vise à donner aux utilisateurs simples et potentiels, une vision très exhaustive sur un réel projet solaire à travers la prévision des paramètres de caractérisation des sites et éventuellement par la suite, la modélisation des performances des système énergétiques solaires.

Une communication qui présente l'analyse d'une serre par l'utilisation de deux méthodes : la première est celle de Range-Kutta tandis que la deuxième est une méthode semi analytique. C'est un travail de L. Serir et al. [29], où ils ont étudié les possibilités et les limites du système de rafraîchissement des serres agricoles dans la zone climatique du littoral.

Le bilan énergétique a été établi dans cette étude qui a considéré les effets de tous les modes d'échanges thermiques tels que : le rayonnement, la convection, la conduction et le latent (Fig. 2.52).

En effet, à l'approche de la période estivale, les flux entrants dans la serre font que la température augmente en dépassant les seuils optimums, le rafraîchissement devient nécessaire pour prévenir les endommagements des plantes.

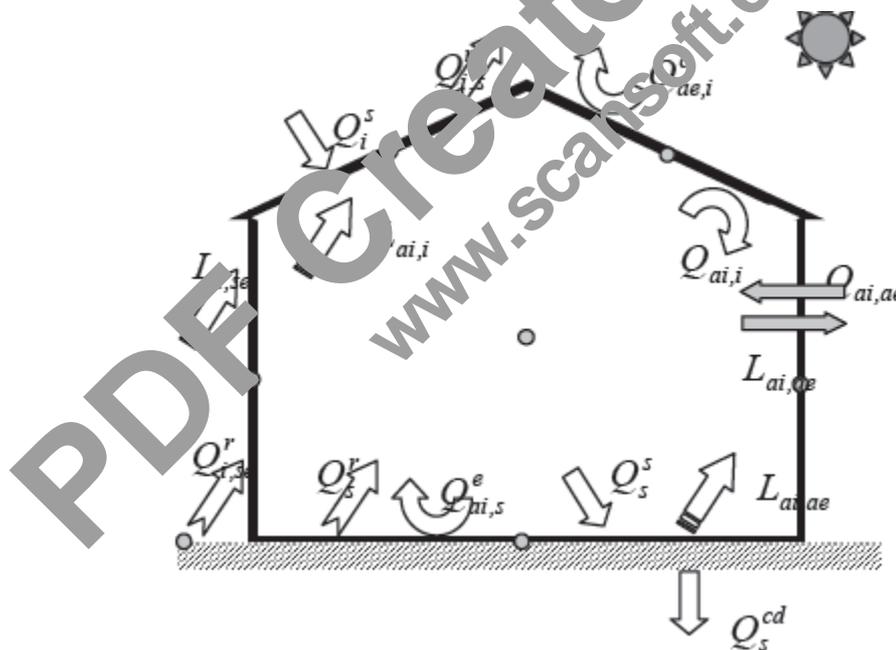


Fig. 2.52 : Schéma des différents échanges thermiques dans la serre, [29].

La serre, en tant que système solaire thermique, est le siège de tous les modes de transfert thermique (échanges radiatifs, convectifs, conductifs et par changement de phase). Après l'analyse de ces échanges, la modélisation physique d'un tel système consiste en sa décomposition en plusieurs éléments : couverture, air intérieur et sol sous serre. Chaque élément ou partie d'élément est présenté par un seul nœud. La modélisation mathématique d'un tel système est obtenue par

l'établissement d'un bilan thermique autour de chaque nœud de la paroi, de l'air intérieur et du sol (Fig. 2.513).

La spécificité du modèle utilisé est que, les auteurs ont traité les échanges radiatifs avec une grande précision, où ils ont tenu compte du phénomène des multi réflexions aussi bien dans le domaine de grandes longueurs d'ondes que celui des courtes longueurs d'ondes, c'est une technique de la thermique du bâtiment où est utilisée pour la simulation des Vérandas.

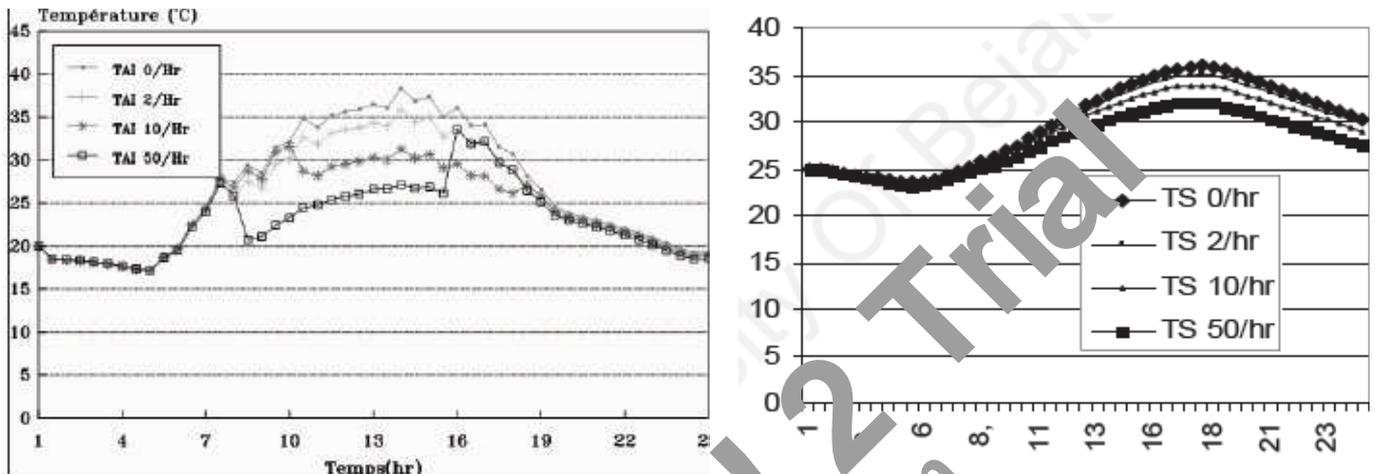


Fig. 2.53 : Température de l'air intérieur (gauche) et température du sol (droite) pour différents taux de ventilation [30].

La formulation des bilans d'énergie aboutit à un système d'équations différentielles non linéaires. Cette non linéarité provient des termes d'échanges radiatifs de grande longueur d'onde (températures à la puissance 4), des coefficients d'échanges convectifs (termes en fonction de $\Delta T^{1/2}$ et $\Delta T^{1/4}$) et du calcul des humidités saturantes (terme en exponentielle). Pour résoudre un tel système les auteurs ont procédé de deux manières : la première consiste à garder les termes non linéaires et la résolution se fait par une méthode purement numérique du type Runge-Kutta (méthode d'Euler modifiée). L'autre approche consiste à linéariser les équations et d'utiliser une méthode semi-analytique. Dans les deux cas, le calcul se fait par itération.

Les résultats ont montré que ce système de rafraîchissement est peu efficace dans la zone climatique du littoral où le taux d'humidité est élevé. Une stratégie de contrôle basée sur la différence d'humidité, la différence de température sol-air et à débit variable semble nécessaire pour donner des meilleurs résultats.

K. Tahri et B. Benyoucef, [30] ont contribué à l'étude d'un générateur photovoltaïque doté de systèmes de suivi de soleil appliqué aux sites de Tlemcen et Bouzaréah. Le principal objectif de ce travail est de modéliser l'énergie reçue par le générateur photovoltaïque.

Pour améliorer la connaissance des systèmes solaires, plusieurs voies sont possibles : l'expérimentation en vraie grandeur peut apporter des réponses aux questions posées, mais cette

solution est longue et coûteuse à mettre en œuvre et ne permet pas de généraliser les résultats. L'autre voie fait appel à la modélisation et à des programmes de simulation sur ordinateur permettant de traiter un grand nombre de cas avec un temps et un coût très réduits.

Pour la réalisation de ces programmes de simulation et d'optimisation des systèmes photovoltaïques, il est indispensable de disposer des modèles mathématiques les plus précis possibles des différentes parties qui constituent le système : la plupart des modèles du générateur photovoltaïque existant sont validés dans des conditions standards (température).

Afin d'estimer l'énergie reçue par le générateur photovoltaïque, ils ont appliqué une méthode numérique qui peut être valable pour n'importe quel capteur placé à n'importe quel lieu de la terre et d'orientation quelconque.

Il est bien évident que la rentabilité des générateurs photovoltaïques dépend en grande partie de la quantité d'énergie annuelle convertie. Ceci va permettre de faire le choix technique du capteur à utiliser dans un système photovoltaïque.

Pour compléter l'étude, les auteurs ont fait une comparaison entre les énergies reçues par les différents types de capteurs (capteur à un axe, à deux axes et capteur TEL), qui reçoivent le maximum d'énergie.

En général, une installation photovoltaïque autonome est constituée d'un générateur photovoltaïque, de stockage, de la charge, de régulateur et éventuellement des interfaces de conversion DC/AC (Fig. 2.54).

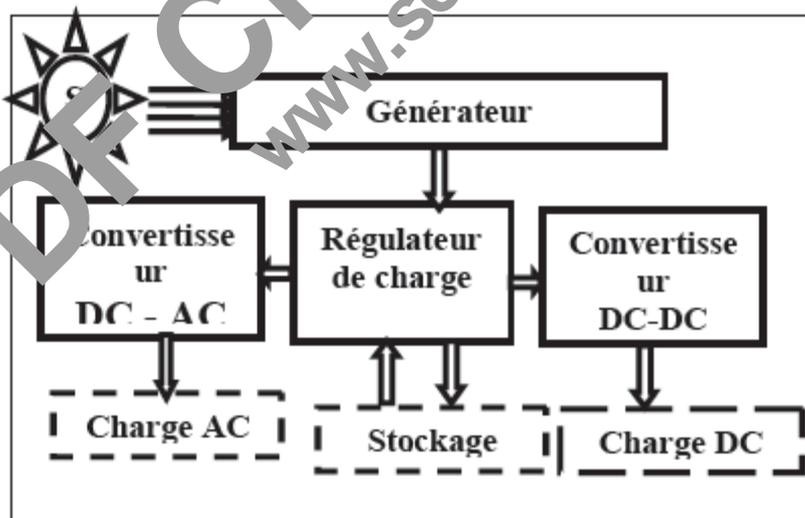


Fig. 2.54 : Système photovoltaïque autonome.

La puissance de fonctionnement du générateur photovoltaïque est facilement calculée à partir du produit "tension.courant". Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate, vu que cette dernière est fonction des conditions climatiques, telles que l'éclairement

et la température. Cette référence étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser.

Pour choisir le type de capteur à utiliser dans le générateur photovoltaïque, il est nécessaire d'estimer l'énergie journalière afin de répondre au besoin d'énergie demandée par la charge.

Une méthode numérique a été appliquée, permettant d'estimer cette énergie, et les résultats de simulation de l'énergie journalière sur les trois types de capteurs pour un ciel bleu clair sont représentés. En effet, l'estimation d'énergie globale pour les capteurs (capteur à un axe, à deux axes et capteur TEL) pour un ciel bleu clair sur les deux sites : Tlemcen et Bouzaréah, l'estimation d'énergie journalière incidente à Tlemcen et à Bouzaréah à différents états de ciel (bleu foncé, bleu clair, bleu laiteux) et l'influence de l'état de ciel sur l'énergie captée par un générateur photovoltaïque sont tous étudiés et analysés par les auteurs (Fig. 2.55).

Les résultats obtenus montrent que l'énergie produite par champ d'orientation TEL sollicite une grande surface de cellules solaires. La quantité d'énergie fournie par un système photovoltaïque dépend de la taille du générateur, de l'ensoleillement du lieu d'utilisation, de la saison d'utilisation et des besoins de la charge.

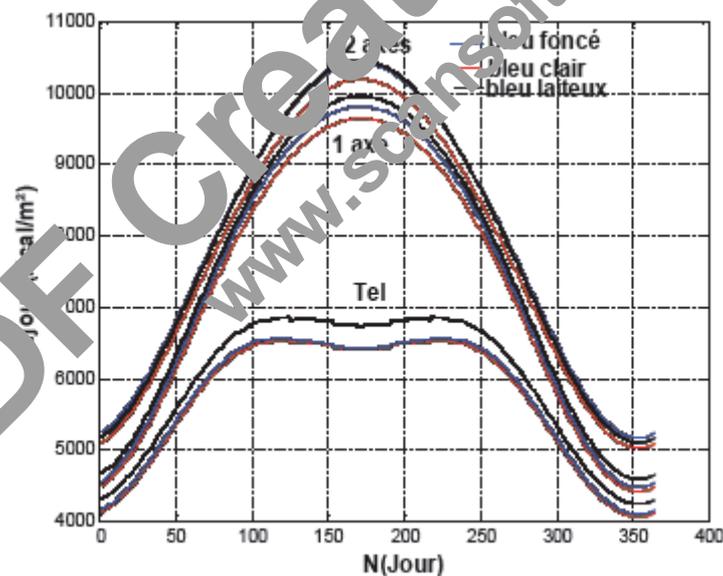


Fig. 2.55 : Energie journalière à Bouzareah à différents états du ciel incidente sur les capteurs (un axe, deux axes et TEL), [30].

M. Tounsi et al. [31] ont présenté un outil d'aide à la décision dans les applications solaires. C'est un logiciel simple et ergonomique qui a été développé pour aider des clients potentiels dans leur décision à s'équiper de systèmes solaires en leur permettant une facilité de compréhension et un

suivi des différentes étapes de conception et de dimensionnement, ainsi qu'une analyse financière de leur investissement (Fig. 2.56).

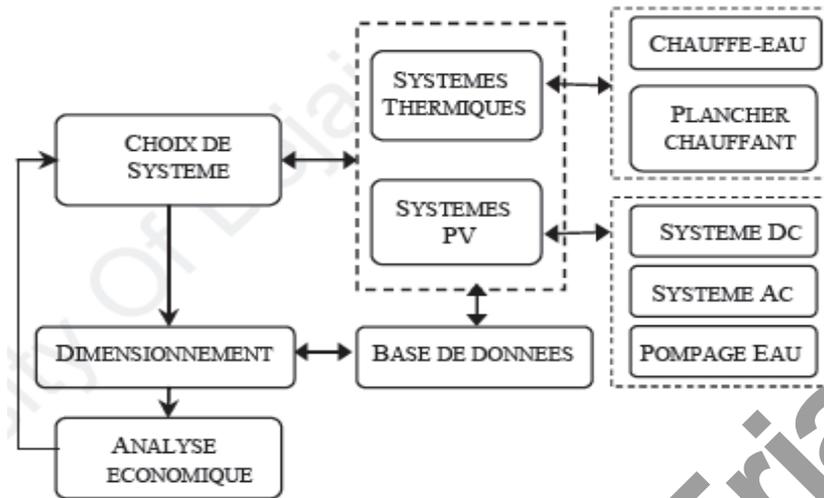


Fig. 2.56 : Structure globale de l'interface (présentation du logiciel), [31].

Une fois le type d'installation choisi, l'utilisateur entame les étapes de dimensionnement des installations solaires répondant à ses besoins et à son profil de charges.

L'outil ainsi présenté est dédié aux fonctions suivantes :

- Calcul de dimensionnement d'installations photovoltaïques pour alimentation AC ou DC et pompage d'eau.
- Calcul de dimensionnement d'installations thermiques pour le chauffe-eau solaire domestique ou le plancher solaire.
- Analyse économique traitant de l'évaluation des coûts des équipements à l'estimation de l'amortissement de l'investissement sur les systèmes (coût des systèmes, prix des équipements solaires, calcul d'amortissement).

Les auteurs ont fait une application sur le logiciel pour dimensionner les deux types de systèmes solaires : système photovoltaïque et système thermique.

Les résultats obtenus en termes d'amortissement des installations sont très intéressants, surtout avec une subvention publique. Ces résultats seront beaucoup plus meilleurs dans le cas d'installations collectives (dans les villes).

Ce travail démontre que le solaire est très compétitif par rapport aux sources d'énergie conventionnelles surtout si l'on compte les dépenses faites en amont des centrales produisant ces dernières.

Dans le but de collecter le maximum d'énergie solaire, l'utilisation des dispositifs dits : système de poursuite solaire "sun tracking systems" s'avère indispensable. Dans ce contexte, T. Bendib et

F.Djeffal, [32] sont intéressés dans leur travail au développement d'une commande à base de microcontrôleur PIC16F84A pour le contrôle du système de poursuite solaire à deux axes. Les systèmes de poursuite à deux axes sont utilisés dans les centrales thermiques à concentration pour le guidage des héliostats.

Peu d'études théoriques et expérimentales ont été citées dans la littérature qui étudie divers types de systèmes de poursuite solaire. Salah Abdallah et Salem Nijmeh, [33] ont réalisé une étude expérimentale pour montrer l'effet de l'utilisation du système de poursuite à deux axes sur l'énergie solaire collectée, ils ont utilisé une méthode de programmation avec un système en boucle ouverte où un contrôleur logique programmable (PLC). Pour contrôler l'orientation du système suivant la position du soleil, ils ont atteint un rendement de 41,43% par rapport au système fixe. Salah Abdallah et al. [34] ont conçu un système de poursuite solaire à deux axes pour la commande, ils ont utilisé une méthode de programmation à base d'un circuit intégré programmable PIC16F877, ils ont constaté que la puissance délivrée pour le système à deux axes augmente jusqu'à 37,24 % par rapport au système fixe. George C. Bakos, [35] a présenté une étude comparative de l'énergie solaire collectée entre un système de poursuite à deux axes et celui d'un système fixe où la poursuite a été réalisée en se basant sur la comparaison entre les valeurs des résistances de deux photo-résistances. Dans son travail, il a été montré que l'énergie solaire collectée par le système à deux axes augmente jusqu'à 46,46 % par rapport au système fixe.

En premier lieu, les auteurs, [32] ont présenté la partie mécanique du système où ils ont donné les choix mécaniques adaptés pour l'entraînement à faible puissance des deux axes en vue d'une autonomie énergétique du système (Fig. 2.57).



Fig. 2.57 : Système sur site avec les positions du capteur optique et les pyranomètres, [32].

Dans la deuxième partie du travail, ils ont présenté une approche de commande basée sur une méthode de programmation à bouche fermée utilisant un circuit intégré PIC. Ils ont utilisé également un nouveau capteur optique à coût réduit et construit à l'aide de photodiodes placées en parallèle en forme croisée.

Des séries de tests ont été effectuées sur le site expérimental du projet "Auresolar" sur le campus de l'université de Batna.

Les résultats d'expérimentation sont donnés en deux modes de fonctionnement : le mode fixe orienté vers le sud avec une inclinaison de 45° et le mode de poursuite suivant l'élévation de l'azimut avec deux mouvements découplés (Fig. 2.58).

Trois séries de test ont été effectuées et examinées sous des conditions atmosphériques normales pour l'évaluation des valeurs normalisées d'éclairement en fonction du temps pour les deux systèmes : fixe et à deux axes.

Les résultats trouvés présentent un gain en terme d'énergie solaire collectée mesurée de l'ordre de 50%.

L'amélioration des performances du générateur photovoltaïque par exploitation de l'énergie thermique, à travers un capteur thermique jumelé au générateur photovoltaïque, qui est dissipée habituellement dans l'air ambiant, implique la création du collecteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T).

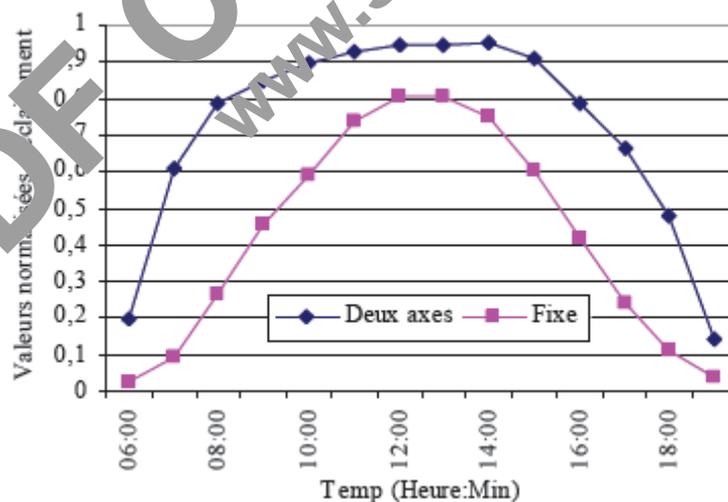


Fig. 2.58 : Résultats expérimentaux obtenus le 14.06.2007, [32].

Ce dernier, bien que présentant de meilleures performances globales par rapport au générateur photovoltaïque classique, reste imparfait dans beaucoup de points, notamment les problèmes d'isolation électrique et de bonne conductivité thermique simultanément qui pourrait impliquer des

courts circuits critiques. Pour ces motifs, M. Ben abbas et B.E. Marir, [36] ont proposé un nouveau modèle de collecteur hybride (PV/T) dans leur travail.

Le nouveau modèle d'hybride (NCH) proposé par les auteurs comprend une tubulure en verre avec un fluide caloporteur transparent en avant des cellules solaires (Fig.2.59).

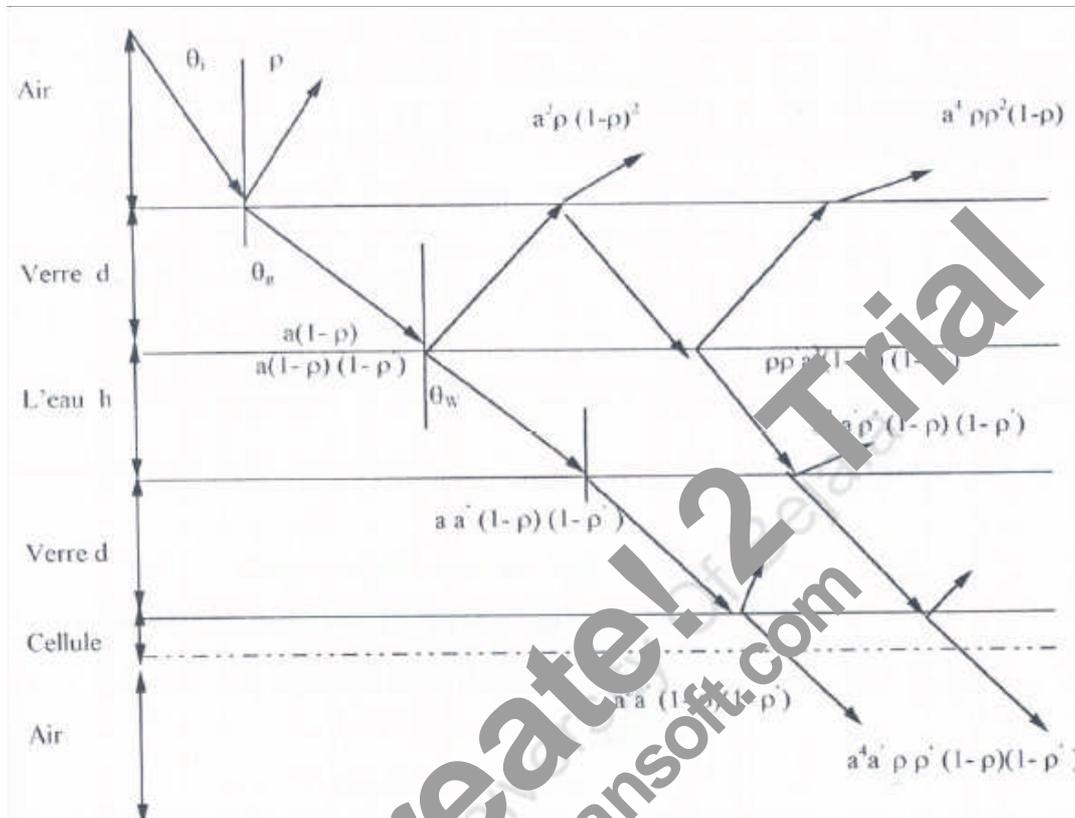


Fig. 2.59 : Transmission du rayon solaire à travers le NCH (a et a' sont des paramètres qui sont fonction du coefficient d'absorption ρ et ρ' indiquent la réflexion), [36].

L'étude énergétique du collecteur (NCH) doit être effectuée en deux parties, en vue de traiter le rendement électrique et le rendement thermique de ce collecteur (PV/T). Pour cela, une simulation de la partie électrique et une autre pour la partie thermique ont été effectuées par les auteurs.

Des résultats comparatifs pour différents matériaux de cellules solaires et leurs rendements sont effectuées pour le collecteur hybride (PV/T) pour un climat tempéré continental. Cependant, l'élément de comparaison le plus significatif entre le nouveau collecteur hybride (NCH) et le collecteur hybride conventionnel (CHC) est le rendement global. Ils ont constaté que ce dernier est de l'ordre pratiquement du double, pour une même surface et sans utilisation de plaque d'absorption.

Dans une étude, N. Hamani et al. [37] sont intéressés à la simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration de type cylindro-parabolique dans le site de Biskra. Les auteurs ont traité deux parties essentielles pour étudier le phénomène de chauffage de l'eau, la première partie est consacrée à la simulation du flux solaire incident dans un plan incliné qui correspond à la latitude du lieu considéré. La deuxième partie est réservée à l'étude

des échanges thermiques dans le tube absorbeur du capteur pour déterminer la température de sortie du fluide caloporteur qui est l'eau dans ce cas là.

Le concentrateur solaire ainsi étudié, contient un tube circulaire en cuivre avec une couche sélective convenable (absorbeur), et il est entouré par une enveloppe en verre concentrique situé le long de la ligne focale d'un réflecteur cylindro-parabolique (Fig.2.60).

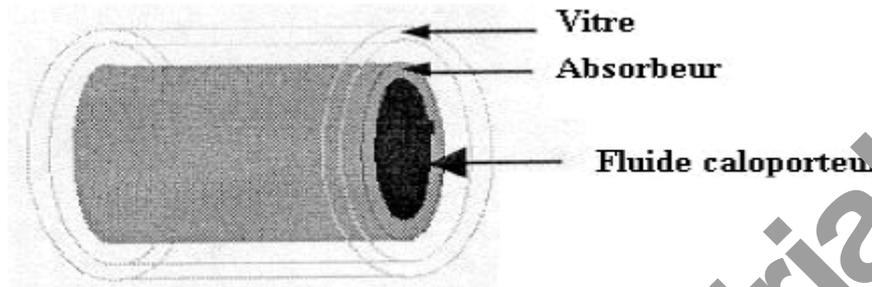


Fig. 2.60 a : Schéma d'un élément du tube absorbeur [37].

Une modélisation mathématique a été établie par les auteurs pour contrôler la température de sortie du fluide, ainsi que les températures de l'absorbeur et de la vitre.

La simulation du processus est effectuée heure par heure, du lever du soleil jusqu'au coucher. Un programme informatique en langage Matlab5.3 est développé pour la simulation de la température de sortie du fluide caloporteur en comparaison avec celle du tube absorbeur et de la vitre en fonction du temps et de la position géographique du lieu.

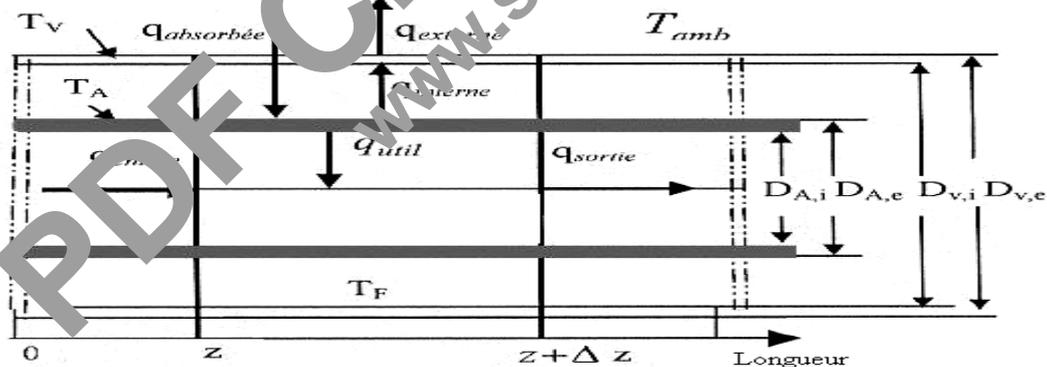


Fig. 2.60 b : Bilan thermique d'un élément de surface du collecteur cylindro-parabolique, [37].

Ils ont étudié l'évolution de la température de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre pour le 21 Mars, le 21 juin, le 21 Septembre et le 21 Décembre, l'évolution du coefficient des pertes thermiques en fonction de la température de l'absorbeur pour trois valeurs d'émissivité et l'évolution de la température de sortie du fluide en fonction de la longueur du tube absorbeur pour trois valeurs du rayonnement solaire incident (Fig. 2.61). Un écart de température considérable est mis en évidence entre l'entrée et la sortie du capteur pour les jours du test étudiés.

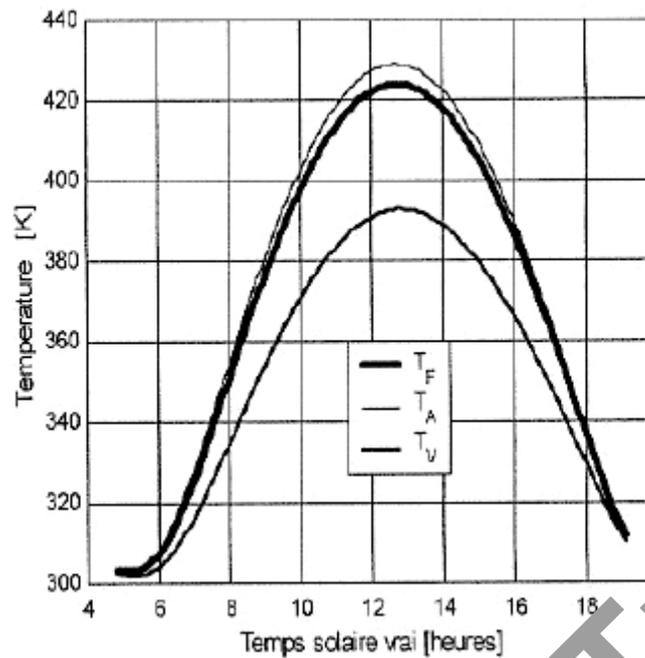


Fig. 2.61 a : Evolution de la température de sortie du fluide, de l'absorbeur et de la vitre pour le 21 Juin [37].

L'étude numérique montre qu'une température au voisinage de 400 K est particulièrement obtenue au midi solaire vrai pour le 21 Juin dans le site de Biskra. Les résultats obtenus sont très encourageants pour des applications industrielles telles que la production de l'eau surchauffée. Ces résultats montrent clairement que les températures de sorties varient en fonction du flux solaire incident et des conditions climatiques environnantes.

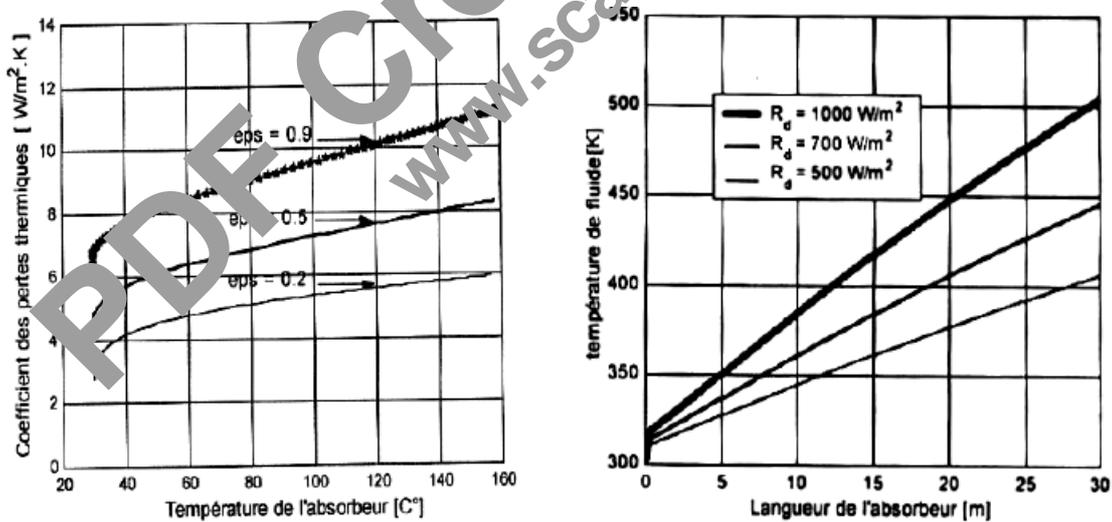


Fig. 2.61 b : Evolution du coefficient des pertes thermiques en fonction de la température de l'absorbeur pour trois valeurs d'émissivité (gauche), évolution de la température de sortie du fluide en fonction de la longueur du tube absorbeur pour trois valeurs du rayonnement incident (droite) [37].

2.6.7-TRAVAUX SUR LA PRODUCTION D'AUTRES ENERGIES PAR UTILISATION DE L' ENERGIE SOLAIRE :

Les données météorologiques et radio métriques de la région de l'extrême sud Algérien et plus particulièrement de la région d'Adrar sont revues par R. Boudries-Khellaf et al. [38], afin d'étudier la potentialité de la production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelable au grand sud Algérien, en particulier pour le solaire et l'éolien.

L'intense insolation, les vents importants, la quantité suffisante d'eau, les vastes espaces pour l'installation des systèmes de collecte et de conversion de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne font de cette région une place de choix pour la production de l'hydrogène solaire.

Le développement de ces régions passe par la mise en valeur de ses richesses naturelles et plus particulièrement ses potentiels solaire et éolien. Toutefois, l'exploitation d'une manière effective et viable de cet immense potentiel passe par la conversion des énergies solaire et éolienne en un vecteur énergétique versatile. L'hydrogène solaire apparaît aujourd'hui comme le meilleur candidat.

Dans ce travail, des systèmes de production d'hydrogène solaire par un photovoltaïque électrolyse et l'autre éolien électrolyse sont proposés.

Les variations de la moyenne mensuelle de la durée d'insolation journalière, de la moyenne mensuelle de la nébulosité totale et de la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire globale journalière sur plan incliné à la latitude d'Adrar en fonction du mois sont étudiées.

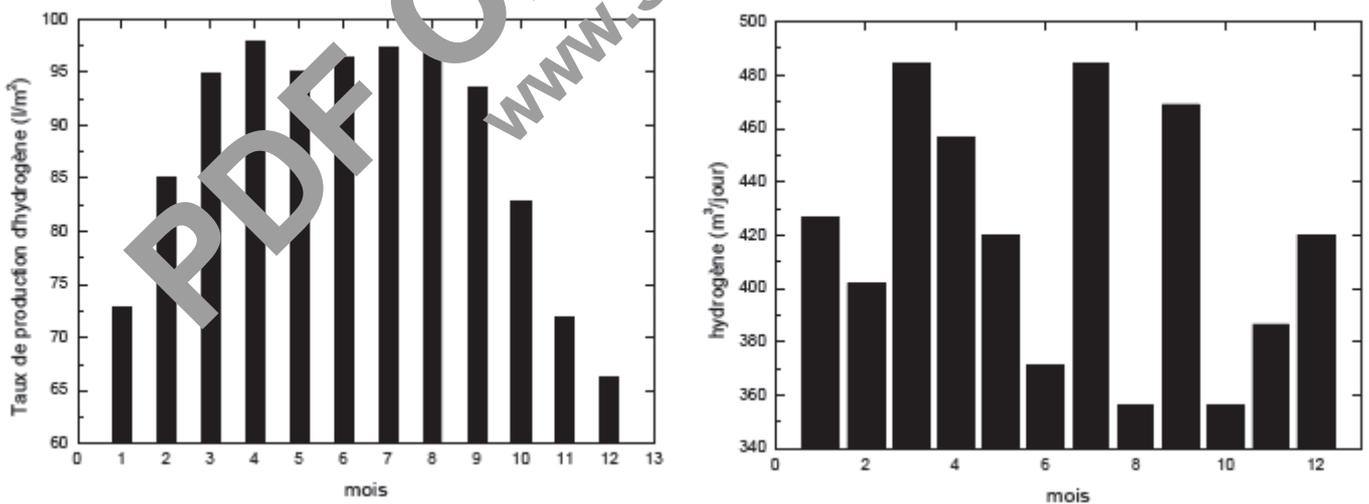


Fig. 2.62 : Evolution mensuelle de la production d'hydrogène par système PV électrolyse (haut) et par système éolien électrolyse (bas) dans la région d'Adrar, [38].

Les variations de la direction du vent au cours des mois de l'année et de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent moyen à 50 m au dessus du sol sont aussi étudiées.

La pluviométrie et l'humidité relative dans la région d'Adrar sont discutées. L'existence d'une nappe aquifère attribuée à l'Albienne peut jouer un rôle majeur dans le développement de la région, le potentiel hydrique est alors une réserve très importante.

Une estimation pour chaque système, du potentiel de production d'hydrogène, annuel, mensuel et saisonnier est menée. Elle a été obtenue en se basant sur les rendements des différents composants du système d'électrolyse et les moyennes annuelles ou les moyennes mensuelles de l'irradiation globale journalière pour les dix dernières années. Les résultats obtenus sont discutés dans le cadre du développement durable de la région (Fig. 2.62).

La disponibilité de l'énergie solaire importante, gratuite et prometteuse à la région d'Adrar a conduit K. Hadri et M. Khellafi, [39] à l'exploiter comme source d'énergie calorifique pour faire fonctionner un digesteur pour la production de la bioénergie par le procédé de méthanisation. Dans leur travail, ils ont étudié et réalisé un digesteur de type Batch de capacité 11 litres et dont la couvercle joue le rôle d'un capteur solaire, servant à alimenter le digesteur par l'énergie calorifique nécessaire pour maintenir une température favorable à la méthanisation.

Le digesteur ainsi réalisé, est composé de deux parties essentielles, un bac pour la digestion du substrat, un capteur solaire qui sert en même temps comme couvercle et source d'énergie calorifique pour le digesteur.

Les températures récoltées à l'intérieur du digesteur durant une période de trois mois, allant du mois d'Avril au mois de Juin sont dans l'intervalle de 25° C à 45° C, favorisant ainsi une production significative en biogaz (Fig. 2.63).

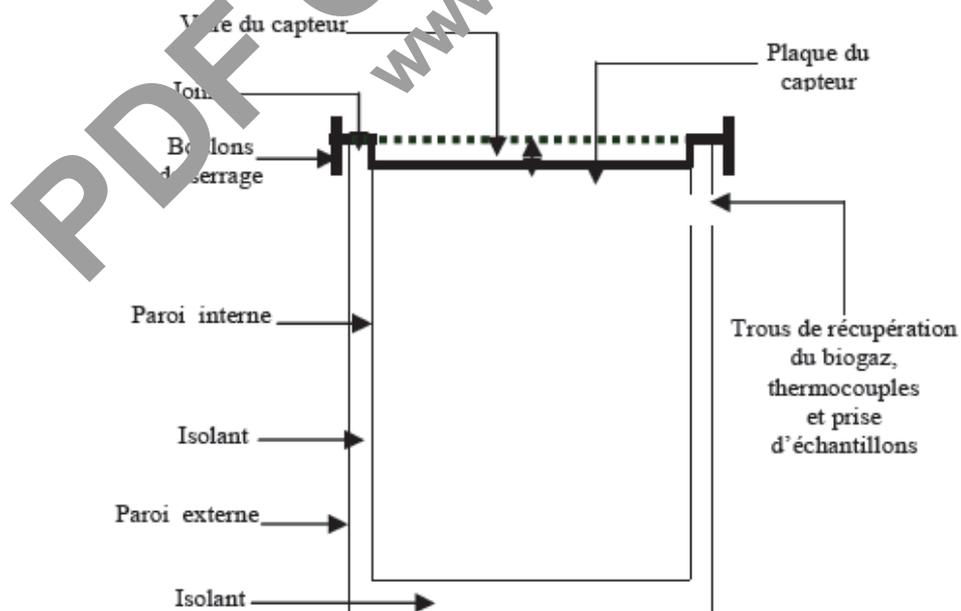


Fig. 2.63 : Schéma descriptif du digesteur solaire de type Batch, [39].

Les résultats obtenus confirment que l'utilisation du couvert pour le capteur solaire s'est avérée nécessaire pendant la période nocturne afin d'éviter la diminution de la température au-dessous de 25°C (Fig. 2.64).

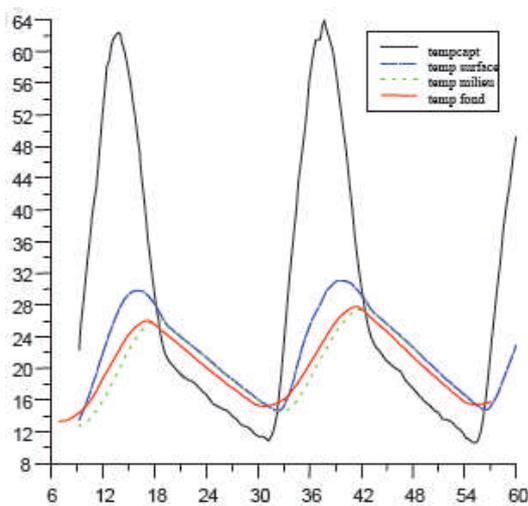


Fig. 2.64 a : Variation des températures du substrat au cours des journées du 24 et 25 Avril 2006 sans couvert [39].

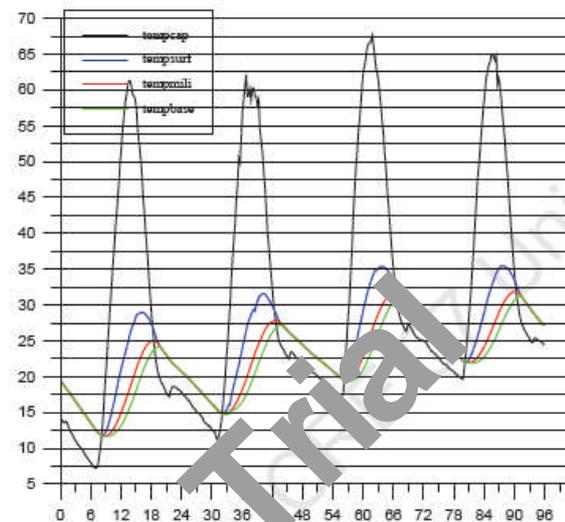


Fig. 2.64 b : Variation des températures du substrat au cours des journées du 25, 26, 27 et 28 Juin 2006 avec couvert, [39].

2.7- CONCLUSION :

Plusieurs travaux de recherche sur les applications de l'énergie solaire concernant l'Algérie sont étudiés et examinés, portant sur la productivité, le rendement, l'amélioration de la rentabilité et des performances des systèmes énergétiques solaires. Ces travaux ainsi proposés traitent plusieurs filières utilisant de l'énergie solaire comme source d'énergie, à savoir : le chauffage, le séchage, la distillation, le froid, la climatisation, et la production de l'énergie électrique.

Malgré ces études, les efforts retenus dans ce domaine des applications de l'énergie solaire en Algérie restent encore fort limités et ne favorisant pas à une concrétisation réelle pour l'exploitation de la richesse en ressources énergétiques solaires. En effet, le chauffage solaire est traité d'une façon appréciable, son application peut satisfaire à des résultats remarquables que ce soit pour la production d'eau chaude sanitaire, que pour le chauffage des habitations.

Le séchage solaire peut aussi donner des résultats sûrs et garantis si on intensifie les efforts de recherche, en se basant sur les méthodes de dimensionnement les plus technologiquement avancées de ses systèmes. Ses applications pour les produits agro-alimentaires sont devenues importantes.

La distillation solaire est également traitée, mais son rendement reste encore au-dessous de la moyenne. Son développement nécessite de faire des efforts de recherche pour améliorer l'efficacité

de ses systèmes. Cette filière est bien convenable pour le traitement des eaux salées et de mer surtout pour les endroits connaissant des défaillances en eaux douces.

On remarque que le froid solaire est totalement abandonné dans les études de recherche, or son importance est remarquable devant cet immense potentiel énergétique solaire que possède l'Algérie. Seuls, quelques travaux généraux concernant la climatisation ont été effectués n'aboutissant qu'à des informations générales sur ce sujet. Alors que pour l'avenir, il sera nécessaire de donner une importante préoccupation pour le sujet de froid solaire en Algérie, afin d'exploiter au maximum les ressources énergétiques solaires d'une part, et d'autre part de garantir les besoins en froid et climatisation surtout pour les endroits isolés.

Concernant la production de l'énergie électrique, seuls les systèmes de conversion photovoltaïques sont traités et examinés par quelques articles, il reste aussi à donner des considérations pour les systèmes de conversion thermiques qui semblent avoir une grande importance et peuvent donner des bons résultats en matière de la production de l'énergie électrique contribuant au développement de l'économie nationale.

Aussi, l'exploitation de l'énergie solaire pour la production d'autres formes d'énergies telles que l'hydrogène solaire et la bioénergie, peut conduire à des économies importantes sur le développement de l'énergie en Algérie. Pour réaliser des meilleurs résultats dans ce domaine, il est nécessaire de faire des efforts de recherche conduisant à la bonne maîtrise de production de ces énergies et ensuite, à leurs utilisations aux différentes applications.

Même s'il y a des études effectuées pour améliorer les performances des systèmes énergétiques solaires, le plus important ici pour confirmer ce but et pour arriver à des meilleurs résultats, est de baser les études de recherche sur les éléments de conversion d'énergie solaire représentés par les capteurs solaires que ce soit à concentration ou non. L'augmentation de la productivité et du rendement de ces installations solaires passe impérativement par les meilleures conceptions de ses capteurs solaires, spécifiquement pour leurs formes, les matières de fabrication de ses composants, et leurs caractéristiques géométriques de fonctionnement.

Pour garantir les performances de ces installations, il faut les connaître et les qualifier par le développement des méthodes de dimensionnement et de simulation les plus avancées technologiquement, et développer les composants de bonnes qualités conformément aux normes et aux spécifications techniques, car toute erreur peut pénaliser l'utilisation de l'énergie solaire en Algérie.

Dans ce cadre, il serait hautement bénéfique et rentable de faire une véritable coordination et coopération entre différents utilisateurs d'énergie et équipements solaires en tant que concepteurs et

estimateurs lors de l'achat ou de l'acquisition de ces équipements pour connaître leur réelle performance, rendement et adaptation aux différents climats de l'Algérie.

On peut dire finalement, que la situation géographique et les conditions climatiques de l'Algérie sont très favorables pour l'utilisation de l'énergie solaire dans les différents domaines des applications solaires. Il reste donc, à prouver la faisabilité technique et l'intérêt socio-économique de telles installations solaires.

2.8- REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] EL HASSAN ACHOUYAB et BENNASSER BAHRAR, "Modélisation et conception d'un chauffe-eau solaire" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [2] MOUHAMED BEN HAMMOU, ABDELWAHAB BOUBEGHAL et SOFIANE AMARA, "Etude d'un système photo thermique de production et de stockage d'eau chaude sanitaire", International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [3] F. BOUHIRED, M. ZELMAT et M. IEL AMEL, "Contrôle à distance d'une installation de production d'eau chaude solaire" international conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [4] R. KHACHI, B. BENYOUCHE et M. BELHAMEL, "système solaire combiné" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [5] R. SELLA MI, M. ABBAS, H. BENDJEBBAS et M. AMIRAT, "Etude d'un chauffe-eau solaire couplé à un cumulus électrique : cas d'utilisation réel" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [6] A. BOUBEGHAL, M. BEN HAMMOU, S. OUEJDI, H. MOUNGAR, L. AMER et B. OMARI, "Etude théorique et expérimentable des deux capteurs à air type serre et type plan" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [7] A. IDLIMAM, M. KOUHILA, M. KAOUA, "Modélisation expérimentale et théorique de la cinétique de séchage par énergie solaire de la plante guérissante (*Zygophyllum gaetillum*)"

- International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [8] S. KHERROUR, A. BOUHADJAR et L. SERRIR, "Etude expérimentale d'un séchoir solaire direct type serre dans la zone de Ghardaïa" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [9] OUDJEDI SAMIR, BOUBGHAL ABDELOUAHAB, BRAHAM WAFI, CHERGUI TOUFIK et BELHAMRIE AZEDDINE, "simulation numérique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage de tomate" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [10] SABRI YUCEF-ALI, "Etude des performances d'un séchoir solaire" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [11] W. TAANE, G. KAOUA, S. IGOUG et Z. NEFFAH, "Evaluation des performances d'un capteur plan à air muni de chicanes" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [12] BEN HAMMOU MOUHAMED, BOUBGHAL ABDELOUAHAB, GAHGAH MORAD et AMARA SOFIANE, "Impact du couplage d'un capteur plan avec un distillateur solaire sur la rentabilité du système en matière de quantité d'eau distillée produite" International conference on renewable energie ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [13] MEBAREK BOUKAF, AREZKI HAKMIM et M'HAMMED AMMAR, "résultats préliminaires de l'expérimentation d'un distillateur vertical à deux bassins" International conference on renewable energie ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [14] N. BOUKERZAZA, A. CHAKER et Z. HADDAD, "Influence des paramètres externes et internes sur la production d'un distillateur solaire" International conference on renewable energie ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [15] Z. HADDAD, A. SHAKER et N. BOUKERZAZA, "Influence des paramètres externes sur le fonctionnement d'un système couplé distillateur sphérique-capteur solaire plan" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [16] NOUREDDINE RETIEL, FAOUZI ABDESSEMED et MOHAMMED BETTAHAR, "Etude expérimental d'un distillateur solaire plan amélioré" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

- [17] N. OUDJEHANI et A. TAHAKOURT, "Etude des performances thermiques des locaux d'habitation en utilisant des techniques passives en régions semi-arides" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [18] Z. BENSALD, C. ZIDANI, N.E. CHABANE SARI et B. BEN YUCEF "Réduction de la pollution par conception des maisons solaires économes" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [19] M. BERDJA, A. BENHABIELS, B. ABBAD, A. NOUI, S. SHIKH, K. DAOUD et L. OUFER, "Climatisation solaire en Algérie" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [20] A. DOBBI, Y. BABI, N. KAABI, N. HASSINI, and A. BELAID "Optimisation de la consommation d'énergie au niveau d'une installation de climatisation solaire système à absorption" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [21] HERMANN RIETSHEL (1974), "Traité de chauffage et de climatisation", Tome II Bordas.
- [22] R. F. MECHLOUCH, K. BENBRAHIM, and A. BENRAHIM, "Thermodynamic simulation of a solar absorption refrigeration cycle in transient mode using a concentrator as heat source" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [23] H. DERBAL, M. BELFAMEL et A. BEN ZAOU, "Projet de la centrale thermo-solaire à cycle combiné intégré de Hssi R'mel, Laghouat, Algérie" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [24] D. REKIOUA, M. ROUMILA et T. REKIOUA, "Etude d'une centrale hybride photovoltaïque-éolien-diesel" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [25] AMEGHCHOUCHE MERZAKA, BEN MOUSSA HOCINE, HAZEM AHMED et BEN DERRADJI AMMAR, "Réduction des pertes thermiques pour l'absorbeur d'un concentrateur cylindro-parabolique pour différents gaz" international conférence on Renewable Energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [26] A. BOUBEGHAL, M. BEN HAMMOU, H. MOUNGAR L. AMER, B. OMARI et S. OUEJDI, "Etude thermique d'un système solaire pour le séchage des produits agro-alimentaires" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

- [27] A. BOURAS et N. BELLAL, "L'effet des paramètres externes sur un capteur solaire plan incliné" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [28] S. BEN LAHMIDI, N. MOUMMI, A. MOUMMI, K. AOUES, N. CHOUCANE et A. BRIMA, "Contribution à la réalisation d'un logiciel de simulation des performances des systèmes solaires" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [29] L. SERIR, H. BEN MOUSSA et K. MESMOUDI, "Possibilités et limites de système de rafraîchissement des serres agricoles dans la zone climatique du littoral" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [30] K. TAHRI et B. BENYOUCEF, "Contribution à l'étude d'un générateur photovoltaïque doté de systèmes de suivi du soleil. Application aux sites de Tlemcen et Bouzareah" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [31] M. TOUNSI, H. BEKTACHE et N. NASRI, "outil d'aide à la décision dans les applications solaires" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [32] BENDIB TOUFIK et DJEFFAL FAÏZELI, "Commande automatique d'un système de poursuite solaire à deux axes basé d'un microcontrôleur PIC16F84A" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [33] SALAH ABDALLAH et SALEM NUMEH, "Two axes sun tracking system with PLC control" Energy Conversion and Management, vol.45, July (2004), PP. 1931-1939.
- [34] SALAH ABDALLAH, A. ELQADAN, et V. HARNUDEH, "Two axes sun tracking system with feedback control on the basis of PIC microcontrollers" Applied science university, Amman 11931 Jordan, (2004).
- [35] C. GEORGE BAKOS, "Design and construction of a two axis sun tracking system for parabolic trough collector PTC efficiency improvement" renewable Energy, Vol.31, December (2006), PP.2411-2421.
- [36] M. BENABBAS et B.E. MARIR, "Modélisation de nouvelle collection hybride PV/T" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

- [37] N. HAMANI, A. MOUMMI, N. MOUMMI, A. SAADI et Z. MOKHTARI, "simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de BISKRA" Revue des Energies renouvelables, vol.10 N°2 (2007), PP. 215-224.
- [38] R. BOUDRIS-KHELLAF, M. BELHAMEL et R. DIZENE, "Potentialité de la production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables au grand sud Algérien" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [39] K. HADRI et M. KHELLAFI, "Production du bioénergie en utilisant de l'énergie solaire" International conference on renewable energies ICRE 07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 3

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 3

ESTIMATION DU GISEMENT EOLIEN

3.1-INTRODUCTION :

L'énergie éolienne a été utilisée par l'homme depuis des milliers d'années, les perses de l'antiquité utilisaient déjà l'énergie éolienne pour le pompage d'eau. Le monde a été exploré à l'aide de navires entraînés par le vent bien avant l'invention du moteur. En 1920, un grand nombre d'éoliennes servaient à pomper l'eau et à fournir d'électricité ont été installées à travers le monde. Dans les années 50, des centaines d'éoliennes étaient encore utilisées en Algérie pour le pompage de l'eau.

Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer l'énergie des combustibles fossiles.

Il est clair que pour optimiser des systèmes éoliens en un site donné, il est nécessaire de connaître les potentialités énergétiques du site d'installation, ainsi que les caractéristiques de la machine.

L'estimation des ressources en énergie éolienne sur un site est une difficulté majeure. Contrairement aux réserves en combustibles fossiles, la quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour. La quantité d'énergie qui peut être réellement produite par la mise en œuvre des systèmes éoliens à l'échelle de la nation, dépend de la façon significative des caractéristiques, du rendement espéré, du dimensionnement, et de la répartition horizontale des éoliennes.

Pour caractériser les ressources en énergie éolienne, il y a lieu de distinguer l'énergie éolienne disponible, qui est l'énergie que pourrait transformer une éolienne idéale de rendement unité, et l'énergie éolienne récupérable, qui dépend des caractéristiques du système énergétique éolien.

Un certain nombre de caractéristiques du vent sont susceptibles d'avoir une influence sur la conception et le rendement des éoliennes, en particulier les lois de distribution de la vitesse et de la direction, les variations avec la hauteur, l'influence de la topographie, et les lois statistiques concernant les rafales et les valeurs extrêmes.

Un nombre de relations empiriques ont ainsi été développées. La théorie de similitude, établie par Monin-Obukov (1955), constitue la base de tous les travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse. Une étude statistique des données du vent (vitesse et direction) devra être utilisée pour le calcul du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné. Ceci permettra le choix des sites ventés susceptibles de recevoir des systèmes énergétiques éoliens.

On a abordé le chapitre par quelques rappels sur le vent et sur les données du vent (vitesse et direction) en précisant l'origine et la caractérisation énergétique horizontale de sa vitesse. Les modèles d'ajustement de la distribution des vitesses du vent sont définis, les modèles usuels sont la distribution de Weibull, la distribution hybride de Weibull, et la distribution de Rayleigh. Certains travaux sur le profil du vent et sur l'extrapolation verticale et l'interpolation horizontale de la vitesse du vent, ainsi que sur l'extrapolation des paramètres de Weibull sont tous cités. Enfin, on termine par une analyse des travaux de recherche sur le calcul du potentiel énergétique éolien en Algérie pour quantifier le gisement éolien dans ce pays.

3.2-ORIGINE DU VENT :

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre. Ces déplacements sont influencés par une force appelée : force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud.

On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si ils n'étaient pas perturbés par les orages, les obstacles naturels, ou par les dépressions cycloniques.

On peut considérer le vent comme une grandeur vectorielle tridimensionnelle, qui peut être caractérisée par un vecteur vent moyen auquel se superposent de petites variations aléatoires. Le vecteur vent moyen pourra être représenté par ses trois composantes. La vitesse du vent peut être exprimée en m/s ou Km/h et la direction du vent est généralement exprimée en degrés (Fig. 3.1).

Les données du vent observées dans le réseau météorologique sont rassemblées et conservées au service de la météorologie. Pour de nombreux types d'études, ces données constituent une aide précieuse dans les phases préliminaires. Dans quelques cas, naturellement, il est nécessaire de pratiquer des mesures sur place après que les évaluations préliminaires aient permis de procéder à un premier choix des sites possibles.

3.3-CARACTERISATION ENERGETIQUE HORIZONTALE DE LA VITESSE DU VENT :

La puissance éolienne moyenne disponible, associée à une circulation d'une masse à une vitesse V et agissant sur une surface A , de la roue d'une éolienne s'écrit, [1] :

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (3.1)$$

ρ : désigne la masse volumique de l'air, paramètre variant avec l'altitude et la température. Mais généralement considérée comme constante et avoisinant en moyenne 1.25 Kg/m^3 .

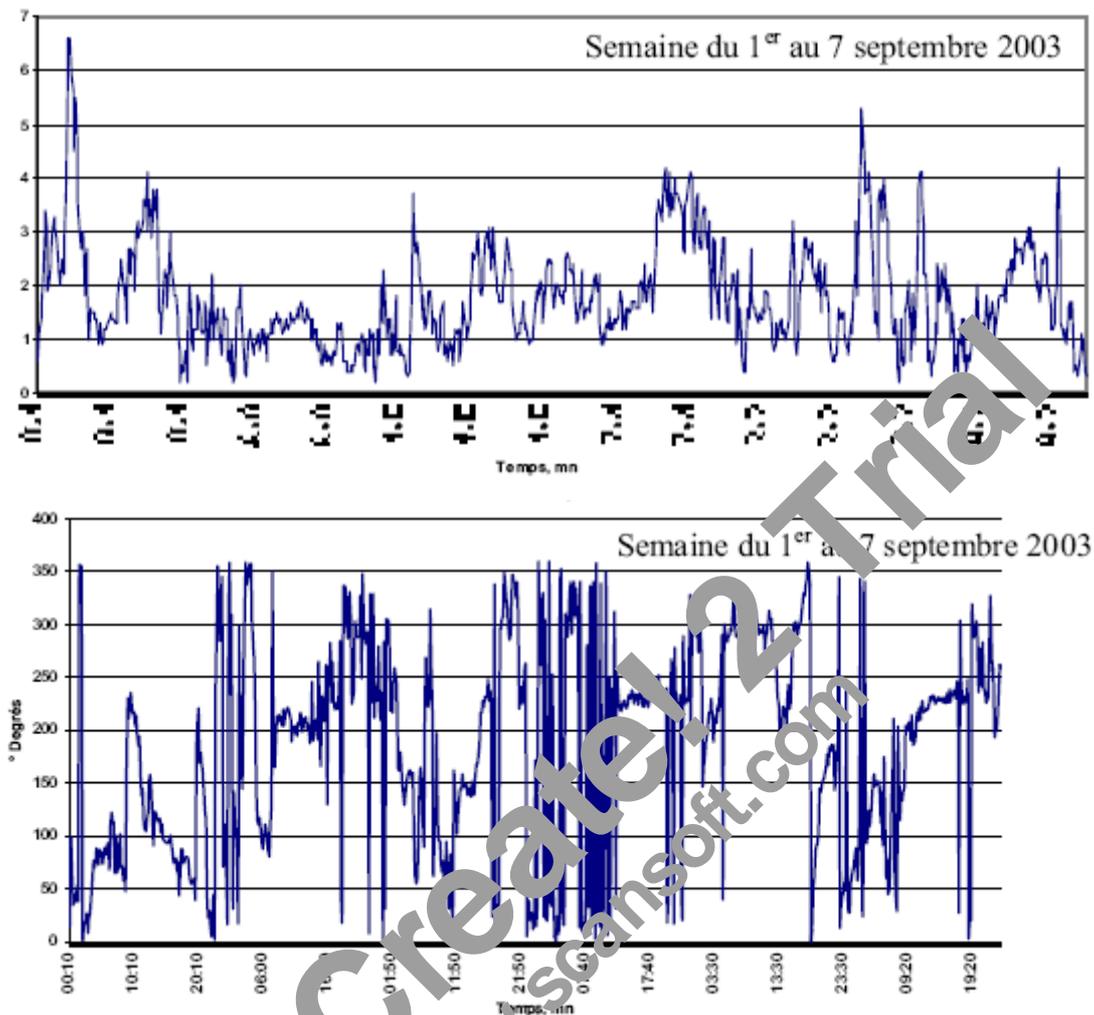


Fig. 3.1 : Mesures instantanées de la vitesse (haut) et de la direction (bas) du vent enregistrées à Bouzaréah.

L'expression précédente montre que la puissance disponible varie avec la vitesse cubique moyenne du vent. Cette dernière est déterminée à partir d'un traitement statistique des données du vent brutes et le calcul des fréquences à un seuil donné de vitesse.

3.4-MODELES D'AJUSTEMENT DE LA DISTRIBUTION DES VITESSES DU VENT :

De part la forme des nuages de points obtenus, les études de modélisation de la distribution des vitesses du vent ont été orientées vers des modèles associant puissance et exponentielle. Les modèles usuels étant : la distribution de Weibull, la distribution hybride de Weibull, et la distribution de Rayleigh.

3.4.1-DISTRIBUTION DE WEIBULL :

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses du vent est la loi de distribution de Weibull, sa densité de probabilité se présente sous la forme, [2] :

$$f(V) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad (3.2)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

k et c : sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) sans dimension, caractérise la forme de la distribution de fréquence, alors que le paramètre c (facteur d'échelle) détermine la qualité du vent, il a la dimension d'une vitesse. La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

La fonction de répartition est donnée par :

$$f(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (3.3)$$

$$f(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{c}\right)^k\right) \quad (3.4)$$

Où, V : est la vitesse du vent (m/s).

V_x : est la vitesse du vent (m/s).

$f(V)$: fréquences des vitesses moyennes tri horaires.

3.4.2-DISTRIBUTION HYBRIDE DE WEIBULL :

La distribution hybride de Weibull, est utilisée lorsque la fréquence des vents calmes enregistrée, sur un site donné, est supérieure ou égale à 15%. En effet, cette proportion ne peut pas être négligée et doit être prise en compte lors de la caractérisation d'un site du point de vue éolien. Cette distribution s'écrit :

$$f(V) = (1 - ff_0) \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right) \quad \text{pour } V > 0 \quad (3.5)$$

$$f(V) = ff_0 \quad \text{pour } V = 0 \quad (3.6)$$

Où, ff_0 : représente la fréquence des vents calmes.

3.4.3-DISTRIBUTION DE RAYLEIGH :

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull, pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2. Sa densité de probabilité est donnée par :

$$f(V) = 2 \frac{V}{c^2} \exp\left(-\left(\frac{V}{c}\right)^2\right) \quad (3.7)$$

Toutefois, la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites.

3.5-EXTRAPOLATION VERTICALE DES PARAMETRES VENT :

La détermination des caractéristiques éoliennes d'un site à la hauteur normalisée de 10 m du sol, est généralement insuffisante pour le dimensionnement d'un système énergétique éolien. Aussi, attendu que les données des vents fournies par les services météorologiques sont généralement mesurées à la hauteur standard de 10 m du sol. Les recherches se sont orientées vers l'extrapolation des paramètres vent à la hauteur de l'axe de l'éolienne. Certains travaux sur le profil du vent et l'extrapolation verticale de la vitesse du vent ont été effectués en développant des relations empiriques. Pour l'extrapolation verticale des paramètres de la vitesse du vent, on distingue généralement deux cas :

- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à court terme qui passe par l'extrapolation de la mesure de la vitesse du vent quasi instantanée moyennée sur une minute ou une heure.
- L'extrapolation verticale de la vitesse du vent à long terme liée aux résultats de l'étude statistique en occurrence par l'extrapolation des paramètres de Weibull.

Toutefois, les expressions de l'extrapolation sont établies à partir de l'analyse du profil vertical du vent.

3.6-PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT :

La majorité des travaux sur la détermination du profil vertical du vent dans la couche limite de surface, est basée sur la théorie de similitude de Monin-Obukov en 1954, [3] et les travaux de Businger en 1955, [4] établies pour les terrains plats et homogènes, ainsi que les travaux de C. A. Paulson en 1970, [5]. A. J. Dyer, [6] résume dans son papier, les formules empiriques établies par différents auteurs et compare les différentes expressions pour les conditions stables et instables de l'atmosphère.

Nieuwstadt, [7] propose une méthode simple pour le calcul de la vitesse de frottement et de l'échelle de température à partir des profils de vitesses et de températures pour différents types de sol. Pour cela, il a utilisé la méthode des moindres carrés. En comparant ses résultats aux méthodes et expérimentations déjà établies, l'auteur a trouvé une bonne concordance des résultats.

Les travaux de Van Wijk, [8] portent sur le test de la théorie de similitude au niveau de la mer. Les travaux de Lange, [9] portent sur la comparaison de trois modèles d'estimation de la rugosité et de la longueur de Monin-Obukov au niveau de la mer. A partir des données mesurées à 10m, l'auteur extrapole les vitesses du vent à 50 m et compare les résultats avec les mesures effectuées à cette altitude.

3.7-EXTRAPOLATION VERTICALE DE LA VITESSE DU VENT :

Les premiers travaux portant sur la détermination des formules d'extrapolation de la vitesse du vent d'un niveau z_1 à z_2 ont été effectués par C. G. Justus et A. S. Mikhaïl qui étudient la variation de la vitesse du vent, ainsi que les paramètres de Weibull en 1976, [10]. Le profil logarithmique, [11] est déduit à partir du rapport de profil vertical du vent. La loi de puissance permet l'extrapolation verticale de la vitesse du vent d'un niveau z_1 à z_2 . La loi de puissance modifiée est un modèle qui a pour but d'allier la théorie et l'expérimentation par l'introduction du paramètre de rugosité dans la loi de puissance. En effet, afin de combiner la précision du modèle théorique et la simplicité du modèle empirique, le modèle de la puissance modifiée a été proposé par Mikhaïl et C. G. Justus et al. en 1981, [12].

A travers leurs travaux sur le potentiel énergétique éolien au Maroc, H. Nfaoui et al. [13] optent pour l'utilisation d'une formule empirique dont l'exposant est un coefficient variable en fonction de la rugosité. Cette expression a été proposée lors de l'établissement de l'Atlas éolien Marocain, [14].

3.8-EXTRAPOLATION DES PARAMETRES DE WEIBULL :

En 1976, Justus et Mikhaïl ont proposé, pour une référence d'altitude initiale égale à 10 m, des formules d'extrapolation. repris par Poje [15], Justus a modifié en 1978, l'expression d'extrapolation des paramètres de Weibull en introduisant la rugosité du sol.

Pour une extrapolation à partir d'un niveau quelconque, Mikhaïl en 1985, [16] reprend les expressions d'extrapolation des paramètres proposés en 1976, en modifiant l'exposant. Il expose la formule de Spina et Richardson qui introduit le paramètre de rugosité du sol z_0 , en proposant une extrapolation du paramètre de forme.

3.9-INTERPOLATION HORIZONTALE DES PARAMETRES DU VENT :

Les services météorologiques fournissent des données brutes du vent (vitesses et directions) mesurées au niveau des stations météorologiques qui sont en général des aéroports et moyennées sur une période de trois heures. On a été amené à mettre au point des méthodes d'estimation du gisement éolien à partir des formules d'interpolation horizontale des données du vent.

Toutefois, l'utilisation potentielle a besoin de données estimées en tout point du territoire présentant un besoin énergétique ou autre. D'où, la nécessité d'établissement d'une carte des vents moyennant l'utilisation d'une méthode d'interpolation appropriée. Une fois la carte établie, les zones signalées comme particulièrement ventées nécessitent alors une étude microclimatique pour la confirmation des résultats de l'interpolation.

3.10-VARIATION TEMPORELLE DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT :

Pour connaître l'importance du vent en un point donné, il suffit de déterminer la vitesse moyenne arithmétique annuelle pondérée, calculée sur un échantillon de 10 années minimum. Cette dernière, donne un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur un site donné. Par ailleurs, les vents varient différemment selon la saison, la journée et l'année. Cette variation doit être déterminée puisqu'elle permet d'adapter le dimensionnement des systèmes énergétiques éoliens aux besoins énergétiques qui peuvent varier suivant les saisons, la journée ou l'année.

La variation saisonnière est déterminée par l'établissement d'études à l'échelle mensuelle. La variation diurne est établie à l'échelle horaire. La variation plurimennale requiert de longues séries traitées à l'échelle de l'année.

3.11-TRAVAUX DE RECHERCHES SUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN :

L'identification des régions ventées de l'Algérie se fait par la représentation de la vitesse du vent sous forme de carte, ceci est pour deux objectifs :

Le premier est d'identifier les zones régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne, le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource éolienne à travers l'Algérie.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Les méthodes de calcul des vitesses du vent et des potentiels énergétiques éoliens développées par les chercheurs, permettent l'optimisation de la puissance produite en fonction de la hauteur d'emplacement des hélices des éoliennes. On remarque que la puissance augmente en fonction de la vitesse et de la hauteur. De là, on voit l'importance et l'intérêt de l'évaluation préliminaire des ressources éoliennes avant d'envisager toute exploitation de cette énergie.

Un grand nombre de pays ont établi leurs Atlas éoliens à partir des données mesurées au sol en établissant une interpolation spatiale tout en prenant en considération les conditions du sol, à savoir, la topographie, la rugosité et les obstacles. Les résultats obtenus sont ensuite extrapolés à l'aide de

la loi de puissance à 25 m et à 60 m du sol, et permettent ainsi de connaître l'évolution de la vitesse du vent à des altitudes représentant un intérêt énergétique pour des applications éoliennes.

Jusqu'aux années 80, les seules mesures des paramètres du vent disponibles en Algérie étaient rapportées dans les bulletins météorologiques de l'Office National de la Météorologie (ONM) qui donnent les vitesses et les fréquences moyennes des vents pour les différentes stations météorologiques.

En utilisant ces données, Said et al. [17] ont conclu que l'Algérie offre de faibles possibilités en matière d'utilisation de l'énergie du vent. Avec les mêmes données, Ben Saad, [18] a proposé une classification des vitesses du vent en fonction de la topographie du pays. Il a publié les vitesses et les fréquences moyennes de 22 stations, ainsi que les paramètres de Weibull pour Alger et Oran. Toutefois, ces résultats sont basés sur des mesures effectuées sur de petites séries de mesure.

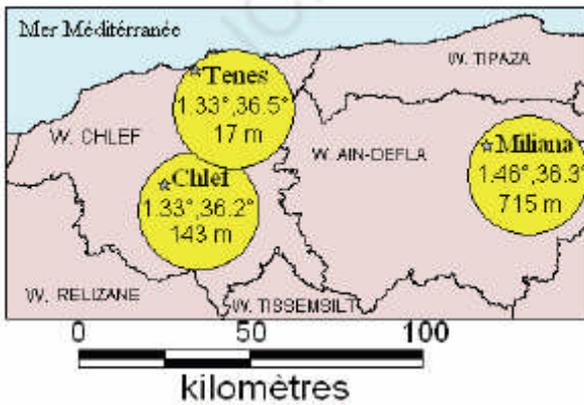
En 1990, Hammouche, [19] a édité l'Atlas du vent de l'Algérie donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations en utilisant la logiciel Wasp puis par la cartographie éolienne de l'Europe.

Les résultats sont donnés sous forme de tableaux regroupant les paramètres annuels de Weibull à 10, 50 et à 100 m, les fréquences directionnelles de vitesses pour un pas donné et les vitesses arithmétiques moyennes mensuelles et annuelles.

Les résultats de Hammouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par N. Kasbadji Merzouk, [20]. Cette carte a été améliorée pour le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 64 et en utilisant la distribution hybride de Weibull, [21].

Boukli Hacène et al. [22] ont effectué un travail qui a pour but d'établir un Atlas du vent concernant la région de Chelif (Fig. 3.2). Bien que, le vent est un élément dont l'étude s'avère très complexe, sa caractérisation est fonction de plusieurs paramètres tels que, la mesure de la vitesse du vent et de sa direction, l'effet de la rugosité du sol, l'effet des obstacles, l'effet de la stabilité de l'atmosphère... etc. Aussi, pour déterminer les potentialités éoliennes d'un site, il faut passer par un traitement statistique des mesures de la vitesse du vent. Il faut alors quantifier le gisement énergétique disponible par établissement d'un Atlas éolien de la région afin d'étudier les possibilités qui peuvent être offertes par l'utilisation de l'énergie éolienne aux différents besoins tels que le pompage de l'eau, l'éclairage ou autres.

En premier lieu, une étude statistique des mesures de vent a été effectuée par les auteurs, qui est basée sur la distribution de Weibull, permettant la détermination des vitesses moyennes annuelles du vent (Tableau 3.1).



Site	k	C_e , m/s	V_e , m/s	P_e , W/m ²
Ténès	2,4716	6,0924	5,4041	128,8578
Miliana	2,434	5,1076	4,5291	72,369
Chlef	1,9541	3,7307	3,3079	28,19913

Tableau 3.1 : Résultat de l'étude statistique, [22].

Fig. 3.2 : Position des stations étudiées (Région de Cheliff), [22].

Ceci a permis l'établissement de la carte du vent de la région étudiée. Ils ont créé une autre partie de l'étude à l'estimation du potentiel énergétique éolien de la vallée du Cheliff. Le tracé de l'Atlas de la densité de puissance de cette région a été effectué aussi.

Ils ont conclu après les analyses thématiques de la région étudiée, des résultats tels que, la zone littorale comme Ténès chef lieu et les communes limitrophes telles que, Abou el hassane, Sidi okacha et Sidi abderrahmane sont les plus ventées de la vallée du Cheliff (Fig. 3.3).

Ainsi, il est plus remarquable que Ténès reste encore le mieux approprié pour implanter des systèmes énergétiques éoliens rentables et performants qui seront utiles pour le pompage des eaux d'irrigation comme exemple, car les communes étudiées sont à vocation agricole.

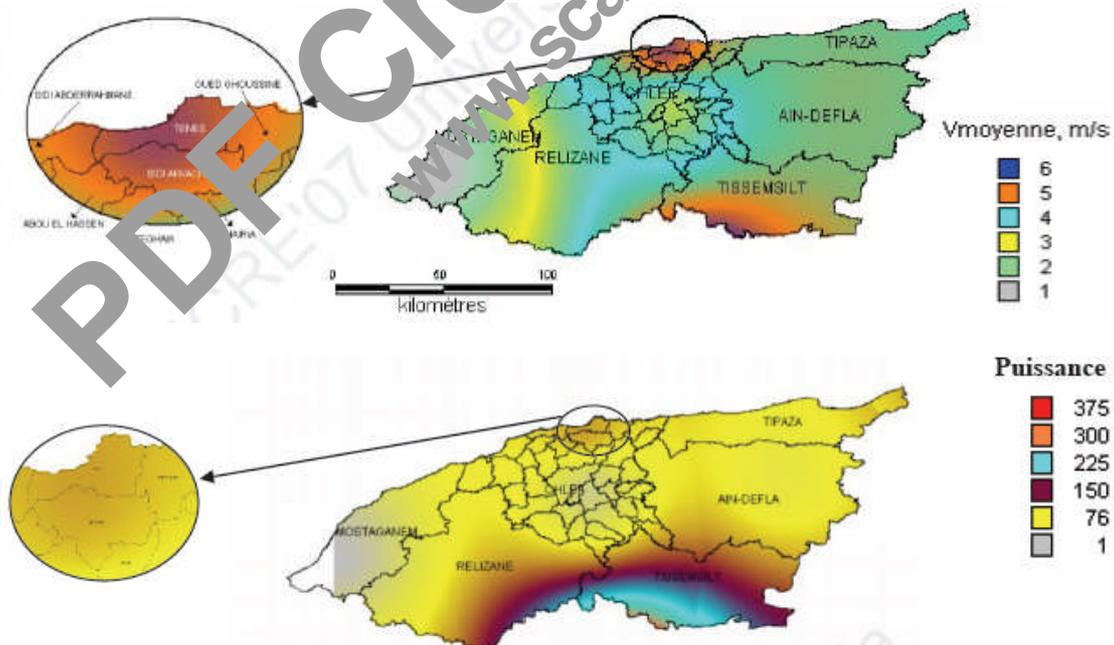


Fig. 3.3 : Atlas de la vitesse moyenne du vent (haut) et Atlas de la densité de puissance du vent (bas) de la vallée du Cheliff estimées à 10 m du sol, [22].

En perspective, il sera avantageux de s'intéresser au microclimat de la zone de Ténès et d'analyser d'une manière plus approfondie l'influence de tous les paramètres tels que, la rugosité du sol, l'effet d'obstacles, l'effet de la stabilité atmosphérique ...etc, sur la vitesse du vent de la région précitée.

Ben Atallah et Chegaar, [23] ont préoccupé à l'étude de l'évaluation du potentiel de vent aux quatre sites dans des régions différentes en Algérie. Ces sites sont : Alger, Bechar, Oran et Tamanrasset qui ont été étudié à l'ordre d'évaluer leur potentiel éolien selon la vitesse du vent enregistrée pendant une longue durée (Tableau 3.2).

Alors, avant d'établir une ferme éolienne, une étude de faisabilité du projet doit être faite, la première tâche est d'obtenir une connaissance suffisante du comportement de vent à l'endroit choisi. Ceci a pu être fourni par une analyse pour la distribution des vitesses du vent.

Station	Altitude	Latitude	Longitude
Oran	99	35.38	0.37W
Algiers	25	36.43	3.05E
Bechar	806	31.35	2.15E
Tamanrasset	1378	22.4	5.31E

Tableau 3.2 : Détail géographique des sites étudiés, [23].

Pour décrire le comportement du vent, il se trouve plusieurs distributions qui peuvent être utilisées dans ce contexte. Il faut faire une analyse des données de la vitesse du vent pour trouver la distribution de probabilité la plus adéquate qui adopte la meilleure des données, et cela se fait par la réalisation des essais sur les différentes distributions dites.

Pour accomplir cette tâche, les auteurs ont exécuté une analyse statistique des données de la vitesse du vent et une autre analyse de la réversion du potentiel de vent disponible. Les enregistrements de la vitesse du vent sont pris des stations de l'Office National Météorologique (ONM), les enregistrements ont consisté à des données horaires de la vitesse du vent sur une période de 18 ans. La hauteur de l'anémomètre utilisée pour mesurer le vent était de 10 m au dessus du niveau du sol. Les trois vitesses moyennes horaires des données pour Alger, Bechar, Oran et Tamanrasset sont rassemblées et analysées. Les essais montrent que la distribution de Weibull donne un bon ajustement aux données des vitesses du vent observées qui sera donc adaptée parmi les autres distributions.

Les paramètres de Weibull correspondants ont été estimés par l'utilisation de trois méthodes qui sont, méthode rapide, méthode des moindres carrés et méthode des vraisemblances des maximums afin de prévoir la densité de puissance du vent (Tableau 3.3).

Les résultats de l'étude obtenus sont traduis comme ainsi : la plus haute puissance moyenne a été trouvée à Oran avec 61.52 W/m² et l'analyse prouve que la distribution de Weibull convient par

excellence à représenter la probabilité des données de vitesse du vent pour l'Algérie. La puissance disponible du vent est très prometteuse pour des applications telles que, le pompage éolien de l'eau et l'électrification rurale surtout dans des endroits isolés.

Station	Annual wind speed (m/s)	Sensor Height (m)	Data source	Mean wind power Density[MWPD] (w/m ²)	Number of Days where WPD>MWPD (day/year)
Oran	3.9084	10	ONM	61.518	118
Algiers	2.9512	10	ONM	34.246	100
Bechar	3.9947	10	ONM	56.659	132
Tam	3.3395	10	ONM	42.143	108

Station	Quick method		Least squares method		maximum likelihood Method	
	$c(m/s)$	$k(-)$	$c(m/s)$	$k(-)$	$c(m/s)$	$k(-)$
Oran	4.411	2.314	4.372	2.582	4.426	2.311
Algiers	3.3215	1.8354	3.3062	1.8603	3.3259	1.8354
Bechar	4.4746	2.9819	4.4747	2.9932	4.4747	2.9819
Tamanrasset	3.7697	2.0506	3.7727	1.9917	3.7697	2.0506

Tableau 3.3 : Vitesse moyenne et densité de puissance du vent estimée (haut) et paramètres de Weibull calculés par les trois méthodes (bas) pour les quatre sites étudiés, [23].

Une estimation de la puissance annuelle moyenne de sortie d'une éolienne a été abordée par Maouedj et al. [24]. C'est un travail qui fait état des efforts développés concernant les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Sur les sites d'Adrar et de Tlemcen les auteurs ont présenté une modélisation et une simulation d'un système de conversion éolien. Par ailleurs, l'estimation des ressources en énergie éolienne présente une difficulté majeure. Contrairement aux ressources en combustibles fossiles, la quantité d'énergie éolienne disponible varie avec la saison et l'heure du jour. L'énergie éolienne est davantage influencée par la topographie que l'énergie solaire (Fig. 3.4).

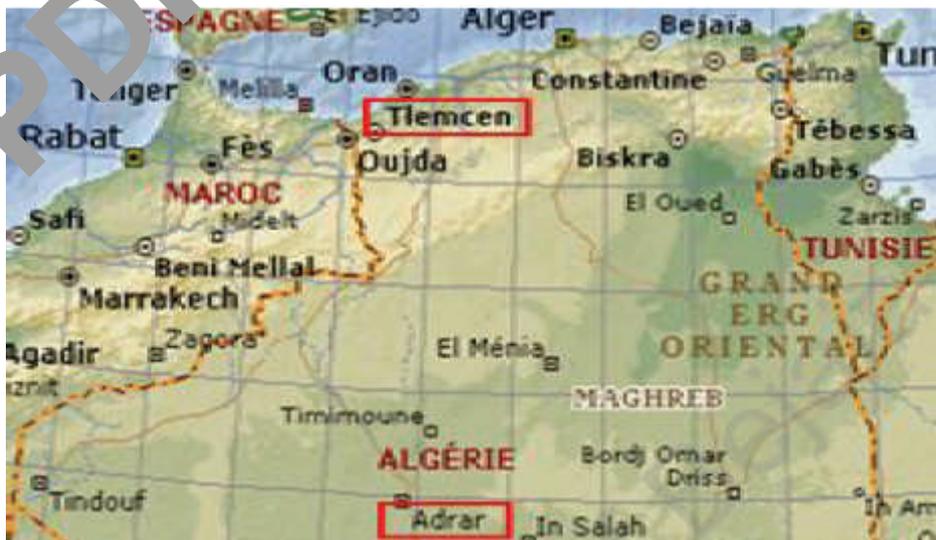


Fig. 3.4 : Situation géographique des sites de Tlemcen et d'Adrar, [24].

De plus, la quantité totale d'énergie éolienne convertible sur le territoire d'une nation dépend d'une façon significative des caractéristiques du vent, du rendement espéré, du dimensionnement et de la répartition horizontale des éoliennes.

Des paramètres météorologiques et radio métriques (en particulier les données de la vitesse du vent) concernant les deux sites précités ont été utilisées pour la détermination des paramètres de Weibull, paramètre de forme k et paramètre d'échelle c ainsi que la puissance récupérée en fonction de l'altitude et de la rugosité des sites (Fig. 3.5).

Les résultats de l'étude ont confirmé que le potentiel énergétique récupérable au site d'Adrar est très important (une vitesse moyenne supérieure à 6 m/s) par rapport au site de Tlemcen (une vitesse moyenne de 3.8 m/s).

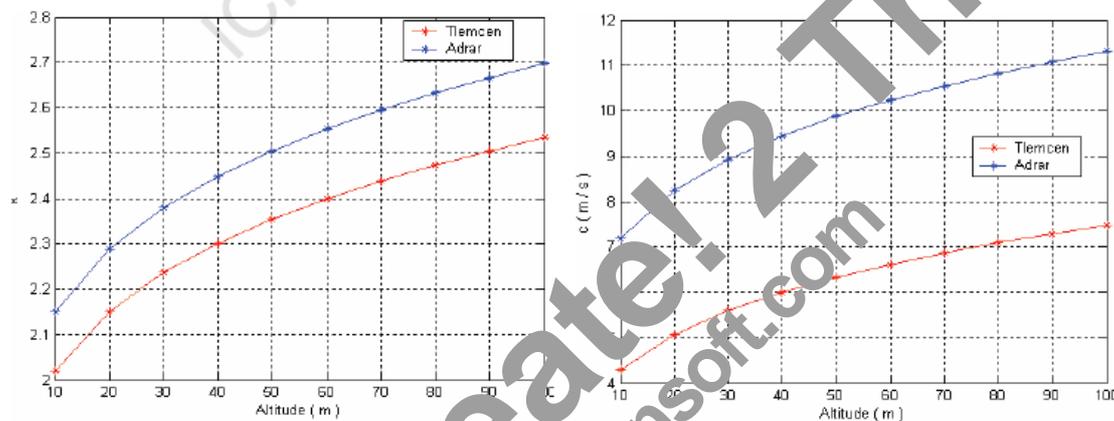


Fig. 3.5 : Variations des paramètres de forme k et d'échelle c selon l'altitude pour les deux sites étudiés, [24].

La densité de puissance moyenne annuelle disponible sur le site de Tlemcen à 10 m d'altitude par rapport au niveau du sol est estimée à 577.69 kWh/m².an et au site d'Adrar pour la même hauteur est égale à 2481.3 kWh/m².an.

Après une correction de la masse volumique de l'air (coefficient de correction thermique de pression et de l'altitude), la densité de puissance moyenne annuelle récupérable et corrigée sur le site de Tlemcen est de 291.82 kWh/m².an et pour le site d'Adrar est de 1355.90 kWh/m².an. Généralement, les vitesses sont mesurées à une hauteur normalisée égale à 10 m du sol, mais les machines commercialisées sont installées à des hauteurs supérieures ou égales à 25 m du sol, donc une correction des caractéristiques des sites sera indispensable. Par utilisation d'un modèle d'extrapolation verticale, la densité de puissance moyenne annuelle récupérable a été estimée à 421.01 kWh/m².an pour le site de Tlemcen et à 1956.2 kWh/m².an pour le site d'Adrar. En conclusion de cette étude, l'exploitation de l'énergie éolienne est favorable pour le site de Tlemcen à

des applications de faible puissance, et pour le site d'Adrar, des applications de grande puissance seront utiles à des bons fonctionnements.

L'évaluation du gisement énergétique éolien en Algérie et la contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent a été abordé par N. Kasbadji Merzouk, [25]. Les données fournies par 64 stations météorologiques ont été utilisées pour accomplir les tâches de cette étude.

Encore, des données relevées sur un pylône d'expérimentation appartenant à l'Office National de la Météorologie (ONM) et installé à Ksar El chellala seront utilisées aussi après analyse, pour l'établissement d'un modèle d'extrapolation verticale des données du vent valables en milieux semi-arides. Les données du vent ainsi récupérées permettront à l'établissement des cartes des vitesses moyennes annuelles et saisonnières, et les zones particulièrement ventées ainsi réalisées feront l'objet d'une étude détaillée par projection de données relevées à 2000 m d'altitude, à l'aide du logiciel AIOLOS.

A partir des mesures des paramètres du vent, les variations journalières, mensuelles et annuelles du vent ont été établies, et une étude statistique des mesures a permis la détermination des paramètres de Weibull nécessaires pour la connaissance des potentialités énergétiques éoliennes d'un site donné (Tableau 3.4).

Une interpolation spatiale des données a été effectuée, qui a permis l'établissement des Atlas des vents annuels et saisonniers aux échelles nationale et microclimatique. La rugosité du sol, le coefficient de frottement et le flux échange par chaleur sensible permettant la détermination de la longueur de Monin Obukov, ont été déterminés.

Ceci, a permis le classement des mesures vent relevées à l'aide du pylône de Ksar El Chellala selon la classe de stabilité atmosphérique. Ceci, a permis la caractérisation verticale de la vitesse du vent dans la couche limite atmosphérique.

Direction	Skikda			El Oued		
	Fre, %	k	C	Fre, %	k	C
Nord-Nord	24	1.55	3.7	11	1.54	4.4
Nord-Est	7	1.60	2.6	11	1.70	5.4
Est-Est	3	1.67	2.8	25	1.90	5.8
Sud-Est	5	1.66	2.8	7	1.67	4.3
Sud-Sud	36	1.87	3.0	16	1.52	4.3
Sud-Ouest	10	1.66	2.9	11	1.60	4.4
Ouest-Ouest	4	1.48	4.1	13	1.60	5.3
Nord-Ouest	10	1.50	4.6	7	1.55	5.5

Tableau 3.4 : Fréquences des secteurs et paramètres sectoriels de Weibull pour les sites de Skikda et El-Oued, [25].

Une extrapolation verticale des paramètres de Weibull et de la vitesse moyenne du vent ont été établies. Ces dernières s'adaptent mieux aux climats semi-arides des hauts plateaux Algériens.

Enfin, les données des densités d'énergie disponible et récupérable ont été estimées et l'Atlas énergétique est tracé (Fig. 3.6). La limite de Betz en premier lieu, ensuite les limites des machines font que le potentiel éolien utile représente moins de 40 % du potentiel disponible, rapport qui peut changer énormément en fonction du site (la forme de la courbe de distribution) et du choix de l'éolienne (la vitesse de démarrage et la vitesse nominale).

A savoir, une fois les zones ventées sont identifiées, il est nécessaire de procéder à des études plus détaillées, telles que la détermination des évolutions journalières, mensuelles et saisonnières.

Par ailleurs, étant donné que généralement les différentes mesures prélevées se font à 10 m du sol et que les formules empiriques d'extrapolations ont été établies pour des climats différents du notre, une étude expérimentale détaillée doit être établie pour la correction de ces dernières.

La contribution à l'étude du vent en rapport avec l'érosion éolienne dans les zones arides est aussi un sujet qui doit être pris en considération pour prévenir les régions contre l'ensablement.

Pour cette raison, une publication a été présentée par N. Kasbaoui et Messen, [26], portant sur l'étude des vents dans une région semi-aride dans le wilaya de Djelfa en Algérie afin de déterminer leur contribution dans les effets des sables de cette zone.

Trois stations météorologiques implantées dans la région d'étude qui sont : Ain ouessara, Djelfa et Ksar El chellala mesurent les vitesses moyennes et les directions du vent toutes les trois heures à une altitude de 10m du sol.

Par ailleurs, deux points de mesure à 700 hPa se trouvant dans la région d'étude, prélèvent quotidiennement deux mesures de la vitesse et de la direction du vent (Fig.3.7).

Les auteurs ont abordé cette étude par l'utilisation de deux méthodes, dont la première passe par le traitement de données mesurées au niveau des stations météorologiques.

Ils ont utilisé un modèle mathématique, c'est la distribution de Weibull, qui a été employée pour l'étude statistique des données mesurées au sol. La deuxième méthode concerne l'établissement de la carte des vitesses du vent de la région à l'aide de l'extrapolation des données mesurées à 700 hPa. Ceci, se fait par utilisation d'un modèle appelé AIOLOS afin de déterminer l'écoulement du vent dans une région donnée.

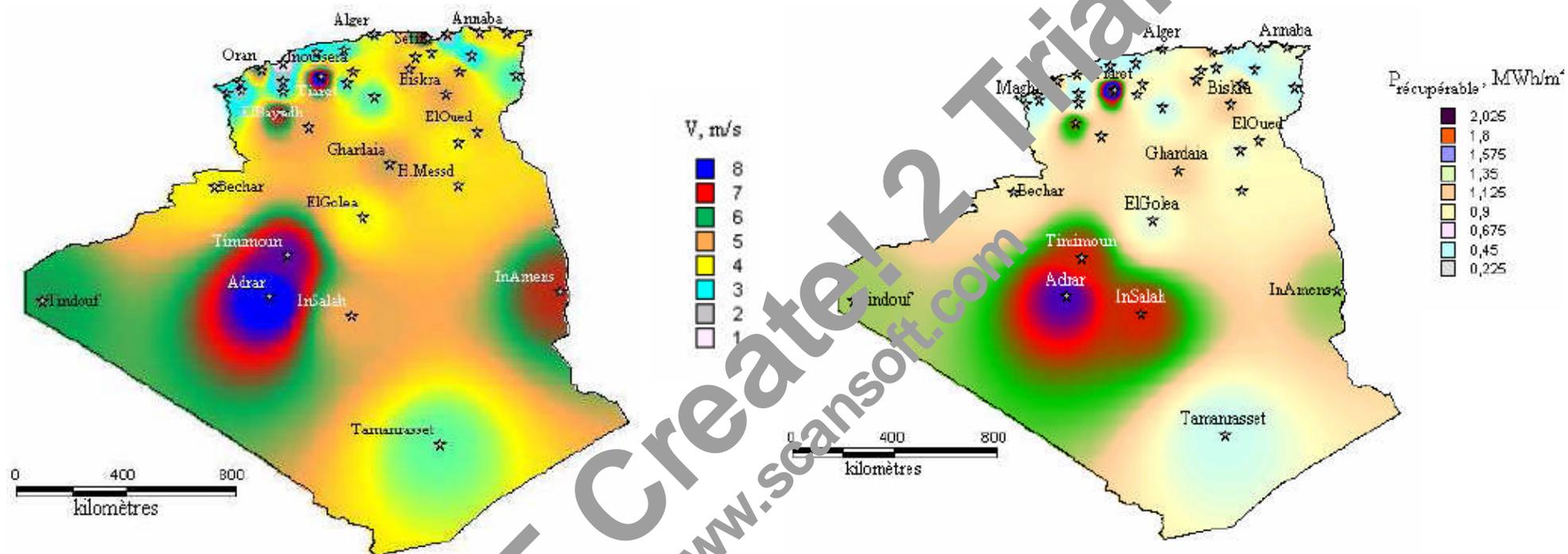


Fig. 3.6 : Atlas de la vitesse de vent et de la densité de puissance énergétique de l'Algérie à 50 m d'altitude, [25].

Le modèle AIOLOS est un modèle cinématique basé sur la résolution de l'équation de continuité en supposant que la densité de l'air est considérée constante, qui est une hypothèse valable pour les grandes surfaces.

Le modèle AIOLOS a été appliqué pour un pas de 01 km, qui représente une distance idéale pour l'obtention des résultats fiables.

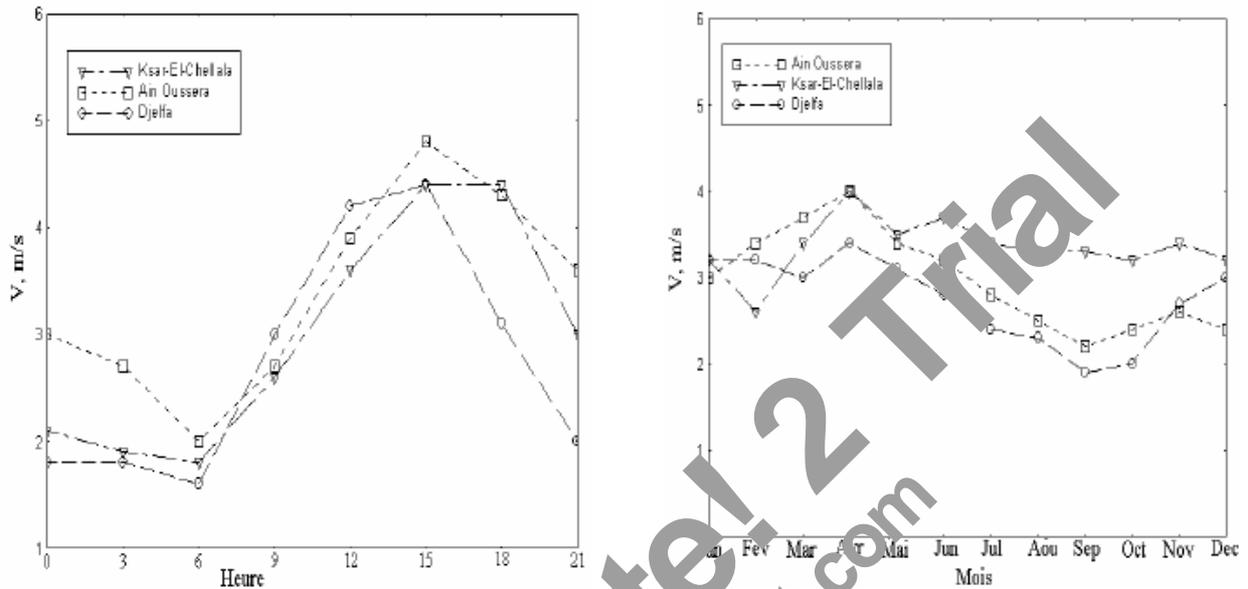


Fig. 3.7 : Evolutions journalière et annuelle de la vitesse du vent pour les trois sites de la région étudiée, [26].

Les résultats obtenus pour les deux méthodes ont montré que les vents dominants sont Nord et Ouest (Fig. 3.8). Ce qui demande de prendre des précautions nécessaires pour confronter l'ensablement.

Par ailleurs, les vitesses moyennes annuelles et journalières varient en moyenne entre 4 et 5 m/s, ce qui implique que les ressources énergétiques éoliennes de la région ne peuvent répondre qu'aux petites applications.

Un autre travail concernant l'étude et l'établissement de la carte du vent de l'Algérie avec des résultats préliminaires a été présenté. Par le fait qu'il est intéressant de quantifier les énergies renouvelables telles que, les énergies solaires, les énergies éoliennes, afin de l'exploiter dans plusieurs domaines pour le développement du pays tels que, le pompage de l'eau, la production électrique, la possibilité de la production de l'hydrogène solaire et éolien....etc.

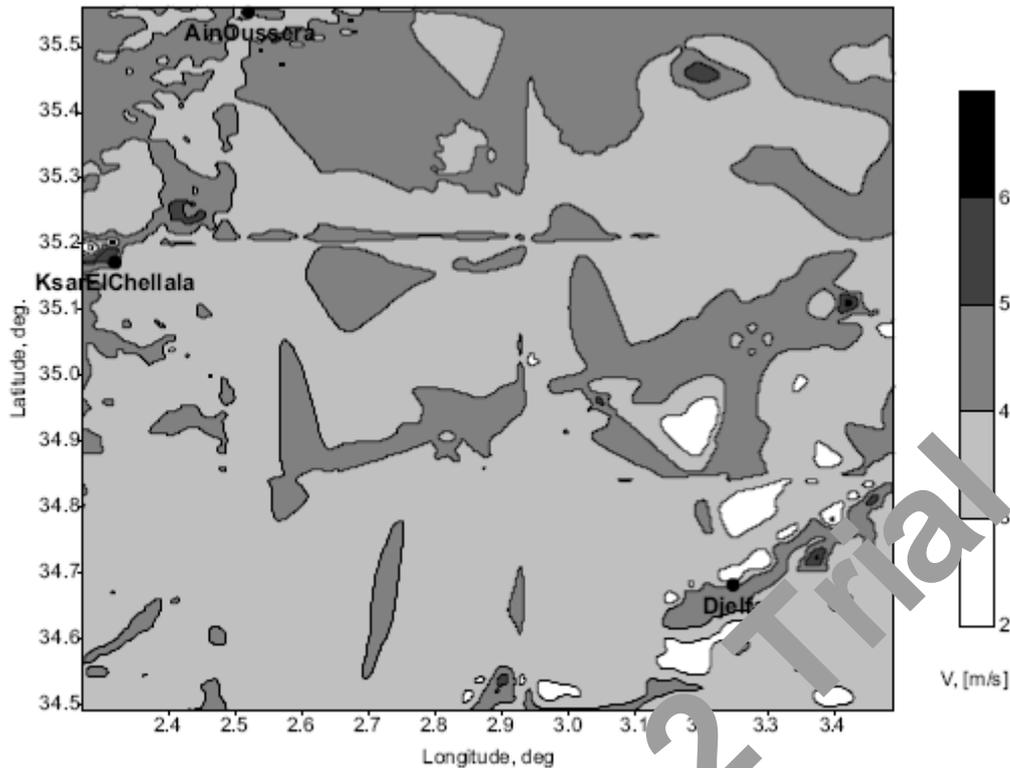


Fig. 3.8 : Carte des vents de la région étudiée à 10 m du sol, [26].

Cette exploitation nécessite une estimation précise du gisement énergétique par établissement des différentes cartes énergétiques. Par ailleurs, tout concepteur ou utilisateur des systèmes énergétiques, nécessite la connaissance des données énergétiques utiles pour tout dimensionnement du système.

Une étude de N. Kasbadji Merbouk, [17] a pour but l'établissement de la carte du vent de l'Algérie à la hauteur standard de 10 m du sol. Sachant que les différentes éoliennes produites sont généralement installées à des altitudes supérieures ou égales à 25 m du sol. Alors, les résultats standards obtenus à 10 m du sol devront être extrapolés pour la production d'une carte à une hauteur de 25 m du sol.

Un programme de traitement de données des mesures de la vitesse du vent a été élaboré et a permis la détermination de la vitesse moyenne annuelle de l'année type représentant en général une multitude d'années des mesures de chaque trois heures de la vitesse du vent.

Le travail a inclut dans l'analyse, des données supplémentaires des vitesses moyennes annuelles du vent de 18 stations météorologiques appartenant à l'Office National de la Météorologie (ONM), afin d'augmenter la densité des points de mesure sur le territoire de l'Algérie dans le tracé. Ces données ont permis en premier lieu, la production de la carte des vents standard de l'Algérie à 10 m du sol (Fig. 3.9).

Les résultats ont montré qu'en Algérie, les vitesses du vent varient entre 1 et 5.5 m/s à 10 m du sol. Après interpolation à l'aide du logiciel SURFER, les vitesses du vent ainsi obtenues varient de 1.5 à 7 m/s et la carte des vents de l'Algérie à 25 m du sol a été produite (Fig. 3.10).

Les résultats ont montré qu'en Algérie, les vitesses du vent varient de 1 à 5.5 m/s et de 1.5 à 7 m/s respectivement à 10 m et 25 m du sol. Les régions les plus ventées sont situées dans la région du Sud, soit aux environs d'Adrar. Il est remarqué par ailleurs, une multitude de microclimats près de la région de Tiaret.

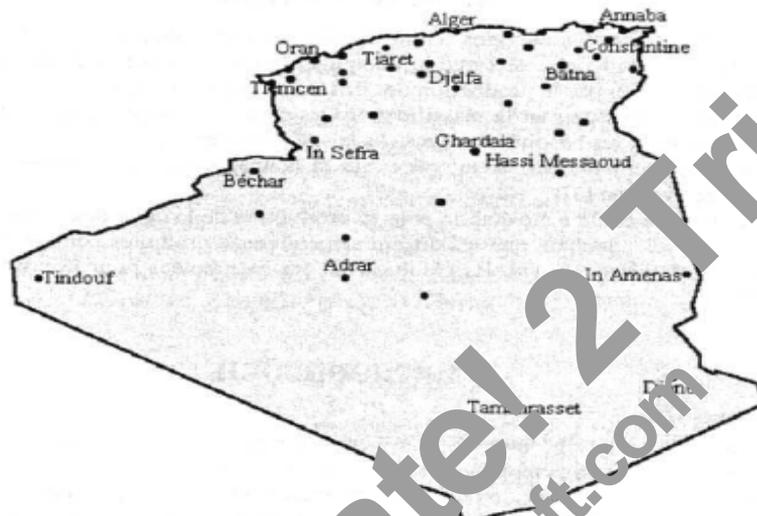


Fig. 3.9 : Représentation des points de mesure utilisés dans l'étude, [27].

Enfin, du point de vue énergétique, il est à conclure que les applications énergétiques éoliennes deviennent intéressantes lorsque les éoliennes sont installées à des altitudes supérieures ou égales à 25 m du sol.

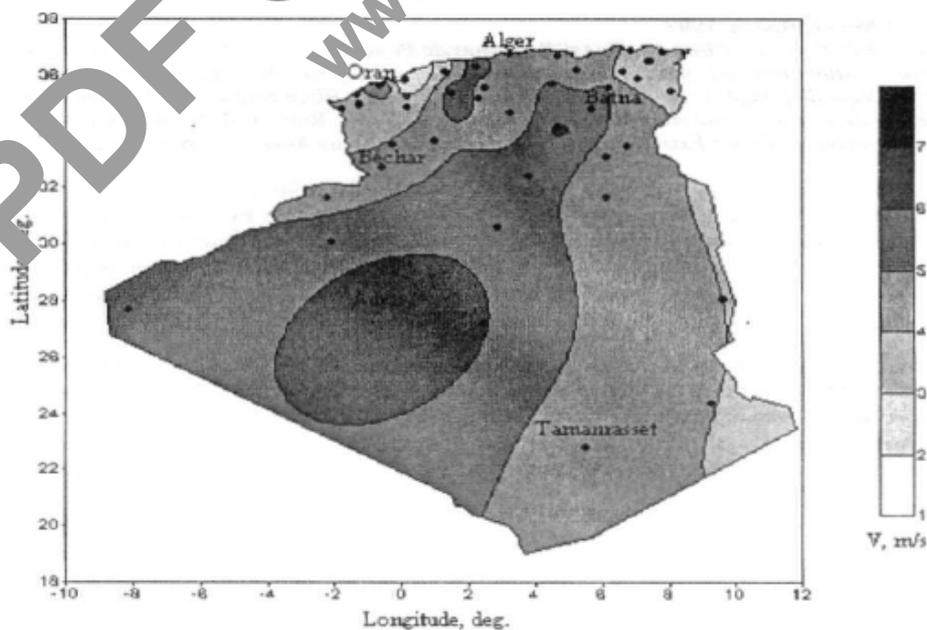


Fig. 3.10 : Tracé de la carte des vents de l'Algérie à 25 m d'altitude, [27].

Suite au travail effectué par R. Hammouche, [19] qui est basé sur l'établissement de l'Atlas du vent de l'Algérie, une amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées a été exécutée par H. Nedjari Daaou et al. [28]. Alors, pour une rigoureuse exploitation de l'énergie éolienne sur un site donné, différentes cartes de l'énergie éolienne disponible en Algérie ont déjà été établies, à savoir la carte des vitesses du vent à 10 m et 25 m du sol, les différentes cartes saisonnières de la vitesse du vent et la carte de la puissance moyenne annuelle récupérable pour des altitudes égales à 10 m et 50 m du sol. Ces cartes ont permis la localisation des sites susceptibles d'accueillir des installations éoliennes.

L'élaboration de ces dernières est basée sur l'interpolation des vitesses moyennes estimées à partir des mesures tri horaires relevées auprès des stations météorologiques de l' (ONM).

Dans la présente étude, les résultats produits par l'Atlas éolien de l'Algérie ont été utilisés dans le but de multiplier la densité des points de mesure aidant à l'amélioration de la carte des vents de l'Algérie.

Les différentes valeurs de la rugosité et des paramètres de Weibull k et c , lus à partir de l'Atlas du vent ont permis le positionnement de nouveaux points interpolés et le calcul de la vitesse moyenne du vent. Enfin, il serait intéressant de conclure que les méthodes d'interpolation présentent des inconvénients et sont à écarter pour des rayons supérieurs à 10 km autour des stations de mesure.

Au-delà de cette distance, tout concepteur ou utilisateur de systèmes éoliens doit obligatoirement avoir une description parfaite du lieu de mesure ainsi que des obstacles de la topographie et de la rugosité afin de pouvoir extrapoler ces données du vent jusqu'au point voulu. Ceci, rend le travail très complexe, il a été montré que l'erreur qui peut se faire par la négligence de ces paramètres, peut atteindre les 44.83 %.

Afin d'effectuer des études significatives et rigoureuses à petite échelle, l'utilisation d'un modèle qui prend en considération les différents paramètres liés au sol et qui influent sur le flux de la vitesse du vent et de sa direction s'avère indispensable pour l'obtention des résultats sûres et fiables. En effet, dans une étude de caractérisation éolienne du site "Les grands vent de Dely Ibrahim", H. Daaou Nedjari, [29] a utilisé un modèle numérique permettant la détermination de l'écoulement du vent par le passage de l'extrapolation au sol d'un champ des vitesses du vent mesurées à un niveau non perturbé de 700 hPa.

Le but essentiel de ce travail est la cartographie du site " les grands vents de dely Ibrahim ". Etant donné que, l'application du modèle AIOLOS nécessite la connaissance des données orographiques du site (altitude et rugosité), les cartes topographiques de la région étudiée produites par l'Institut National de Cartographie (INC) à l'échelle 1:125000 en coordonnées UTM ont été dépouillées par

pas de 125 m. Ces données orographiques ont été utilisées pour le tracé du relief du site "les grands vent de Dely Ibrahim " avec une altitude variant de 140 à 260 m par rapport au niveau de la mer. D'autre part, les données de six points situés à 700 HPa et entourant la région d'étude ont été utilisées pour la production des champs de vitesse du vent directionnels sur un plan horizontal au déroulement du modèle. Une fois tous les fichiers de données indispensables au déroulement du programme AIOLOS conçus, ce dernier est lancé pour l'extrapolation verticale du plan de maillage horizontal des vitesses du vent au sol.

Les résultats obtenus sont des fichiers de vitesses moyennes estimées à des altitudes de 10, 25, et 60 m pour les huit directions. Ces résultats sont utilisés pour le calcul de la vitesse moyenne pondérée en chaque point du maillage, tous secteurs confondus et pour les différentes hauteurs considérées.

Enfin, les cartes du vent sont tracées pour chaque hauteur. L'ensemble de ces cartes montrent que la région étudiée "les grands vent de Dely Ibrahim" est moyennement ventée, étant donné que les vitesses maximales estimées sont de l'ordre de 5.68 m/s à 10 m du sol et de 5.72 m/s pour l'altitude de 25 m et atteignant la valeur de 5.92 m/s à l'altitude de 60 m du sol.

L. Aiche-Hamane et Khellaf, [30] ont traité un article faisant l'objet d'une étude dans le but de donner une description de l'évaluation mensuelle de la vitesse du vent à travers le territoire Algérien. En ce qui concerne l'Algérie, des études précédentes ont été entreprises pour l'évaluation de la ressource éolienne à travers ce pays.

Les résultats ont montré une variabilité importante de la vitesse du vent en fonction des saisons, et en fonction de l'altitude et une variation substantielle d'un endroit à un autre à cause de l'influence de la topographie.

Dans la présente étude les auteurs s'intéresseront à la variation mensuelle de la vitesse du vent à travers l'Algérie. Les résultats de l'étude seront présentés sous forme de cartes, afin de faciliter la lecture et de permettre à l'utilisateur d'avoir une idée générale sur la répartition géographique du gisement éolien de l'Algérie tout au long de l'année.

Les données du vent utilisées dans le travail proviennent de l'Office National de la Météorologie (ONM). Elles sont constituées de vitesses mensuelles de 75 stations de mesure sur une période allant jusqu'à 11 années.

Un programme a été développé pour le traitement des données de vitesses mensuelles par années disponibles pour les 75 stations considérées. Celui-ci a permis le calcul de la vitesse moyenne mensuelle par station pour les douze mois de l'année.

Les vitesses mensuelles obtenues ont été classées selon les différentes saisons, et les résultats sont représentés sur des figures sous forme de contours cartographiques décrivant la variation géographique de la vitesse mensuelle moyenne du vent à travers l'Algérie.

Le tracé des différentes cartes des vitesses mensuelles moyennes à 10 m du sol, constitue un apport considérable à l'évaluation des ressources énergétiques éoliennes de l'Algérie. Ces cartes mensuelles ont permis de classer les mois de l'année selon l'importance de la vitesse du vent (Fig. 3.11).

En effet, il est constaté que les mois d'Avril et Mai sont les plus ventés pratiquement sur tout le territoire Algérien, tandis que les mois de Novembre et Décembre sont les moins ventés.

D'un autre côté, la variation spatiale de la vitesse, a montré l'existence d'un gisement éolien important dans la région du Sud-ouest limitée par Timimoun, In Salah et Tamarasset où la vitesse du vent dépasse 5 m/s tout au long de l'année dans la région d'Adrar.

Par ailleurs, le Nord de l'Algérie est caractérisé généralement par des vitesses peu élevées avec des microclimats dans la région de l'Oranie, Tiaret, et El bayadh pour l'Ouest, et toute la région qui s'étend de Bejaia jusqu'à Biskra ainsi que la région de Annaba pour l'Est.

Il est important de signaler enfin que, la précision de ces cartes peut être améliorée en introduisant davantage de données, aussi que par l'introduction des modèles qui prennent en compte les paramètres qui interviennent dans l'écoulement du vent.

Le travail effectué par Abdeladim et al. (1994) pour objet de décrire une méthodologie optée pour la cartographie du vent d'une région dans le Nord-est de l'Algérie où les données de deux stations météorologiques situées à Bejaia et Djel ont été utilisées.

Alors, l'évaluation de la viabilité économique pour installer des systèmes de conversion d'énergie éolienne est une tâche complexe pour une vaste surface comme celle de l'Algérie environ de 2.3 millions de km² avec l'existence de données du vent relativement insuffisantes.

Les deux sites cités sont caractérisés par une orographie complexe. Ceci, nécessite pour les étudier, l'emploi d'un modèle approprié tridimensionnel pour les terrains complexes afin d'élaborer une carte de vent concernant le secteur choisi (Fig. 3.12).

Le modèle AIOLOS a été exploité dans cette étude avec des données du vent, et une basse influence orographique qui a été considérée. Des études récentes ont été faites, par Hammouche (1994), Abdeladim et al. (1994) et N. Kasbadji Merzouk (1994) concernant ces deux stations ont été examinées pour vérifier les résultats qui seront obtenus par la présente étude.

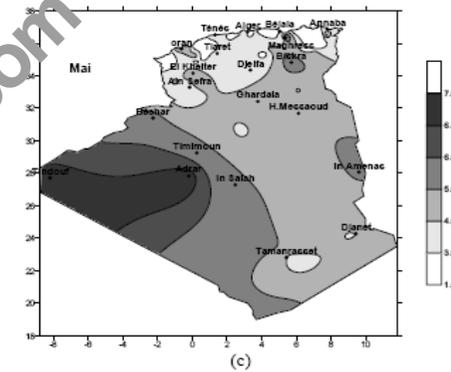
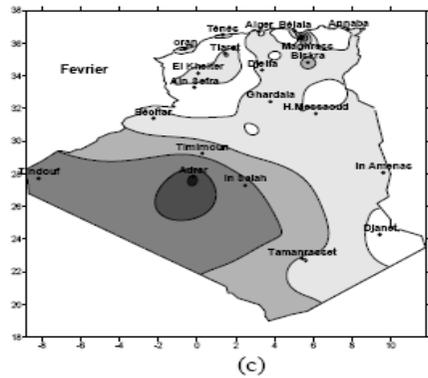
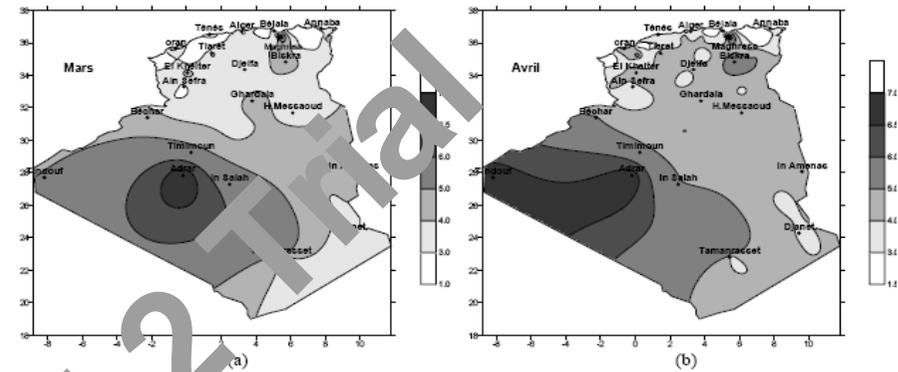
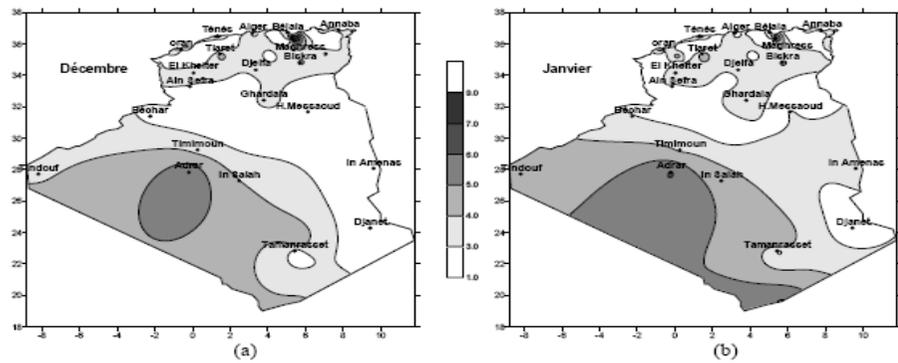


Fig. 3.11a : Cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol représentant l'Hiver, [30].

Fig. 3.11b : Cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol représentant le Printemps, [30].

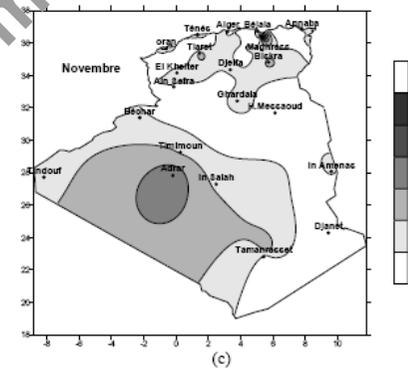
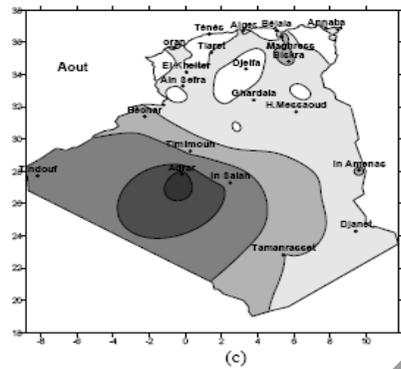
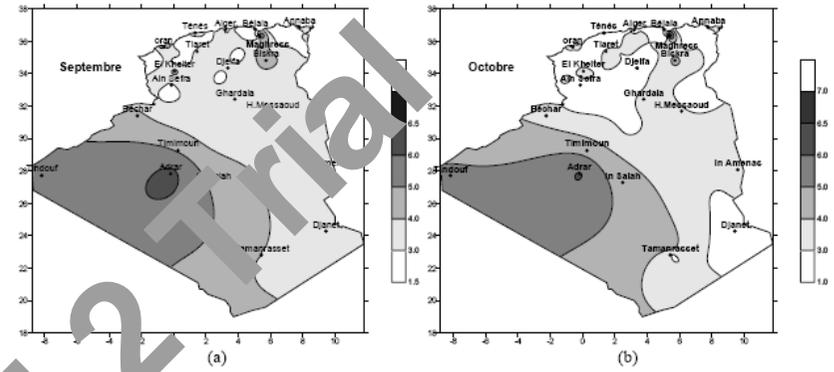
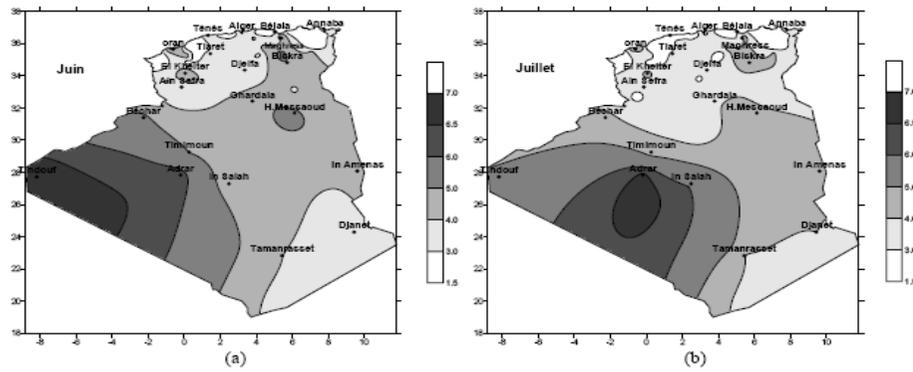


Fig. 3.11c : Cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol représentant l'été, [30].

Fig. 3.11d : Cartes mensuelles de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol représentant l'Automne, [30].

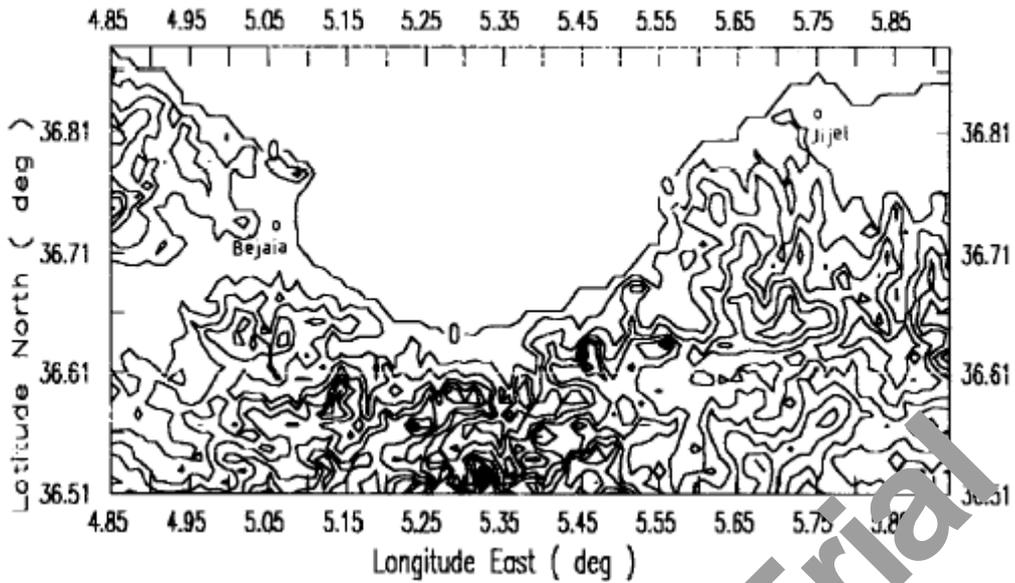


Fig. 3.12 : Orographie de la surface choisie pour les deux sites étudiés, [31].

Un code de masse conformé a été utilisé afin de dessiner une carte préliminaire donnant un avis préliminaire de la disponibilité du potentielle énergétique de vent dans le secteur étudié (Fig. 3.13).

Les résultats calculés sont bien conformes aux valeurs mesurées, seulement pour une station située sur la cote parmi les deux considérées. Il est à noter aussi que, les résultats donnés par le modèle sont plus réalistes et plus représentatifs que ceux qui sont donnés par les mesures, qui devraient être vérifiées avec attention (Tableau 3.5).

	Measured (m/s)	1 km grid step	250 m grid step
		Estimated by Aiolos (m/s)	Estimated by Aiolos (m/s)
Béjaïa (Lat=36.72°N, Long=0.81°E)	4.2	4.2	4.4
Jijel (Lat=36.82°N, Long=0.81°E)	1.8	4.2	3.7

Tableau 3.5 : Vitesses du vent mesurées et estimées de Béjaïa et Jijel, [31].

Il est à noter que le modèle AIOLOS peut donner une bonne approximation dans un terrain sans pentes élevées. Cependant, afin de choisir des secteurs appropriés pour les fermes de vent, plus d'informations devraient être exigées pour le modèle telles que, les données orographiques avec mailles réduites et les données de rugosités.

Cette méthodologie devrait être prolongée pour le reste du territoire Algérien pour favoriser une exploitation rentable de l'énergie éolienne.

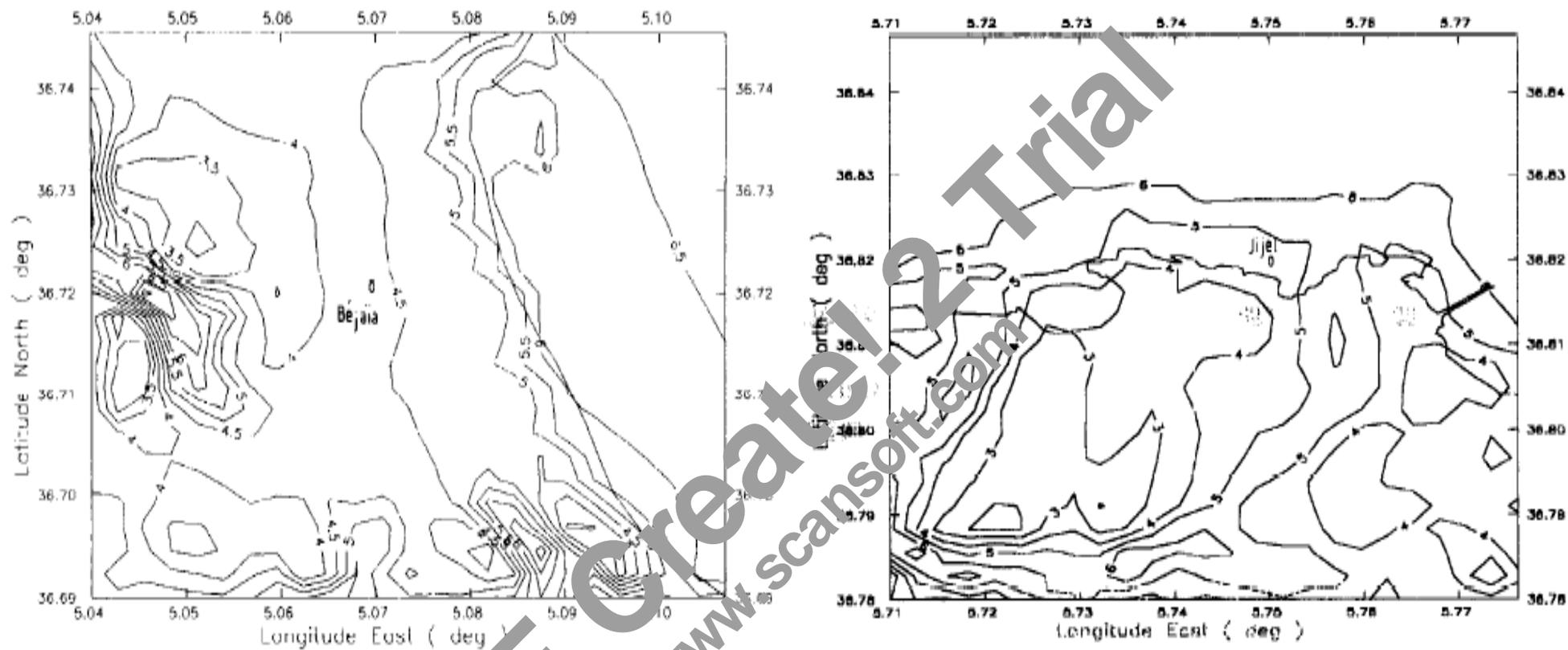


Fig. 3.13 Vitesses moyennes du vent à 10 m du sol pour les deux sites étudiés, [31].

3.12-CONCLUSION :

Dans ce chapitre une analyse est entamée de l'estimation du potentiel énergétique éolien à travers le territoire Algérien par des études basées sur l'analyse statistique des données du vent et utilisation des modèles d'ajustement convenables.

L'étude a permis de passer en revue les principaux travaux de recherches se rapportant à la caractérisation horizontale et verticale de la vitesse du vent. Les principaux travaux de recherche portant sur le potentiel énergétique éolien en Algérie ont également été présentés.

Partant des mesures des paramètres du vent, les variations journalières, mensuelles et annuelles du vent concernant l'Algérie ont été établies par les auteurs et l'étude statistique des mesures permettant la détermination des paramètres de Weibull nécessaires pour la connaissance des potentialités énergétiques éoliennes d'un site donné a été aussi effectuée dans les recherches.

L'interpolation spatiale des données dans quelques recherches a permis l'établissement des Atlas éoliens annuels et saisonniers aux échelles national et micro climatique. Les densités d'énergie disponibles et récupérables ont été aussi estimées permettant le tracé de l'Atlas énergétique de l'Algérie.

3.13-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

- [1].G. CUNTRY, "Eoliennes et Atrogérateurs" EDISUD/Technologie Douce, (1979).
- [2].S. SOLARI, "Wind Speeds Statistics" College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution, ICTP Trieste, Italy, (1974).
- [3].A. S. MONN AND A. M. OBUKOV, "Basic Regularity in Turbulent Mixing Surfaces Layer of the Atmosphere" Akad. Nauk. S.S.S.R., Trusd Geof. Inst. vol. 24, 151, (1954).
- [4].J. A. BUSINGER, "On the structure of the atmospheric surfaces layer" Journal of Meteorology, vol. 12, pp. 353-361, (1955).
- [5].C. A. PAULSON, "The mathematical Representation of Wind speed and Temperature profiles in the unstable atmospheric surface Layer" Journal of Applied Meteorology, (1970).
- [6].A. J. DYER, "A review of Flux Profile Relationships" Boundary Layer Meteorology, vol. 7, pp. 363-372, (1974).
- [7].F. NIEUWSTADT, "The computation of the Friction Velocity and the Temperature Scale from Temperature and Wind velocity Profiles by Least Square Method" Boundary Layer Meteorology, vol. 14, pp. 235-246, (1978).

- [8]. A. J. M. VAN WIJK, A. C. M. BELJAARS, A. A. HOLSTAG, and W. C. TURKENBURG, "Evaluation of a stability correction in Wind speed profiles over the North Sea" *Journal of Wind Eng. And Ind. Aerod.* vol. 33, pp. 551-566, (1990).
- [9]. B. LANGE, S. LARSEN, J. HOJSTRUP, and R. BARTHELMIE, "Modelling the vertical Wind speed and Turbulence intensity profiles at prospective offshore Wind Farm Sites" *Proceeding of Wind Power, Paris, France*, (2002).
- [10]. C. G. JUSTUS and A. MIKHAIL, "Height Variation of Wind speed and Wind distributions Statistics" *Geophysical Research Letters*, vol. 3, N°5, (1976).
- [11]. A. TENNEEKS, "The Logarithmic Wind Profile" *Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 30, pp. 234-238, (1973).
- [12]. A. S. MIKHAIL, and C. G. JUSTUS, "Comparison of Height Extrapolation Models and Sensitivity Analysis" *Wind Engineering*, vol. 5, N°2, (1981).
- [13]. H. NFAOUI, J. BAHRAOUI BURET, and A. A. M. SAYIGH, "Wind Characteristics and Wind Energy Potential in Morocco" *Solar Energy*, vol. 1, pp. 51-60, (1998).
- [14]. F. F. KNIDIRI, A. LAOUINA, M. FAHRE, et A. W. PATT, "L'énergie Eolienne au Maroc" *Rapport Interne au CDER, Algérie*, (1986).
- [15]. S. POJE and B. CIVIDINI, "Assessment of Wind Energy Potential in Croatia" *Solar Energy*, vol. 41, N°6, pp. 541-554, (1988).
- [16]. A. S. MIKHAIL, "Height Extrapolation of Wind Data" *Transaction of ASME*, vol. 107, pp. 10-14, (1985).
- [17]. M. SAID and A. BRAHIM, "Energy in the Arab World" *Solar Energy*, vol. 9, N°3, pp. 217-238, (1984).
- [18]. H. BENSAAAD, "The Algerian Program on Wind Energy" *Proceeding of WEAC*, pp. 21-27, Oxford, (1985).
- [19]. R. HAMMOUCHE, "Atlas Vent de l'Algérie /ONM" *Office des Publications Universitaires (OPU), Alger*, (1990).
- [20]. N. KASBADJI MERZOUK, "An evaluation of Wind Energy Potential in Algeria" *Proceeding of EWEC' 94 Congress, Thessaloniki, Greece*, (1994).
- [21]. F. YUCEF ETOUMI, "Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie" *Thèse de Doctorat d'Etat, USTHB, Alger*, (2002).

- [22]. H. BOUKLI, N. KASBADJI MERZOUK, et L. LOUKARFI, "Atlas éolien de la vaele du Cheliff" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [23]. M. F. BENATALLAH and M. CHEGAAR, "Algerian Wind potential Evaluation" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25- 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [24]. R. MAOUEDJ, S. BOUSSALEM, et B. BENYOUCEF, "Estimation de la puissance annuelle moyenne de sortie d'une Eolienne" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25- 27, Bejaia, Algeria (2007).
- [25]. N. KASBADJI MERZOUK, "Evaluation du Gisement Energétique Eolien, Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie" Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen (2006).
- [26]. N. KASBADJI MERZOUK, et N. MESSEN, "Contribution à l'étude du vent en rapport avec l'érosion éolienne dans les zones arides" Revue des Energies Renouvelables : Zones Arides, pp. 9-15, (2002).
- [27]. N. KASBADJI MERZOUK, "Cartes des vents de l'Algérie, Résultats Préliminaires" Revue des Energies Renouvelables : Valorisation, pp. 209-214, (1999).
- [28]. H. NEDJARI DAAOU, S. HAMMOUCHE, et N. KASBADJI MERZOUK, "Amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées" Revue des Energies Renouvelables : ICPWE, pp. 119-124, (2003).
- [29]. H. NEDJARI DAAOU, "Caractérisation éolienne du site (Les Grands Vents, Dely Ibrahim) à l'aide d'un modèle numérique" Bulletin des Energies Renouvelables, N°6, Décembre, (2004).
- [30]. L. FICHE-HAMANE et A. KHELLAF, "Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie" Revue des Energies Renouvelables : ICPWE, pp. 147-152, (2003).
- [31]. K. ABDELADIM, R. REMEO, and S. MAGRI, "Wind Mapping of a region in North-east of Algeria" WREC, (1996).

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 4

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CHAPITRE 4

SYSTEMES ENERGETIQUES EOLIENS

4.1-INTRDDUCTION :

Lorsqu'un système énergétique éolien fonctionne, l'éolienne est soumise à des vitesses du vent très diverses. Dans ces conditions quelle éolienne choisir pour obtenir l'énergie désirée (en général le maximum) dans un site donné ? Ce problème d'adaptation de la machine au site, c'est-à-dire du choix de ses dimensions et de ses caractéristiques aérodynamiques nominales (vitesse du vent, vitesse de rotation) nécessite de connaître le vent sur le site, sa fréquence, ses irrégularités, ...etc.

Les caractéristiques du vent interviennent de façon importante dans quatre domaines relatifs aux systèmes énergétiques éoliens, la conception des machines, l'évaluation de leurs performances, implantation, et exploitation. Il est bien évident que chacun de ces domaines n'est pas indépendant des autres. Cependant, de façon générale, il est possible de considérer que les éléments relatifs à chacun de ces domaines doivent être examinés sous les aspects suivants : les caractéristiques du vent prises en compte pour la conception des systèmes devraient comporter des conditions moyennes (par exemple la distribution moyenne du vent) ou des conditions extrêmes (par exemple les rafales ou les coups de vent) qui constituent les éléments de base pour la conception de ces systèmes.

Les caractéristiques du vent utilisées pour l'évaluation des performances des éoliennes devraient comprendre les valeurs moyennes réelles et les lois de distribution saisonnières et journalières du vent à l'endroit précis où l'appareil doit être installé.

La structuration des systèmes énergétiques éoliens est donnée au début du chapitre en précisant ses différents éléments constitutifs. On passe ensuite à une analyse du potentiel énergétique éolien dès l'entrée jusqu'à la sortie de l'éolienne où il subit une suite des pertes en cascade. En effet, à l'entrée, le vent donne une énergie disponible qui se réduit par des pertes en une énergie récupérable qui sera réduite à la sortie de la machine en une énergie utile. Ensuite, on discutera l'expansion des applications éoliennes qui est en pleine croissance dans le monde, les fermes éoliennes et les aérogénérateurs de grande puissance qui sont utilisés principalement à la production d'électricité et à l'alimentation des réseaux électriques, ainsi qu'au pompage d'eau et à la production d'hydrogène. On termine le chapitre par une analyse bibliographique des travaux de recherche sur les systèmes énergétiques éoliens en Algérie concernant le dimensionnement et la caractérisation aérodynamique des machines pour différentes applications éoliennes. Aussi, on discutera le problème de la disposition des machines sur terrains dans les fermes éoliennes qui concerne l'optimisation des

distances entre les éoliennes et l'effet du sillage résultant des interférences aérodynamiques entre les machines.

4.2-SYSTEMES ENERGETIQUES EOLIENS :

Un système énergétique éolien est mis en place en un lieu donné pour fournir de l'énergie sous forme mécanique ou électrique. D'une façon générale sa structure est la suivante :

- Entrée, qui comprend le gisement éolien local, l'environnement géographique et climatique, et éventuellement une ou plusieurs sources énergétiques d'appoint.
- Transfert, qui comprend le dispositif de captation de l'énergie éolienne (c'est l'éolienne), des éléments de conversion d'énergie d'une forme en une autre (générateur ou transmission mécanique), (Fig. 4.1).

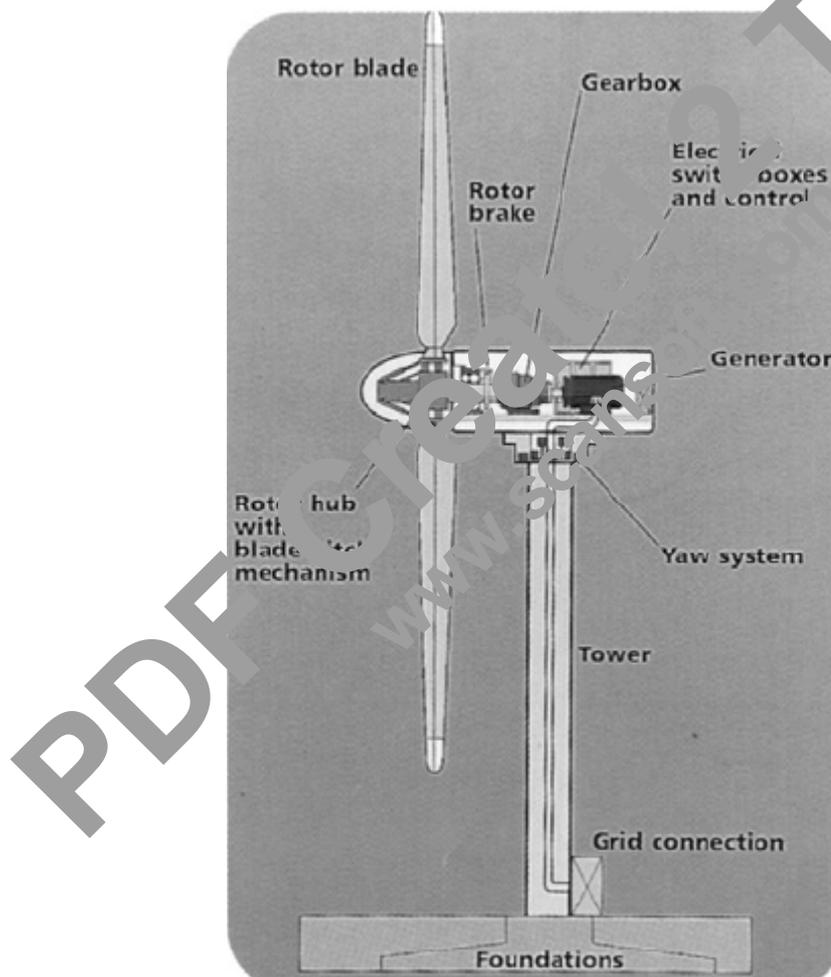


Fig. 4.1 : Eolienne à axe horizontal avec différents constituants.

- Sortie, qui comprend des dispositifs de distribution pour une ou plusieurs utilisations.
- Stockage, qui comprend des éléments tels que, des réservoirs d'eau ou des batteries électriques.

Comme exemples des systèmes énergétiques éoliens, on cite :

- pompage d'eau en zone isolée par un système éolien mécanique.
- pompage d'eau en zone isolée par un système éolien électrique.
- centrale électrique employant une ferme d'éoliennes.

4.3-POTENTIEL ENERGETIQUE EOLIEN :

Compte tenu des nécessités de conversion de l'énergie cinétique due au vent en énergie mécanique (mouvement de rotation de l'éolienne), l'énergie disponible (potentielle) subit une suite de pertes en cascades, jusqu'à la machine (limite de Betz, pertes de conversion, et seuils machines).

Cette dégradation de l'énergie peut être représentée schématiquement comme le montre la figure (4.2) suivante :

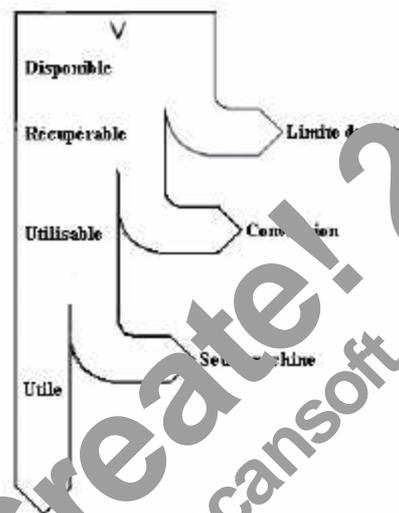


Fig. 4.2. Dégradation de l'énergie dans une éolienne.

En effet, seule une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée puissance utile est réellement obtenue en fin du processus, soit à la sortie de l'éolienne.

4.4-EXPANSION DES APPLICATIONS EOLIENNES :

Plusieurs de ces éoliennes peuvent être regroupées sur un même site pour former un "parc d'éoliennes" constituant une "centrale éolienne", appelée aussi une "ferme éolienne".

Lorsque ces éoliennes sont équipées d'un générateur électrique, on les appelle des "aérogénérateurs". Les éoliennes peuvent être à axe horizontal ou vertical, à aubes ou à ailettes. Une fois les caractéristiques du gisement éolien déterminées, la connaissance de celles de l'aérogénérateur à utiliser, notamment sa courbe de puissance en fonction de la vitesse du vent à la hauteur du moyeu, permettra de déterminer sa production pour une telle ou telle utilisation telle que, le pompage de l'eau, pour lequel la capacité peut être de quelques kilowatts jusqu'à quelques dizaines de kilowatts.

L'utilisation des aérogénérateurs est en pleine croissance dans le monde entier. La plus grande partie des investissements a été réalisée en Europe, où les coûts de production conventionnelle de l'électricité sont plus élevés et où l'on veut davantage réduire la pollution attribuable à l'émission des gaz à effet de serre et réduire la dépendance énergétique.

Maintenant, les éoliennes offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour des applications nationales.

4.5-DOMAINES D'UTILISATION DES EOLIENNES :

Les éoliennes sont utilisées principalement au pompage d'eau, à la production d'électricité et à l'alimentation des réseaux électriques :

4.5.1-EOLIENNES DE POMPAGE MECANIQUE :

L'éolienne de pompage mécanique traditionnelle utilise un système bielle-manivelle monté sur l'arbre du rotor. Elle possède normalement plusieurs pales montées sur un rotor qui tourne relativement lent (Fig. 4.3).

Le système bielle-manivelle transforme le mouvement rotatif de la bielle en un mouvement rectiligne alternatif qui commande la pompe à piston installée dans un puits ou un étang, à la base de l'éolienne.

Le mouvement alternatif du piston de la pompe assure le pompage de l'eau (la montée). Les éoliennes de pompage mécanique ont leurs avantages et leurs inconvénients. Elles sont généralement fiables, d'un entretien facile et d'un coût abordable. La contrainte principale réside dans le fait qu'elles doivent être installées directement au-dessus du puits ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisée à une certaine distance de ce puits.

4.5.2-EOLIENNES DE POMPAGE ELECTRIQUE :

Le système éolien électrique commande une pompe électrique, après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, qui aspire l'eau de la source (un puits ou un étang) et la refoule à l'endroit de son utilisation (un abreuvoir à bétail, un étang, ou un système d'irrigation), (Fig. 4.3).

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se trouver près de la source d'approvisionnement en eau. La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement.

Les éoliennes de pompage électrique ne comprennent pas des batteries, l'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie.

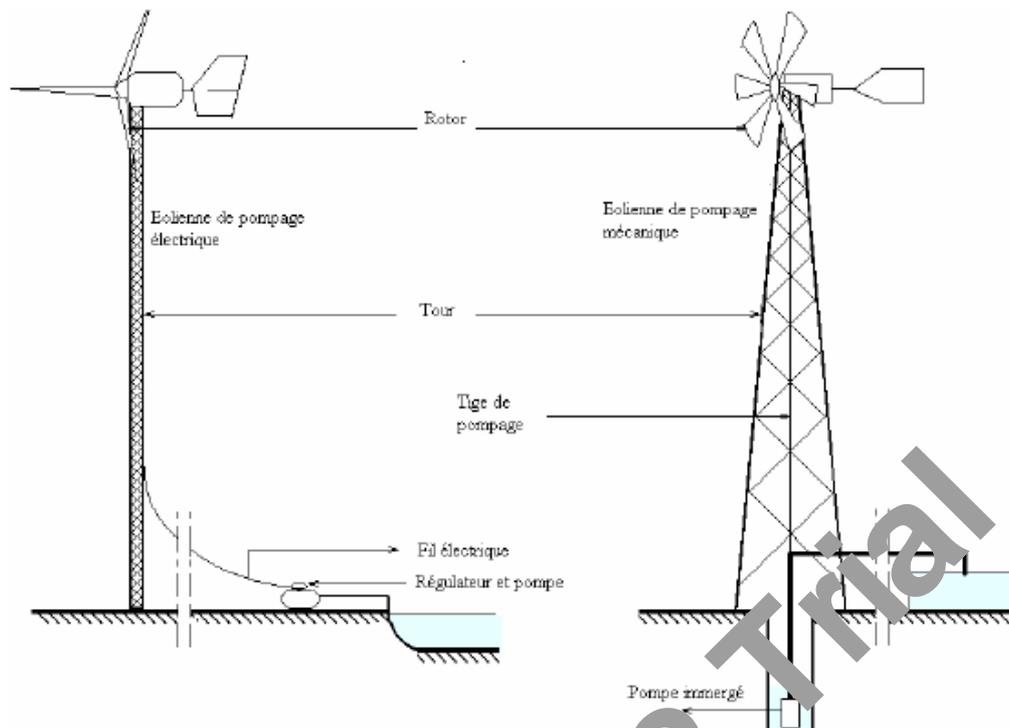


Fig. 4.3 : Schématisation des systèmes éoliens mécaniques et électriques pour le pompage de l'eau.

4.5.3-FERMES EOLIENNES :

Elles sont constituées par un grand nombre d'éoliennes destinées à la production d'électricité. Ces éoliennes sont bien plus grandes, leurs pales vont de 20 à 30 m, leurs tours atteignent 50 m de hauteur et produisent autour de 500 kW. Dans les fermes éoliennes, des centaines de machines fonctionnent ensemble et suffisent pour alimenter une ville en électricité (Fig. 4.4).

4.5.4-AEROGENERATEUR DE GRANDE PUISSANCE :

La tendance actuelle porte sur l'installation d'aérogénérateurs de grande puissance afin d'éliminer l'occupation de surface générée par les fermes éoliennes. Une éolienne de forte puissance (1MW) à une hauteur de 60 m et le diamètre du rotor est de 55 m. En pleine mer, la puissance nominale d'un aérogénérateur dépasse les 4 MW. Aujourd'hui les avancées techniques en matière de matériaux ont permis l'installation en Allemagne d'un aérogénérateur d'une puissance égale à 4 MW dont la production d'électricité répond à la demande de 400 foyers.

Les différentes avancées se font grâce à des études faites sur les matériaux utilisés pour la conception des aérogénérateurs.

4.6-DISPOSITION DES EOLIENNES DANS UNE FERME EOLIENNE :

A cause des interférences possibles dues au sillage d'une unité sur une autre située en aval, la puissance de sortie d'un groupe peut être inférieure à celle d'un nombre équivalent d'unités complètement indépendantes (Fig. 4.5).



Fig. 4.4 : Ferme éolienne.

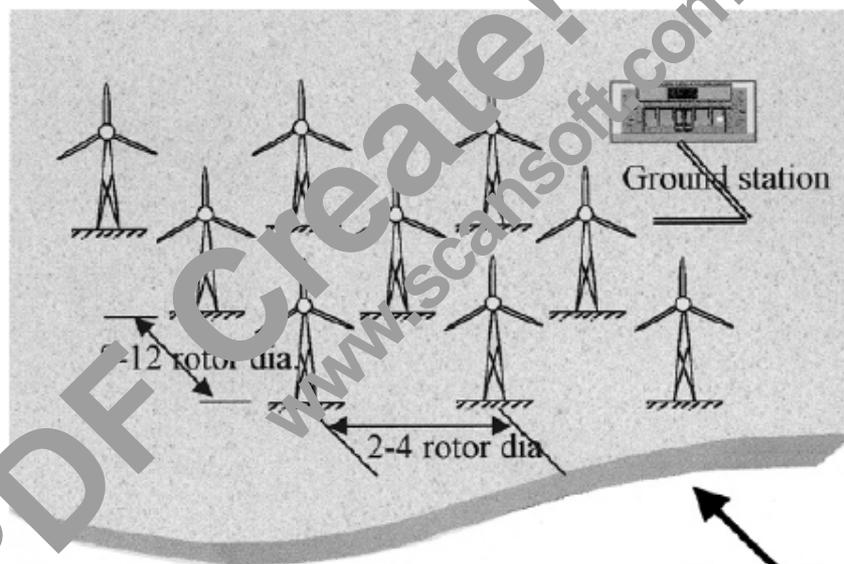


Fig. 4.5 : Espacement optimum dans les fermes éoliennes sur des terrains plats.

Parmi les études récentes sur ce sujet figurent celles de Reed et al. (1974), Templin (1974), Crafoord (1975), et Garate (1977). Ces études, réalisées à partir des méthodes d'approches différentes, ont abouti à des résultats significativement différents, en particulier sur l'espacement minimal des éoliennes pour éliminer l'influence du sillage. Reed et al. (1974), ont utilisé un modèle basé sur le rétablissement diffus de l'écoulement dans le sillage du rotor et conclu que le rétablissement à 90 % de la puissance était obtenu à une distance de 2 à 3 fois le diamètre du rotor ($a/D = 2$ à 3).

Templin (1974) et Crafoord (1975), ont utilisé un autre mode de représentation de la couche limite turbulente, mais tous deux ont estimé que le sillage s'amortit sur une distance égale à un petit nombre de fois le diamètre du rotor, laissant ainsi un profil d'écoulement reconstitué pour la machine suivante. L'élément principal qui ressort à la fois des études de Templin et de Crafoord, la puissance relative d'un aérogénérateur est donnée en fonction de différents espacements a/D et du rang de cette aérogénérateur dans le groupe. Par exemple, un aérogénérateur situé au dixième rang d'un groupe, éloigné de 10 fois le diamètre du rotor du rang précédent, aura une puissance relative de 80. Garate en déduit que l'écartement minimal pour réduire le plus possible les effets de sillage est de 15 fois le diamètre du rotor.

4.7-TRAVAUX DE RECHERCHE SUR LES SYSTEMES ENERGETIQUES EOLIENS :

L'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même à savoir, le vent. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. Sachant que la vitesse du vent augmente en fonction de la hauteur et afin d'échapper aux problèmes de turbulence dus à la nature de la surface et aux obstacles environnants, l'énergie du vent est généralement captée à des hauteurs supérieures à la hauteur de mesure de 10 m.

Connaissant les problèmes rencontrés pour le transport de l'énergie électrique dans les zones éloignées, ainsi que son coût élevé et pour le pompage de l'eau ou pour d'autres utilisations, il serait intéressant d'envisager l'application des systèmes de conversion de l'énergie éolienne pour des régions isolées possédant un potentiel éolien appréciable.

Dans ce cadre, plusieurs travaux de recherche concernant l'Algérie ont été proposés modélisant et simulant le fonctionnement des systèmes de conversion de l'énergie éolienne et étudiant leurs performances.

Des observations des sillages d'éoliennes et les effets extérieurs de rugosité sur la variabilité d'écoulement ont étudiées par D. L. Elliot et al. [1], des données de vent rassemblées à neuf tours météorologiques au site de l'éolienne "Goodnø hills" sont analysées pour caractériser l'écoulement du vent à travers ce site dans l'absence et la présence des sillages de l'éolienne. Les caractéristiques de l'écoulement libre examinées sont la variabilité de la vitesse du vent et l'intensité de la turbulence à travers le site comme une fonction de la direction du vent et de la rugosité de surface.

Les données des neuf tours indiquent que les secteurs dispersés des forts vents des arbres du site ont causé des variations prononcées dans l'écoulement du vent sur le site.

L'examen de la variabilité de l'écoulement libre à travers le site indiqué est faite par la comparaison des vitesses du vent et les intensités de turbulence à chacune des neuf tours à ceux à une tour commune de référence.

Dans deux tours qui sont fréquemment de faible vent d'un étendu plantation jusqu'aux 30 réductions dans la vitesse du vent et un facteur de 2 à 3 augmentations dans l'intensité de la turbulence est mesuré. Une augmentation substantielle dans l'importance des souffles de vent (les rafales) de plus une diminution considérable de la vitesse moyenne du vent quand une tour était à faible vent des arbres.

Le disque du rotor de l'éolienne est fixé à une hauteur de 15 m à 107 m. Les données de neuf tours ont permis une analyse détaillée du comportement de sillage à une altitude de 37 m à des diverses distances de faible vent de 2 à 10 diamètres du rotor D . Le rapport entre la vitesse de déficit et la distance de faible vent était étonnamment linéaire avec les déficits maximum moyens s'étendant de 34 à 2.D et de 7 à 10.D. Les plus larges déficits étaient à de basses vitesses du vent et à de basses intensités de turbulence. Les largeurs moyennes de sillage étaient de 2.8.D à une distance de faible vent de 10.D.

D'autres propriétés intéressantes de sillage observés étaient la turbulence du sillage, qui était la plus grande le long des flancs du sillage, la variation verticale des déficits qui étaient plus grands au-dessous de la hauteur du moyeu qu'au-dessus, et la trajectoire du sillage qui était essentiellement droite.

Le dimensionnement d'un système éolien et l'évaluation du potentiel du vent sont présentés par C. Benoudjit et al. [2], malheureusement la puissance du vent n'a pas été pratiquement exploitée en Algérie jusqu'aujourd'hui. La vitesse du vent et sa direction sont régulièrement mesurées par le réseau Algérien de la météorologie (ONM) pour beaucoup d'années.

Cette étude peut continuer une approche pour l'ingénierie de conception d'un système de puissance éolienne. Des mesures de vitesse du vent qui étaient recueillis sous forme de diverses tables disponibles auprès de l'Office Nationale de la Météorologie (ONM) concernant le site d'Ain Amenas (Fig. 4.6).

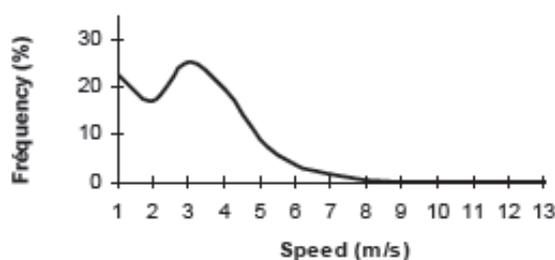


Fig. 4.6 : Distribution des fréquences annuelles des vitesses moyennes mesurées du vent, [2].

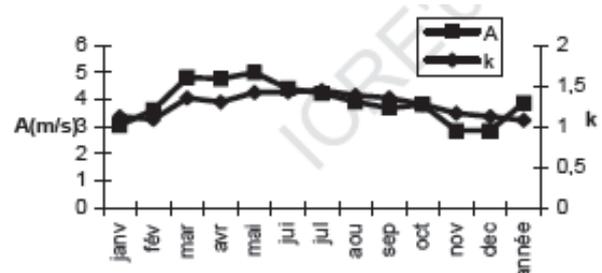


Fig. 4.7 : Paramètres de Weibull k et c pour le site d'Ain Amenas, [2].

Le système éolien proposé se compose de deux parties, une partie mécanique c'est l'éolienne et une partie électrique qui comprend le générateur et accessoires, leurs paramètres mécaniques et électriques doivent être déterminés.

Les auteurs ont employé un modèle de Weibull avec deux paramètres (Fig. 4.7). Tout d'abord, une analyse du potentiel éolien, puis les divers paramètres constituant le système de puissance ont été déterminés.

Après analyse de la demande d'énergie, un sommaire pré dimensionnement de l'aérogénérateur a été effectué afin de définir les caractéristiques générales pour une installation appropriée de l'équipement qui sera utile à l'emploi (Fig. 4.8). A savoir, dans une deuxième phase d'étude, il sera nécessaire de procéder à l'évaluation du potentiel de vent, de l'identification des conditions spécifiques de l'énergie et de la puissance pour l'utilisateur, de la détermination de la taille de l'aérogénérateur ainsi que de ses composants installés, et l'évaluation du montant total d'investissement et des coûts d'exploitation.

En conclusion, il est à dire que l'Algérie offre des possibilités intéressantes du vent variant de 3 à 7 m/s, il peut être proposé d'installer des systèmes de puissance de vent produisant de l'énergie par vent modéré. Il est à noter que le site d'Ain Amenas est favorable pour l'installation des éoliennes orientées vers l'Est de telle façon que leur propulseur peuvent être installés sur des mâts de 60 m et la puissance active récupérée sera de 110 kW pour chacune.

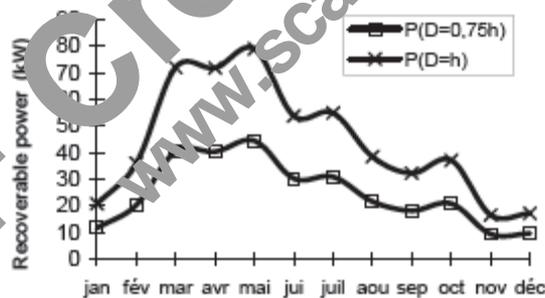


Fig. 4.8 : Variation de la puissance pour différents diamètres du propulseur, [2].

Un papier qui porte sur les perspectives d'installation d'éoliennes de pompage en Algérie aura une grande importance pour l'exploitation des ressources du potentiel énergétique éolien que possède l'Algérie. Il sera un outil d'application qu'on doit l'utiliser pour la participation au développement économique et social du pays.

Le travail ainsi collaboré par N. Kasbadji Merzouk et al. [3] a pour but l'étude d'installation des systèmes de conversion d'énergie éolienne et en particulier, les éoliennes de pompage dans la région Sud-ouest de l'Algérie. Six localités ont été choisies pour cette étude à savoir : Adrar, Tindouf, Timimoun, Ain Salah, Bechar, et Ain Amenas.

En effet, l'étude des potentialités énergétiques des sites d'installation doit être passée par le traitement statistique des données du vent qui va permettre le calcul du potentiel énergétique éolien disponible. Par ailleurs, et compte tenu des nécessités de conversion du mouvement de l'air (vitesse du vent) en mouvement de rotation de l'éolienne, il y a nécessairement une suite de pertes d'énergie en cascade, avant d'arriver à l'utilisation au niveau des pompes et des génératrices...etc. Alors, par introduction des limites machines, le calcul du potentiel utile réellement récupérable sera fait en fin de compte. Ce dernier, est utilisé pour estimer les débits journaliers pompés pour une hauteur manométrique donnée.

Autrement dit, l'énergie éolienne disponible sous forme de potentiel éolien subit une suite de pertes en cascade jusqu'à la sortie de la machine, qui sont, la limite de Betz, les pertes machines, et les pertes de conversion. Seule, une partie de la puissance éolienne disponible sur un site donné, appelée, puissance utilisable est réellement obtenue à la fin du processus, soit à la sortie de l'éolienne.

Une étude statistique a permis la détermination de la carte des vents de la région étudiée (Fig. 4.9) et les vitesses moyennes annuelles varient entre 3.5 et 6.5 m/s. Les calculs de la puissance éolienne utile sur un site en fonction des limites de la machine éolienne ont permis la détermination des débits journaliers soutirés à l'aide d'une éolienne à pompage mécanique et un aérogénérateur de différentes puissances nominales.

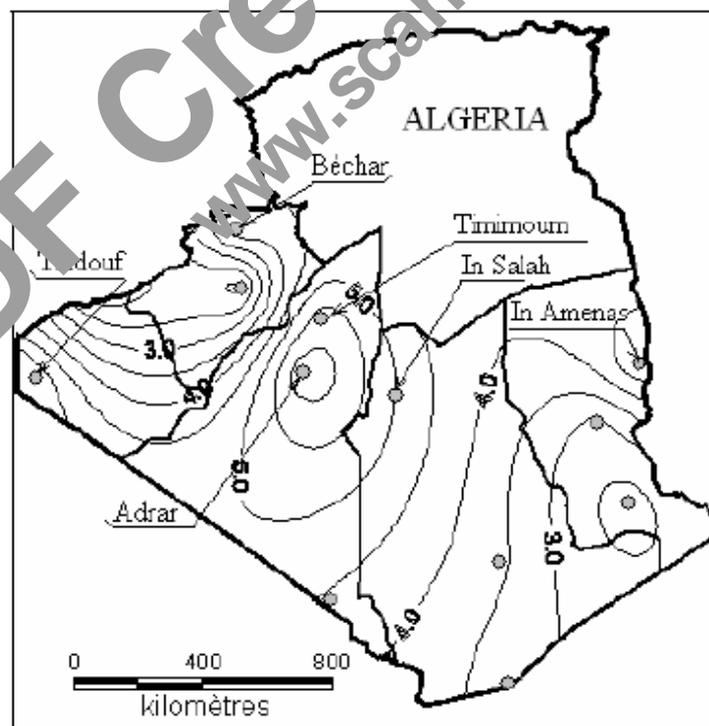


Fig. 4.9 : Carte de la vitesse du vent des régions étudiées, [3].

Les courbes de densité de probabilité (distribution de Weibull) des différents sites sont données en (Fig. 4.10). Ces courbes diffèrent essentiellement par leurs modes respectifs. En effet, les modes passent de 1.6 m/s pour Bechar vers 5.4 m/s pour Adrar.

A la fin du travail, les avantages et les inconvénients de chaque système de pompage ont été mis en évidence (pompage mécanique et pompage électrique), ce qui permettra à l'utilisateur de choisir convenablement le système le plus approprié sur un site donné (Fig. 4.11).

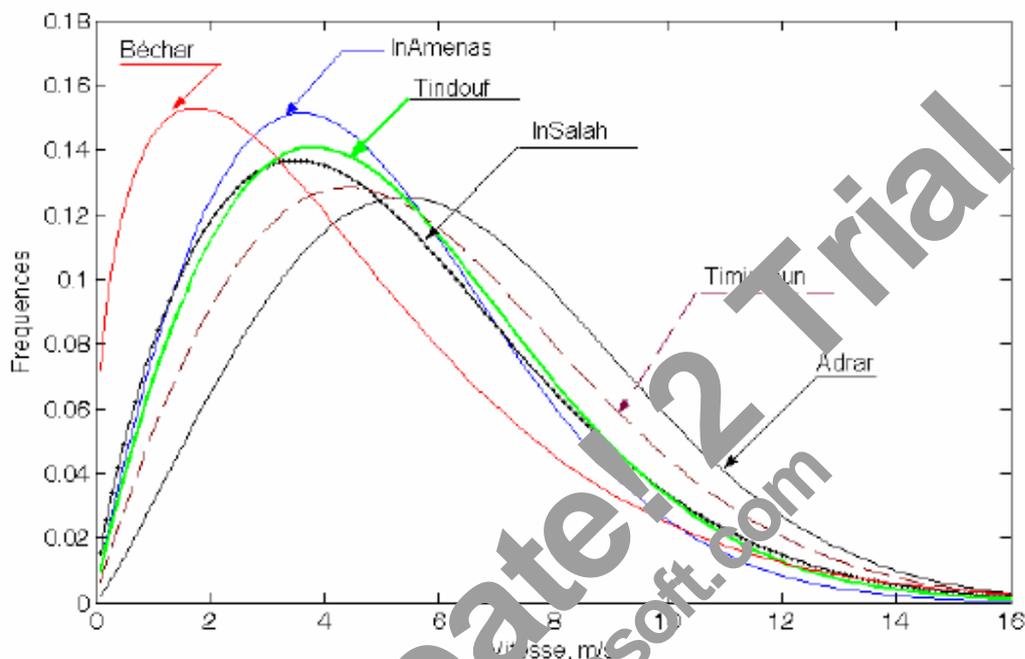


Fig. 4.10 : Distribution de Weibull des différents sites, [3].

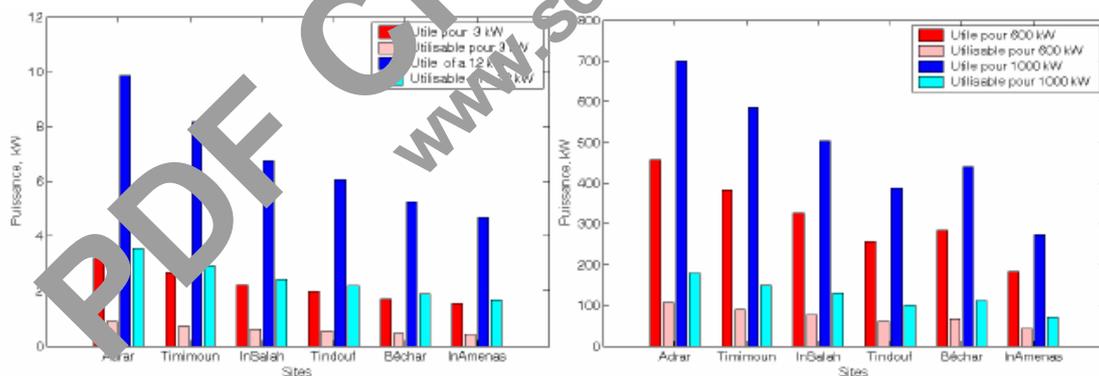


Fig. 4.11 : Puissance utile et utilisable pour les différents sites, [3].

A l'heure actuelle, l'utilisation de l'énergie cinétique du vent est en plein essor dans le monde et commence à être connue en Algérie mais timidement. Les aérogénérateurs peuvent être installés pour produire de l'électricité ou pomper de l'eau sur des sites isolés non raccordés au réseau. Pour utiliser les vents en tant que source énergétique, il faut connaître en premier lieu les besoins énergétiques de la population et étudier l'intensité, la vitesse, la fréquence, et la direction des vents, autrement dit, connaître le gisement éolien dans un site donné. Pour se faire, M. A. Tabet Helal et

al. [4] ont effectué un travail pour la détermination du gisement éolien de la région agricole surplombant la ville portuaire de Beni-saf. Les auteurs mettent en évidence l'utilité d'implanter des machines éoliennes dans cette zone de l'Algérie ouverte vers la mer méditerranéenne. La région de Beni-saf présente un couloir constamment balayé par les vents, les directions des vents mesurées durant au moins 10 ans soufflent en grande partie de l'ouest, le calcul des fréquences donne plus de 60% des vents soufflent entre 250° et 280° , donc des vents venant surtout de l'ouest (Fig. 4.12).

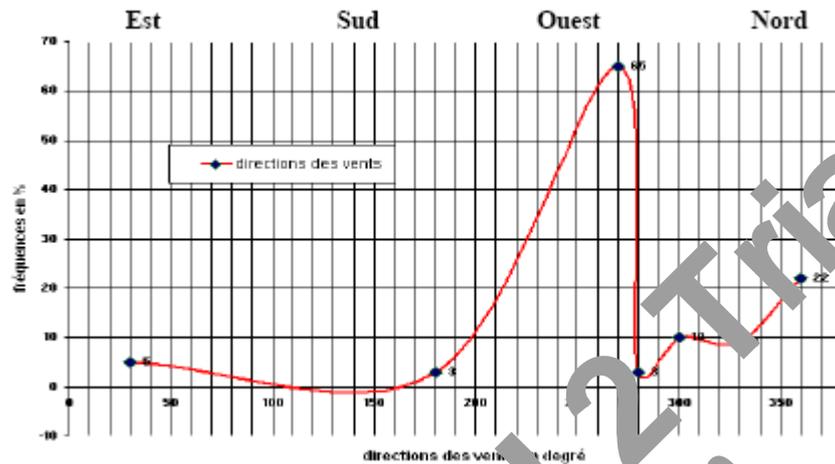


Fig. 4.12 : Directions des vents en fonction de la fréquence des vents, [4].

Les mesures montrent que dans cette région, les vitesses des vents sont entre 10 et 30 m/s durant toute l'année. La moyenne annuelle des vitesses des vents est presque constante, avec un minimum de 13 m/s et un maximum de 20 m/s. À ce stade, ces résultats peuvent affirmer que ces vents peuvent fournir économiquement de l'énergie électrique (Fig. 4.13).

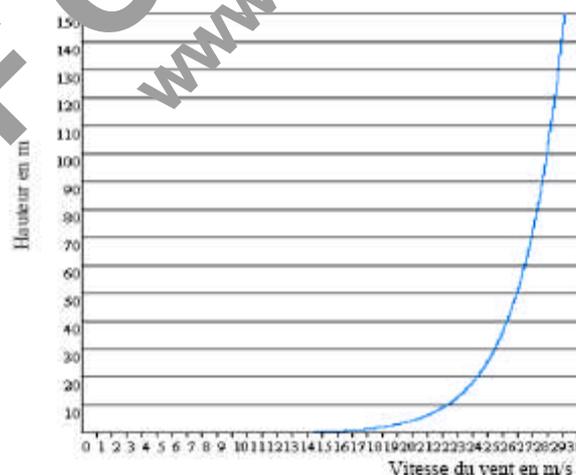


Fig. 4.13 : Vitesses du vent en fonction de la hauteur et du lieu, [4].

Des courbes des vitesses des vents à différentes hauteurs du sol en fonction du classement établi ont été réalisées, à savoir que le classement de la zone a été défini par un nombre représentant une classe de rugosité avec une longueur de rugosité correspondante.

La puissance théorique de l'énergie éolienne et la puissance effective fournie par une éolienne sont calculées et une répartition des puissances des vents à Beni-saf a été établie (Fig. 4.14).

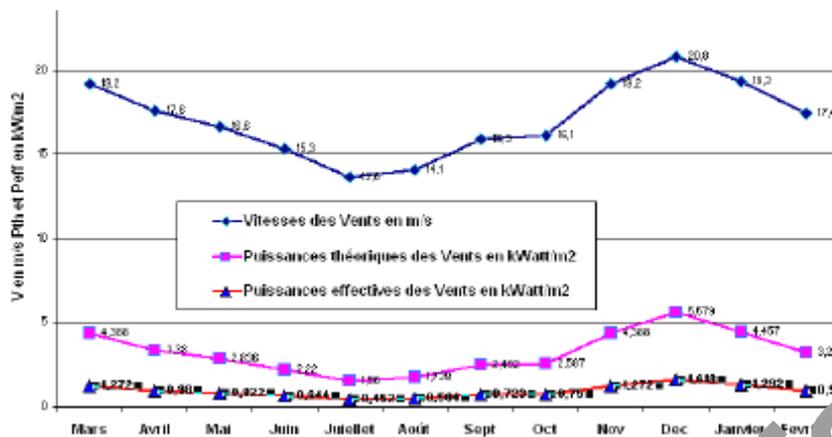


Fig. 4.14 : Répartition des puissances des vents à Beni-saf, [4].

Il est à conclure que, les vents soufflent d'une même direction à des vitesses supérieures à 10 m/s très fréquents et constants, ce qui donnent des puissances effectives élevées favorisant à cette région la possibilité de produire suffisamment d'énergie électrique pour suffire à ces besoins.

Un outil d'aide à la décision dans le domaine des projets éoliens a été réalisé dans le cadre d'un travail présenté par A. Arbaoui et al. [5]. Ce travail constitue un ensemble des tâches qui visent à pallier les insuffisances inhérentes aux approches ne prenant pas suffisamment en compte les phénomènes physiques mis en jeu dans le fonctionnement réel des systèmes éoliens. Ils veulent garder à l'échelle de la décision économique la pertinence des connaissances physiques et d'ingénierie.

Cet outil a été étudié par les auteurs afin d'accomplir l'objectif d'aider les différents acteurs tels que, les gouvernements, les investisseurs, les distributeurs, et les exploitants à prendre des décisions sur des choix inhérents à leurs activités dans le domaine éolien. Il sera utilisé en particulier, pour l'étude de la variabilité des gisements et à la définition architecturale des systèmes éoliens adaptés, la comparaison entre les machines standard, et l'élaboration des scénarios d'approvisionnement en énergie éolienne dans une région donnée.

Pour atteindre cet objectif, les auteurs ont mis en œuvre une démarche de conception architecturale (Embodiment Design), dite : "Conception Inversée Intégrée" (C I I), [6] basée sur trois étapes : analyse et structuration du problème de conception, modélisation et formulation par contraintes, et traitement numérique du problème de satisfaction de contraintes par l'utilisation d'une technique de modélisation par contraintes associée à une méthode de résolution issue de l'intelligence artificielle par l'utilisation d'un solveur CSP numériques basées sur l'arithmétique des intervalles.

La démarche utilisée est la suivante, analyse et structuration du problème de conception conduisant à la formulation par contraintes du problème de conception favorisant à la résolution par solveur CSP pour prendre enfin la décision (Fig. 4.15).

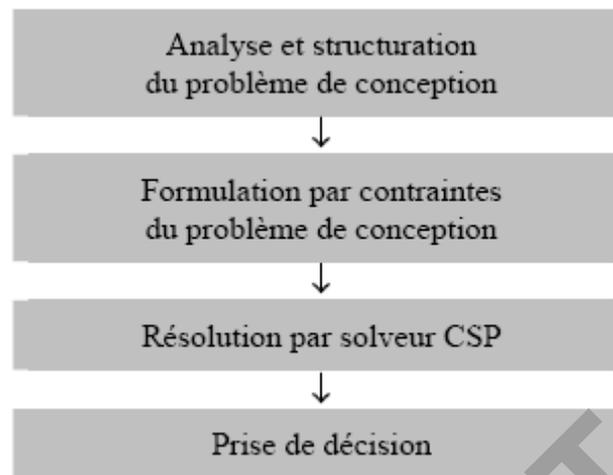


Fig. 4.15 : Démarche utilisée pour l'outil d'aide, [5].

Pour générer les contraintes liées à la quantité d'énergie produite et au coût de l'éolienne, les auteurs ont utilisé des organigrammes techniques, [7]. Les variables qui interviennent dans le modèle de calcul de la quantité d'énergie produite sont retrouvées. Dans ces contraintes, le site est caractérisé par les paramètres de Weibull k et c , un paramètre de la loi de puissance α considéré constant, et la vitesse maximale W_{\max} . Les paramètres k et c sont utilisés pour calculer l'énergie produite par an, tandis que W_{\max} intervient dans le dimensionnement de certains composants du système.

Un modèle de calcul du coût de l'éolienne et de la quantité d'énergie produite, des modèles des coûts divers et de chantier ont été utilisés et permettront à l'outil de donner les informations nécessaires à la prise de décision qui sont, le coût du kWh produit, la quantité de l'énergie produite, le coût total actualisé du projet, et les paramètres qui définissent l'architecture du système éolien.

L'outil présenté a montré sa capacité à mettre en œuvre la modélisation par contraintes et son utilité pour produire une expertise pour les différents acteurs au travers une application sur trois sites différents, un site méditerranéen et deux sites du Nord Européen (Tableau 4.1).

Gisement	Site 1	Site 2	Site 3
Z_0	30	30	30
k_0	2	2	1.4
c_0	8	8	10
α	0.12	0.2	0.12

Tableau 4.1a : Caractéristiques des sites étudiés, [5].

Solution	Coûts des composants du système en % du coût total actualisé du projet				
	Mât	Multiplicateur	Nacelle	Rotor	Génératrice
Standard	25.8	6.6	3.9	17.1	4.2
1	14.8	8.2	4.1	12.4	11
2	13.9	5.8	3.3	10.1	11.9
3	15.1	7.7	4.2	12.5	10.4
4	15.6	7.3	4.22	12.7	9.8

Tableau 4.1b : Comparaison de coûts des composants du système (exprimés en % du coût total actualisé de projet) avec ceux de l'éolienne standard dans le site 3, [11]

Enfin, cette approche de l'échelle du système éolien doit s'étendre aux parcs éoliens et intégrer l'ensemble des contraintes liées à la connexion au réseau, l'effet de sillage et la topographie du site.

Un article a été présenté par Y. Himri et al. [8] portant sur l'analyse des données du vent et sur le potentiel d'énergie éolienne disponible à trois endroits de l'Algérie, à savoir : Adrar, Timimoun, et Tindouf. Or, l'Algérie est parmi quinze pays africains, tels que, Afrique du sud, Eretria, Mauritanie, Cop Avers, Algérie, Lesotho, Seychelles, Madagascar, Somalie, Djibouti, Maroc , Chad, Egypte, Maurice, et Tunisie, qui offrent de bonnes possibilités à l'exploitation du potentiel d'énergie éolienne.

Dans cette étude, les auteurs ont utilisé une ferme hypothétique du vent de capacité installée de 30 MW se composant de 30 éoliennes de 1 MW chacune.

Pour l'évaluation du potentiel d'énergie éolienne, la méthode de De Wind, [9] a été utilisée pour le calcul du rendement d'énergie, les logiciels de Ret Screen, [10] ont été utilisés. Ainsi, les facteurs de capacité de l'installation et de paramètres économique et environnementale devraient être estimés et rapportés.

Cet article utilise les données de la vitesse du vent pendant presque 10 ans, entre 1977 et 1988 de trois stations météorologiques appartenant à Adrar, Timimoun, et Tindouf pour évaluer le potentiel d'énergie éolienne à ces sites (Fig. 4.16).

Les valeurs à long terme de la moyenne annuelle de la vitesse du vent avec la courbe de puissance de l'éolienne ont été employées pour estimer l'énergie annuelle produite pour une ferme éolienne de capacité de 30 MW installée à chaque endroit (Fig. 4.17). Un total de 30 éoliennes chacune de puissance évaluée de 1 MW ont été employées dans l'analyse

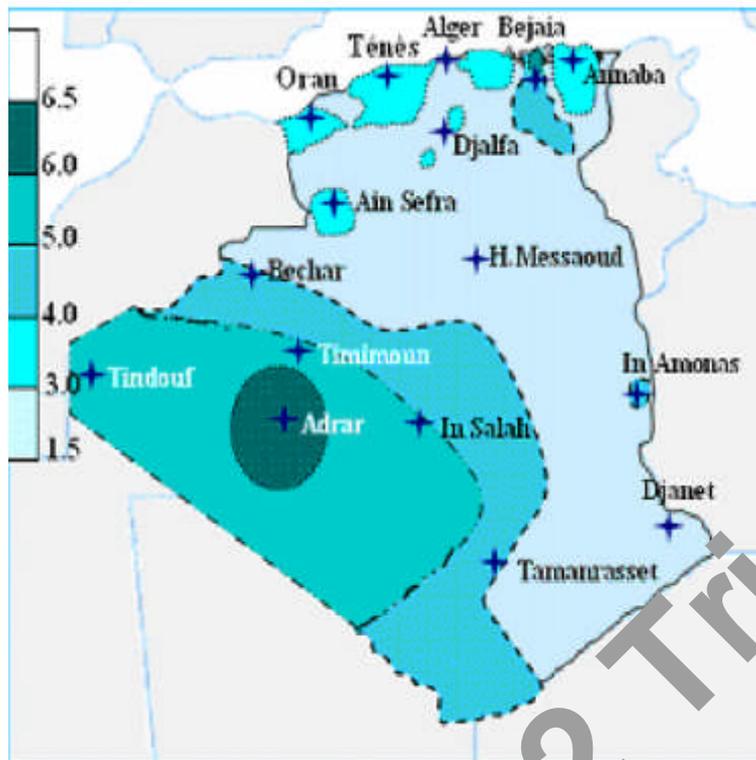


Fig. 4.16 : Carte de l'Algérie donnant quelques stations de mesures du vent, [8].

La vitesse moyenne du vent à long terme à Adrar, Timimoun, et Tindouf était de 5.9 m/s, 5.1 m/s, et 4.3 m/s à 10 m au-dessus du sol, respectivement. Il est observé que, les vitesses de plus fort vent dans le temps du jour sont entre 9.00 H et 18.00 H et relativement plus petit pendant le reste du temps. Les vitesses du vent saisonnières à long terme se sont avérées relativement plus hautes pendant Mars et Septembre en comparaison à d'autres mois.

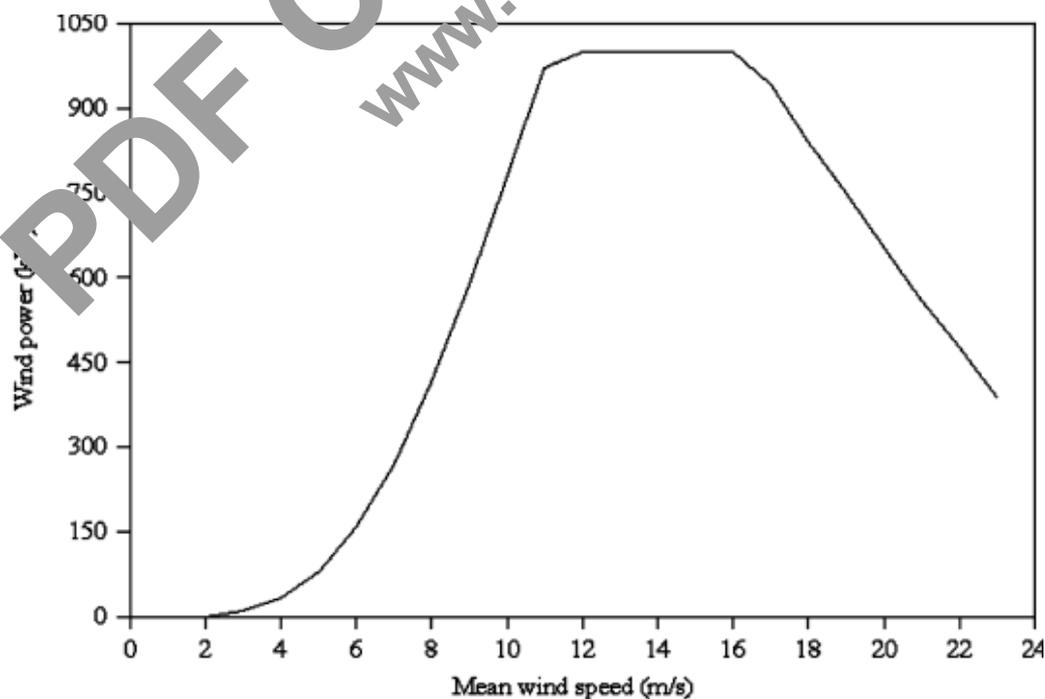


Fig. 4.17a : Courbe de puissance de l'éolienne (DEWIND62), [8].

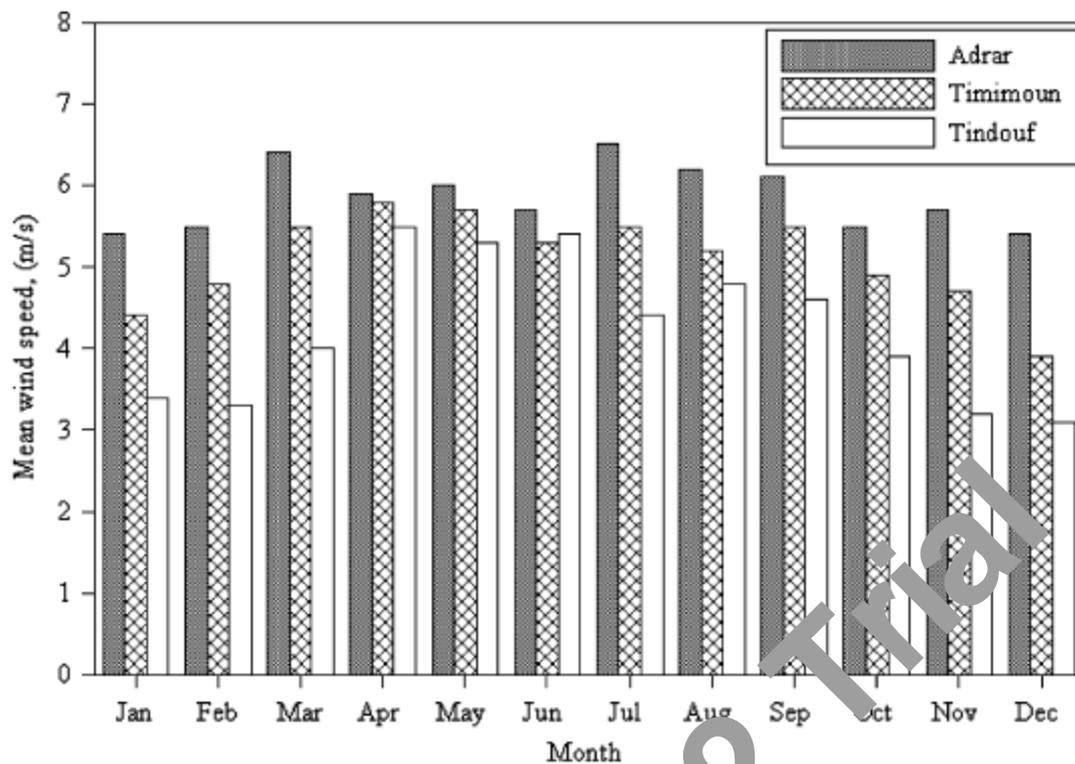


Fig. 4.17b : Variation saisonnière à long terme de la vitesse moyenne du vent, [8].

Les fermes d'éoliennes de la capacité installée de 30 MW à Adrar, Timimoun, et Tindouf si développées, ont pu produire 98.832, 78.138, et 56.040 kWh d'électricité prenant annuellement dans la considération les coefficients d'ajustement de température et de pression environ de 6 % et toutes autres pertes d'environ 10 %, respectivement.

Les facteurs de capacité de l'installation à Adrar, Timimoun, et Tindouf se sont avérés 38 %, 30 %, et 21 % respectivement. Le coût d'énergie correspondant à ces trois endroits était trouvé de 3.1, 4.3, et 6.6 Cents US/kWh.

Un tel développement de ces emplacements a pu résulter dans l'action d'éviter 48.577, 38.406, et 27.544 Tonnes équivalentes de CO₂ dans l'atmosphère locale, et de ce fait en créant une atmosphère propre et saine pour l'habitation.

L'étude de faisabilité économique a fait baser sur les paramètres économiques assumés de la littérature, prouve que le mouvement positif de trésorerie pourrait être obtenu en 1.8, 2.7, et 5.7 ans à Adrar, Timimoun, et Tindouf respectivement, avec le rapport du coût d'avantage correspondant de 6.95, 4.82, et 2.54.

Lors de la conception d'un parc éolien, la disposition des éoliennes sur le terrain peut influencer de façon sensible le prix de revient du kWh, en raison des interférences aérodynamiques qui interviennent entre les machines.

Les problèmes d'interférences aérodynamiques, en effet, comme l'air incident perd de son énergie cinétique au passage d'une éolienne, la puissance générée par une autre éolienne située en aval sera plus faible que celle de la première. Or, sur une surface occupable, il faut maximiser la puissance totale tout en minimisant les coûts de construction et d'entretien du parc pour produire l'énergie à un coût intéressant.

Pour analyser et exposer des solutions optimales à ce problème, M. Bey et al, [11] ont proposé une modélisation et simulation numérique de l'écoulement dans un parc éolien afin d'optimiser l'arrangement des machines entre elles. C'est un projet qui est divisé en plusieurs étapes. Le travail réalisé ici, est de modéliser la présence du rotor dans l'écoulement.

La première étape de ce projet a consisté à modéliser et à simuler numériquement le mouvement rotatoire de l'éolienne qui a une grande influence sur l'écoulement.

Le travail consiste essentiellement à comparer et valider les calculs numériques développé au sein du Laboratoire de Matériaux et Energies Renouvelables (LMER) qui décrivent le mouvement de la turbine avec les résultats expérimentaux.

Pour déterminer le coefficient de portance C_L et le coefficient de traînée C_d pour chaque angle d'incidence du vent sur les pales à 3D, un programme qui est basé sur la méthode des singularités a été utilisé (Fig. 4.18).

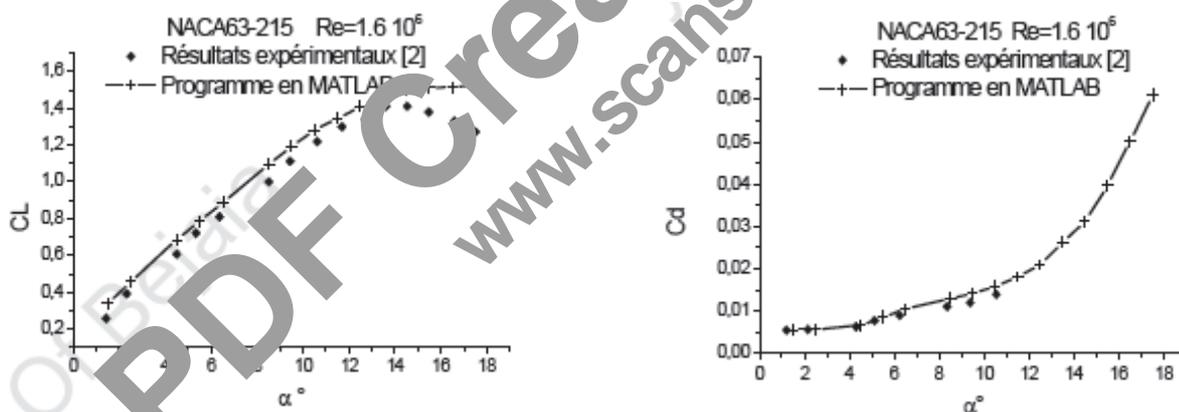


Fig. 4.18 : Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux, [11].

Un modèle général de simulation d'une turbine à trois pales a été construit pour calculer la vitesse de rotation de la turbine et la puissance captée par cette dernière, grâce à un sous programme développé en Matlab et par l'utilisation des coefficients de portance et de traînée déterminés numériquement (Fig. 4.19).

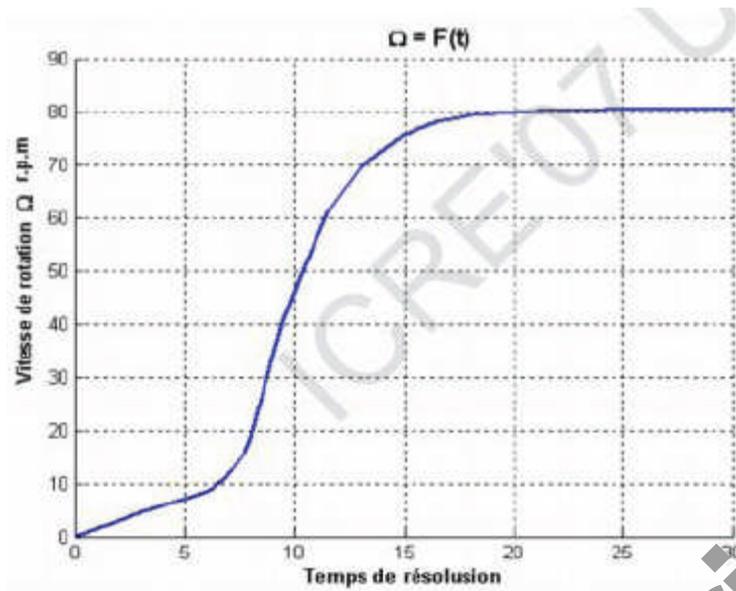


Fig. 4.19 : Vitesse de rotation de l'aérogénérateur en fonction du temps de résolution, [11].

La comparaison des résultats numériques avec les résultats expérimentaux des aérogénérateurs commercialisés, a bien montré la validité des résultats numériques avec les paramètres qui définissent les éoliennes commercialisées.

Le programme ainsi développé offre la possibilité d'une étude dynamique de l'aérogénérateur, où il peut calculer la vitesse de rotation de l'hélice, la puissance captée par l'aérogénérateur, le coefficient de puissance et le couple mécanique.

M. Dergal et A. Seddini, [12] ont fait un travail qui consiste à modéliser et simuler le système de pompage éolien mécanique. Le système est composé d'une éolienne lente multi pale et une pompe à piston, par l'utilisation d'un logiciel Matlab Simulink. Ce logiciel est fait pour modéliser, simuler et analyser les systèmes dynamiques. Il supporte les systèmes linéaires et non linéaires, modélisés dans le temps continu, échantillonné, ou l'hybridation des deux.

Des mesures à différentes places ont montré que la distribution des vitesses du vent le long de l'année peut être approximé par la fonction de distribution de Weibull.

La modélisation du système de pompage mécanique a été établie, en particulier la puissance maximale de l'éolienne et la puissance absorbée par la pompe. Le fonctionnement du système nécessite que la puissance absorbée par la pompe soit égale à la puissance maximale fournie par l'éolienne.

Après simulation, des résultats ont été obtenus tels que, la variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent, la variation de la puissance hydraulique en fonction de la vitesse du vent, la variation du débit en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne, ainsi que la variation de la puissance hydraulique en fonction de la puissance éolienne (Fig. 4.20).

Les résultats ont montré que, les éoliennes de pompage mécanique fonctionnent même si les vitesses du vent sont basses. La durée de vie de ces éoliennes est supérieure à un an, et cela malgré l'absence de l'entretien régulier et périodique.

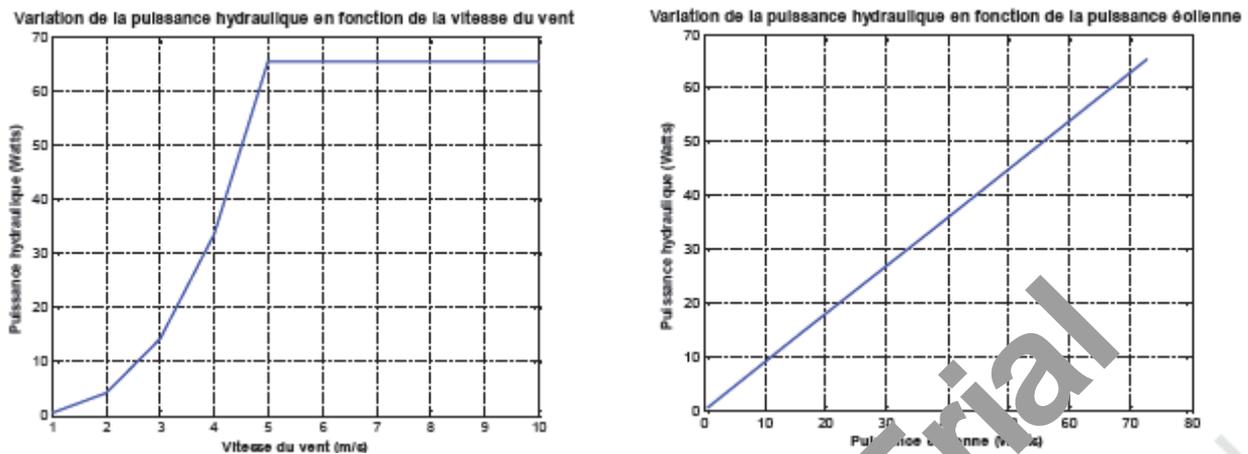


Fig. 4.20 : Variations de la puissance hydraulique en fonction de la vitesse du vent et de la puissance hydraulique en fonction de la puissance éolienne, [12].

Une étude des performances de la machine asynchrone double alimentée (MADA) dans une éolienne de forte puissance à vitesse variable, est un travail de S. Tarnat et al. [13] qui vise la partie mécanique éolienne et la partie électrique du système éolien. Ce travail est consacré à l'analyse, la modélisation, et la simulation d'un aérogénérateur à vitesse variable basée sur une machine asynchrone double alimentée et contrôlée.

Le stator de la MADA est directement relié au réseau, par contre le rotor est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur direct de fréquence appelé convertisseur matriciel (Fig. 4.21).

Le contrôle du transit de puissances active et réactive entre l'éolienne et le réseau est réalisé par le réglage des grandeurs réactives de la MADA.

Dans un premier lieu, la modélisation des différentes parties de l'aérogénérateur est présentée telles que, la turbine, la MADA et le convertisseur matriciel. Après simulation, des résultats ont été obtenus tels que, les variations en fonction du temps de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation mécanique, du rendement, et la variation de la puissance mécanique de la turbine, ainsi que les variations des différentes caractéristiques électriques du système (Fig. 4.22). Pour maximiser la puissance captée, la technique d'extraction de maximum de puissance (MPPT) est appliquée.

Dans un second lieu, le principe de contrôle des puissances échangées entre le système éolien et le réseau est exposé. Les résultats de simulation du comportement dynamique du système étudié sont présentés pour justifier la fiabilité du modèle proposé et de la commande appliquée.

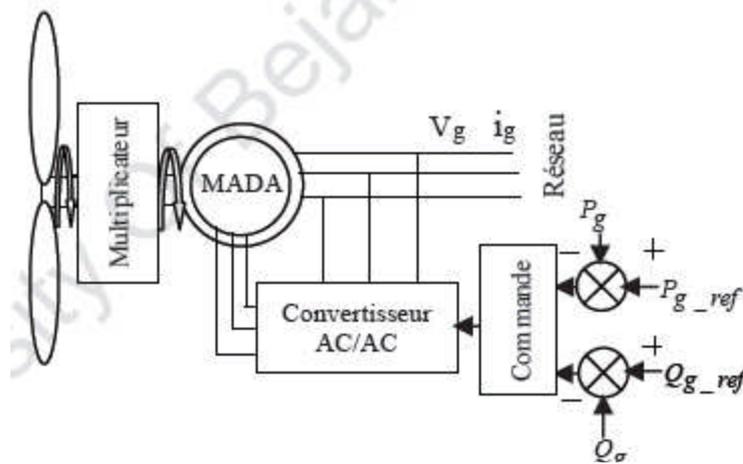


Fig. 4.21 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA et un convertisseur matriciel, [13].

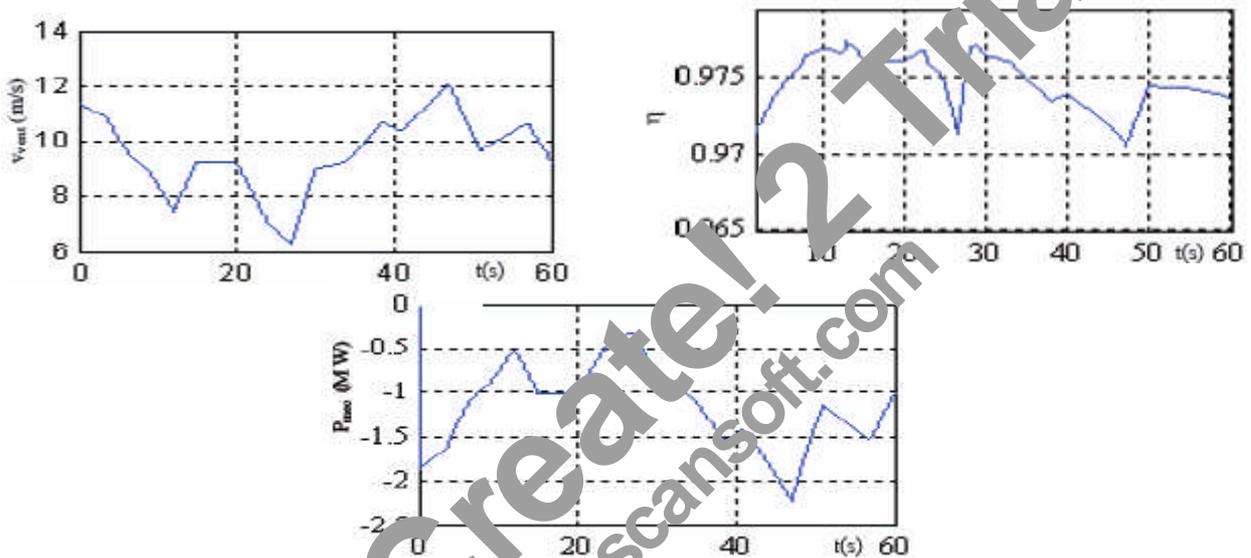


Fig. 4.22 : Variations de la vitesse du vent, du rendement de la MADA et de la puissance mécanique en fonction du temps, [13].

S. Boussalem et al. [14] se sont intéressés à une analyse théorique d'un système de pompage éolien électrique de 1,5 KW et son utilisation pour répondre aux besoins d'eau domestique et d'irrigation dans les zones arides. Or, la mobilisation de l'énergie éolienne permet aujourd'hui d'apporter une solution valable à l'exhaure en zone aride.

Dans ce travail un système de pompage éolien à l'aide d'un aérogénérateur de 1,5 KW de puissance nominale est présenté. Les performances de cet aérogénérateur couplé avec différentes pompes, sont données et utilisées avec celles de l'Atlas éolien de l'Algérie (Fig. 4.23).

Le débit mensuel pouvant être obtenu par ce système dans la région d'Adrar est estimé pour différentes hauteurs du pylône et différentes hauteurs manométriques. Les performances du système en terme de la quantité d'eau pompée dépendent de plusieurs paramètres, surtout du type de pompes installées.

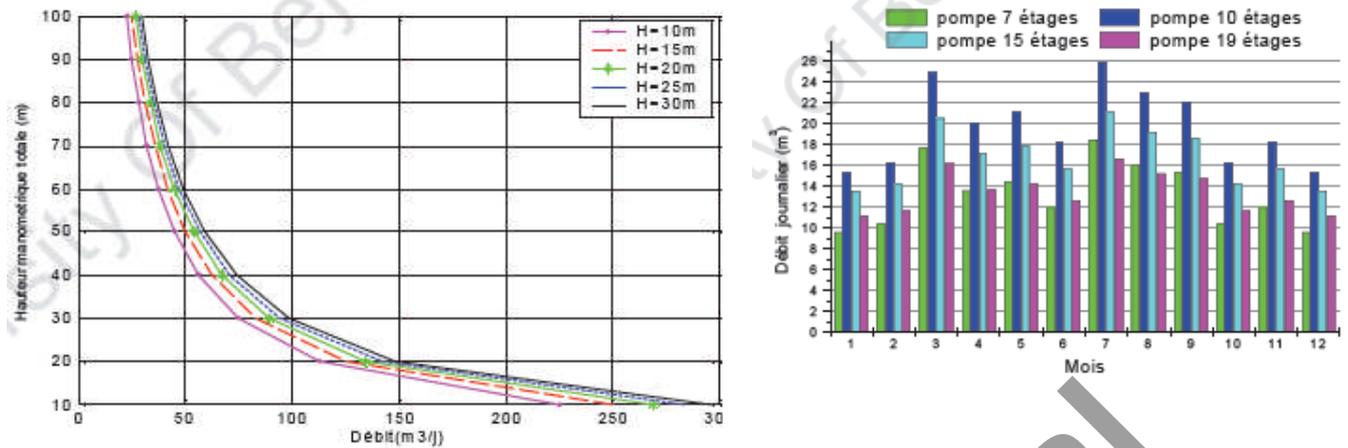


Fig. 4.23 : Variation du débit moyen fourni avec la hauteur manométrique pour différentes hauteurs du pylône sur le site d'Adrar avec éolienne de 1.5 KW (gauche) et estimation du débit pour une hauteur manométrique de 40 m avec différentes pompes (droite), [14].

Les auteurs ont montré que :

- le débit moyen est important lorsque la hauteur du pylône est considérable (car la puissance moyenne produite par le générateur éolien augmente avec la hauteur du pylône). De ce fait, le nombre de foyers alimentés en eau sera plus important.
- lorsqu'on pompe à des faibles profondeurs, les débits moyens sont importants que ceux obtenus à des grandes profondeurs.

Dans le but de l'utilisation de l'énergie éolienne pour l'électrification des sites isolés, une étude d'un aérogénérateur de 1,5 KW de puissance nominale sur deux sites Algériens, à savoir Adrar et Tindouf, a été effectuée par S. Bousalem et al. [15]. Pour se faire, les auteurs ont utilisé les données du vent mesurées par l'Office National de Météorologie (ONM) et ont quantifié le potentiel éolien sur les deux sites, c'est-à-dire la puissance moyenne annuelle disponible. Ensuite, ils ont estimé la puissance moyenne annuelle fournie par l'aérogénérateur sur ces sites par l'utilisation du modèle de Weibull. Et enfin, ils ont déterminé le nombre de foyers pouvant être alimentés en énergie électrique (Fig. 4.24).

La puissance moyenne annuelle produite par l'aérogénérateur (type Bergey 1500) à Adrar étant de 5530 KWh/an à 15 m et elle atteint 6545 KWh/an à 30 m du sol.

Les auteurs ont constaté que les régions d'Adrar et de Tindouf présentent un potentiel éolien excellent. Les aérogénérateurs fonctionneront avec une très grande efficacité à des hauteurs plus élevées, et de ce fait, le nombre de foyers qui peuvent être alimentés en énergie électrique sera plus grand (Fig. 4.24).

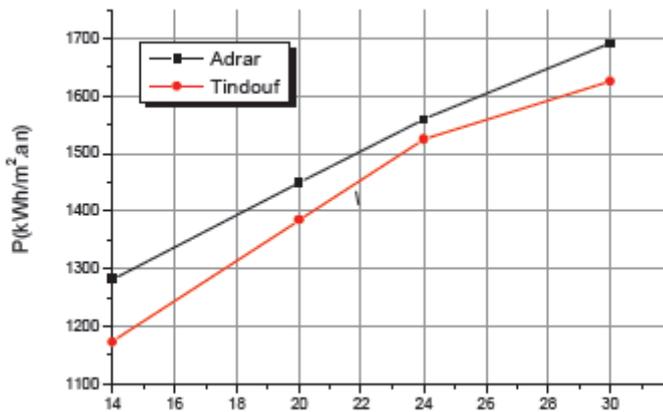


Fig. 4.24a : Densité de puissance moyenne annuelle récupérable en fonction de la hauteur, [15].

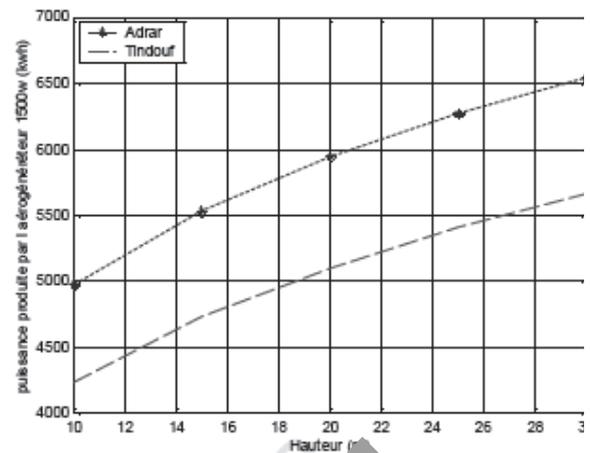


Fig. 4.24b : Nombre de foyers pouvant être alimentés en fonction de la hauteur par un système de 1.5 KW pour le site d'Adrar, [15].

Le travail ainsi effectué, peut donner une idée sur les possibilités d'alimentation en énergie électrique éolienne pour les sites éloignés ou isolés.

M. B. Laouisset et M. Ghali, [16] ont consacré leur travail à l'étude et l'exploitation du gisement éolien dans la région de Ksar Chellala à Tيارت dans le but de dimensionner et choisir l'aérogénérateur destiné à couvrir les besoins énergétiques d'une ferme agricole dans cette région.

Dans un premier lieu, les auteurs ont déterminé les caractéristiques climatologiques et énergétiques du site d'installation du système de conversion de l'énergie éolienne, ainsi que les besoins énergétiques de ce site. Ces calculs ont permis, dans un second lieu, de faire un choix optimal par la détermination des dimensions de l'aérogénérateur qui est destiné à couvrir ces besoins.

Ils ont utilisé le modèle WASP pour le calcul. C'est un modèle qui permet de déterminer la climatologie régional du vent (Tableau 4.3) d'une station météorologique, il s'agit ici de Ksar Chellala. Il utilise les données du vent, de la rugosité des obstacles, et les données topographiques du terrain.

z	0	45	90	135	180	225	270	315	total
10	A=4.4	1.9	1.7	0.6	4.2	2.8	6.0	5.3	3.9
	K=1.44	0.97	0.82	0.55	1.20	0.98	1.89	1.88	1.23
25		5.3	2.3	2.1	0.7	5.0	3.4	7.1	6.4
		1.55	1.04	0.87	0.57	1.25	1.03	2.01	2.03
50		6.2	2.8	2.6	0.9	5.8	4.1	8.2	7.4
		1.74	1.16	0.97	0.60	1.35	1.13	2.21	2.28
Frég		13.7	9.8	9.0	7.6	12.1	10.3	19.3	18.3

Tableau 4.3 : Paramètres de Weibull pour la classe de rugosité «1» pour le site de Ksar Chellala, [16]

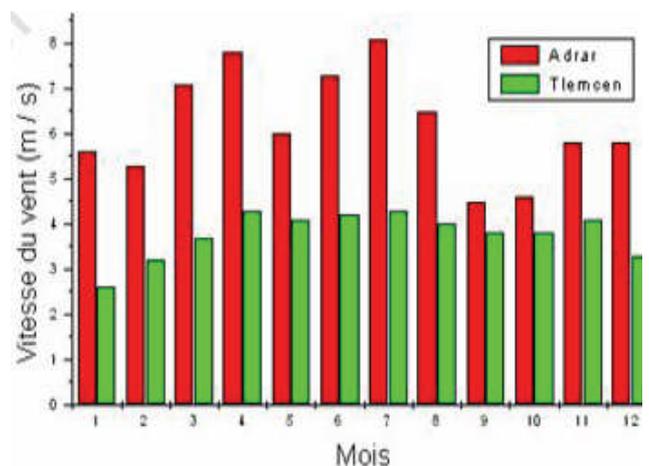


Fig. 4.25 : Moyennes mensuelles de la vitesse du vent à Adrar et Tlemcen, [17].

Un travail effectué par R. Maouedj et al. [17] qui fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

Les auteurs ont présenté une modélisation et une simulation d'un tel système concernant les deux sites : Tlemcen et Adrar (Fig. 4.25). Par l'utilisation des paramètres météorologiques et radio métriques caractérisant ces deux sites, ils ont déterminé les paramètres de Weibull k et c et la puissance récupérée (vitesses moyennes du vent) en fonction de l'altitude et de la rugosité du site (Tableau 4.4).

Ils ont trouvé que le potentiel énergétique récupérable au site d'Adrar est très important (vitesse moyenne annuelle supérieure à 6 m/s) par rapport au site de Tlemcen (vitesse moyenne annuelle d'environ 3,8 m/s) et que la densité de puissance moyenne annuelle disponible sur le site de Tlemcen à 10 m est estimée à 577,69 KWh/m².an et au site d'Adrar pour la même hauteur est égale à 2481,83 KWh/m².an.

Aussi, la densité de puissance annuelle récupérable sur le site de Tlemcen à 10 m est estimée à 329,05 KWh/m².an et au site d'Adrar pour la même hauteur est égale à 1464,30 KWh/m².an.

Alors, l'exploitation de l'énergie éolienne pour les deux sites est favorable même pour les installations de grande puissance.

	k	c	\bar{V}	σ	$\langle V^3 \rangle$	$\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3}$	$\frac{\sigma}{\bar{V}}$	$\frac{V_0}{\bar{V}}$	$\frac{V_1}{\bar{V}}$	$\frac{V_2}{\bar{V}}$	$\frac{V_3}{\bar{V}}$	$\frac{\langle V^3 \rangle}{\bar{V}^3}$	
Tlem	2,02	4,29	3,80	1,97	103,58	0,58	0,89	0,52	0,39	0,81	1,13	1,59	1,89
Adrar	2,15	7,2	6,38	3,12	402,27	6,07	0,82	0,49	0,36	0,84	1,13	1,53	1,78

Tableau 4.4 : Valeurs de divers rapports et facteurs caractéristiques d'un système éolien pour les deux sites étudiés, [17].

Les résultats d'une étude préliminaire sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau à la région d'Adrar y compris Timimoun sont présentés par O. Guerri et al, [18]. En effet, Les quantités d'essais fournis par différents aérogénérateurs de petites puissances sont évaluées en se basant sur les données caractéristiques de la région, les données du vent disponibles, et sur les caractéristiques des forages en cours d'exploitation, ainsi que sur les caractéristiques de production de quelques aérogénérateurs (Fig. 4.26).

L'étude a montré que, pour la région d'Adrar, certains forages peuvent être exploités à l'aide d'aérogénérateurs. L'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau dans cette région est recommandée. Toutefois, avec un aérogénérateur de 10 KW installé sur un mât de 30 m de hauteur, le débit moyen obtenu est de l'ordre de 100 m³/jour et de 60 m³/jour pour un forage de 150 m de profondeur, localisé à Adrar et à Timimoun respectivement.

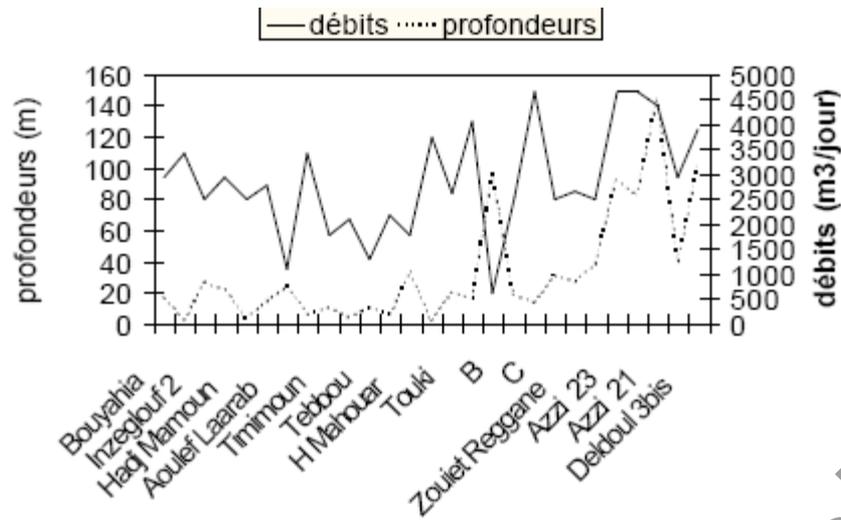


Fig. 4.26 : Caractéristiques de quelques forages en cours d'exploitation dans la région d'Adrar (source ANRH), [18].

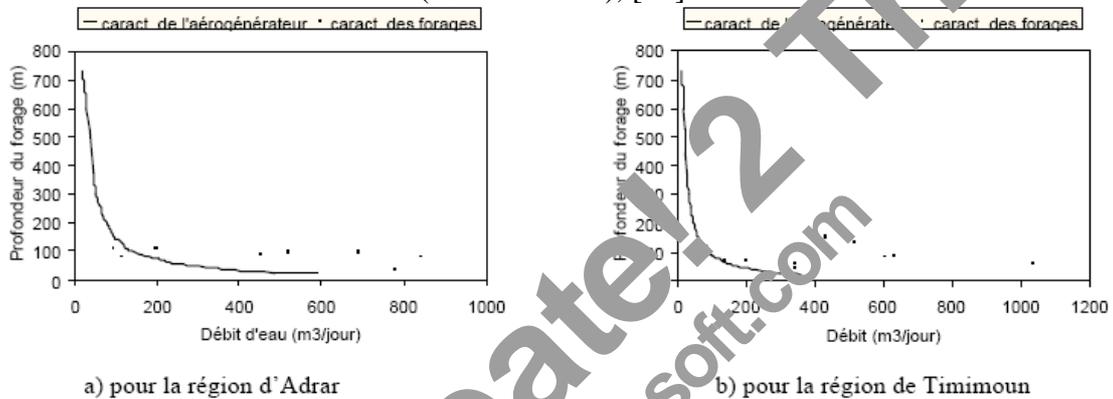


Fig. 4.26 : Comparaison de la courbe de production d'un aérogénérateur type 10 KW avec les caractéristiques de quelques forages en cours d'exploitation, [18].

La taille de l'aérogénérateur, la hauteur du mât ainsi que le type de pompe à installer sont fonctions de la profondeur du forage, du débit d'exploitation, et de la vitesse moyenne du vent.

N. Kasbadji Mebouza [18] dans son travail, un chapitre de sa thèse de doctorat a été consacré à l'application de l'énergie éolienne au pompage d'eau. La première partie de l'étude porte sur la détermination de la puissance éolienne utilisable en fonction des limites de fonctionnement des aérogénérateurs et des paramètres éoliens des sites d'implantation.

La méthode ainsi développée est appliquée pour des sites Sahariens en Algérie, le choix a porté sur cinq sites Sahariens, connus pour leurs besoins en eau et caractérisés par un potentiel énergétique éolien intéressant comparativement au Nord du pays. Ces sites sont, Tindouf, Timimoun, In Salah, Adrar, et In Amenas et correspondant aux stations de mesure du réseau de l'Office National de la Météorologie (ONM). En effet, dix ans de données tri horaires de la vitesse du vent y sont disponibles. En outre, la majorité de cette partie du Sahara a une ressource importante en eau souterraine, à savoir, la nappe Albienne qui affleure dans certaines régions. Par ailleurs, ces régions

sont connues par leur habitat dispersé et qui n'est pas relié au réseau de distribution de l'énergie électrique.

Alors, le potentiel énergétique utile obtenu à la sortie de la machine est calculé respectivement, par l'introduction des caractéristiques de 04 aérogénérateurs de puissances nominales égales à 3 KW, 12 KW, 600 KW et 1000 KW.

La seconde partie de ce travail est consacrée à l'application du pompage avec deux variantes de pompage éolien mécanique et pompage éolien électrique (Fig. 4.27).

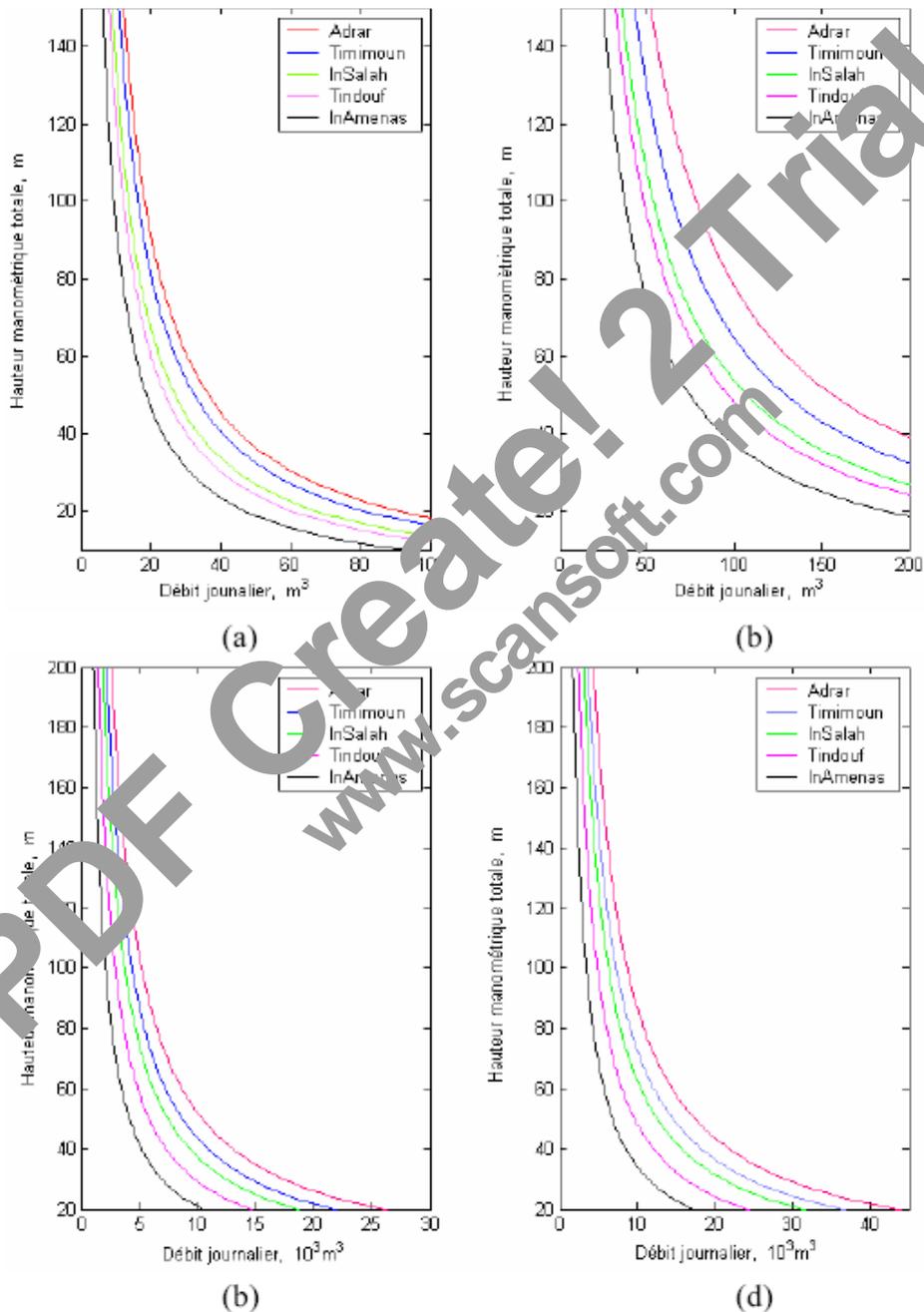


Fig. 4.27a : Débit d'eau pompée pour les cinq sites étudiés (Adrar, Timimoun, In Salah, Tindouf, et In Amenas) en fonction de la hauteur manométrique totale par les aérogénérateurs : (a) 3 KW, (b) 12 KW, (c) 600 KW, et (d) 1000 KW, [19].

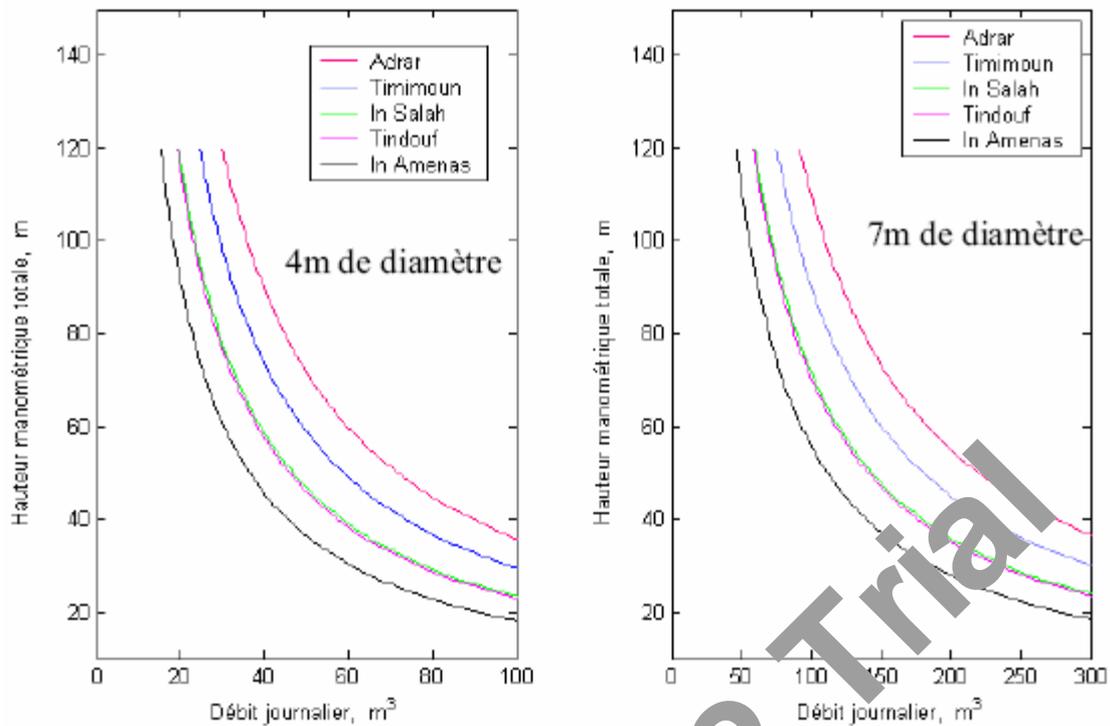


Fig. 4.27b : Débit d'eau pompée pour les cinq sites étudiés en fonction de la hauteur manométrique totale en mode mécanique pour 4m et 7m de diamètre du rotor, [19].

Le potentiel énergétique éolien utilisable de la partie ouest des hauts plateaux Algériens, a été estimé dans un travail effectué par N. Kasbaoui, Merzouk et M. Merzouk, [20] en considérant deux sites représentatifs à savoir, Tiaret et El Bayadh.

Le choix est porté sur ces deux sites Algériens, connus pour leurs besoins en eau et caractérisés par un potentiel énergétique éolien intéressant. Ces sites sont situés dans les villes de Tiaret et El Bayadh et correspondent aux stations de mesure du réseau de l'Office Nationale de la Météorologie (ONM). En effet, de nombreuses données mesurées de la vitesse du vent y sont disponibles. En outre, la majeure partie de ces sites est caractérisée par l'existence de ressources importantes en eaux souterraines utilisées pour l'activité pastorale et agricole.

Les distributions statistiques sont établies pour tous les mois de l'année en traitant les données de dix ans consécutives (Tableau 4.5).

Site	k	c (m/s)	$\langle V \rangle$ (m/s)	$\langle V^3 \rangle$ (m³/s³)	P (W/m²)
Tiaret	1.72	6.20	5.6	381.91	233.92
El Bayadh	1.62	5.28	4.73	257.13	157.49

Tableau 4.5 : Résultats statistiques à 10 m du sol pour les deux sites étudiés, [20].

Les auteurs ont estimé les puissances utiles et utilisables mensuellement en considérant les limites de trois éoliennes du commerce 100 KW, 600 KW et 850 KW de puissance nominale

respectivement (Fig. 4.28). Ils ont estimé aussi, les quantités d'eau que peuvent être pompées quotidiennement pour les mois extrêmes (Janvier et Juillet), (Tableau 4.6).

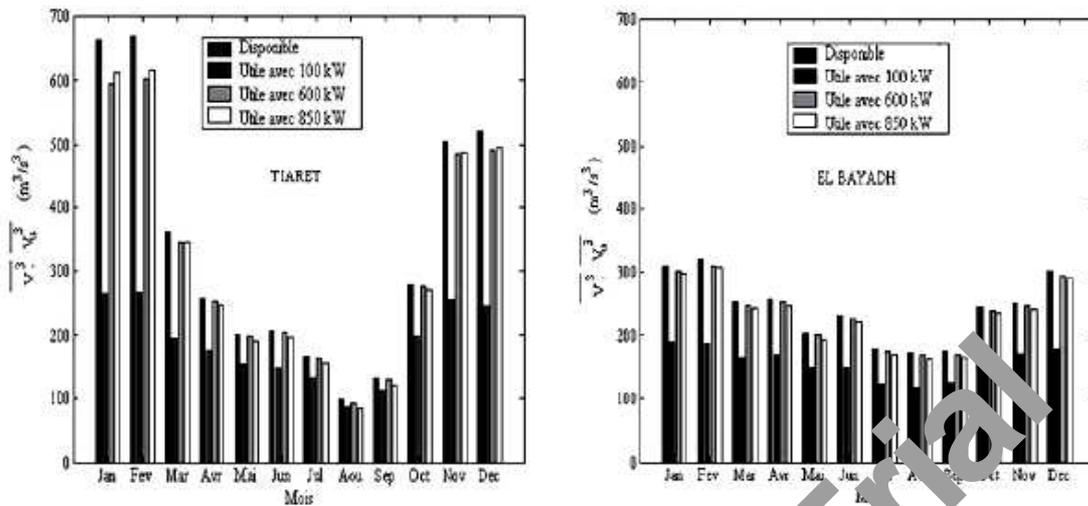


Fig. 4.28 : Puissances disponible, utile, et utilisable pour les deux sites considérés et les trois aérogénérateurs utilisées, [20]

Eolienne	100 kW		600 kW		850 kW	
Mois	Janvier	Juillet	Janvier	Juillet	Janvier	Juillet
El Bayadh	1.64	1.06	1.37	1.37	2.79	1.61
Tiaret	2.34	1.19	1.75	1.35	5.77	1.55

Tableau 4.6 : Quantité journalière moyenne de l'eau pompée (10^3 m^3) selon le site et la machine pour une hauteur manométrique totale de 60 m, [20].

Les résultats ont montré que les performances de la machine dépendent du site et de la période, et que multiplier la puissance nominale d'une éolienne peut s'avérer sans conséquence sur la puissance utilisable et donc sur le débit d'eau pompé.

Les dégradations successives de l'énergie potentielle au cours des différentes transformations font que les rendements de conversion ne peuvent jamais excéder les 30 %. Les principaux facteurs de ces pertes étant, la limite de Betz (invariante) et les limites machines (variables selon la technologie).

4.8-CONCLUSION :

Les ressources énergétiques éoliennes de l'Algérie sont considérables et inépuisables mais ne sont pas exploitées jusqu'à présent. Or, la sagesse et l'économie obligent actuellement à les exploiter dans les applications éoliennes mais en passant initialement par des études de recherche sur les systèmes énergétiques éoliens concernant leurs dimensionnement et performances selon les potentiels énergétiques disponibles.

Dans cette étude, des travaux effectués et analysés par de nombreux chercheurs nationaux prouvent clairement à l'évidence de l'utilisation de l'énergie éolienne et ses applications à travers le territoire Algérien.

Le pompage éolien peut être pratiqué à travers plusieurs régions, surtout pour les endroits isolés, ainsi que pour l'irrigation des terres agricoles qui s'avère une solution intéressante compte tenu des faibles vitesses de démarrage des éoliennes lentes et du potentiel du vent disponible.

L'utilisation de l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique concernant l'électrification des régions isolées est devenue nécessaire pour satisfaire les besoins énergétiques des citoyens avec des coûts abordables.

De plus, des études des éoliennes et des parcs d'énergie ont été envisagées par des travaux insistant sur la disposition des éoliennes sur le terrain, les problèmes d'interférences aérodynamiques et de son influence sur le coût de l'énergie, les problèmes de la connexion au réseau et l'utilisation des centrales hybrides. Ceci, offre l'avantage de l'utilisation de l'énergie éolienne pour les grands projets au niveau national.

Malgré le prix de revient intéressant du Kwh de l'énergie éolienne par rapport aux autres énergies renouvelables, jusqu'à maintenant il n'a pas connu l'enthousiasme des applications réalistes en Algérie.

4.9-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1]. D. L. ELLIOTT and J. C. BARNARD, "Observations of Wind turbine wakes and surface roughness effects on Wind flow variability" Solar Energy vol. 45, N° 5, pp. 265-283, (1990).
- [2]. C. BENOUDJIT, A. BENOUDJIT, et F. YOUCEF ETTOUMI, "Dimensionment of a Wind system by evaluating the Wind potential" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [3]. N. KASBADJI MERZOUK, M. MERZOUK, et B. BENYOUCEF, "Perspectives du pompage éolien dans le Sud Algérien".
- [4]. M. A. TABET HELAL, et N. GHELLAI, "Le gisement éolien à Beni S... Région côtière de l'Ouest Algérien" Revue des Energies Renouvelables : ICPWE (2003) pp. 142-146.
- [5]. A. ARBAOUI, J. P. NADEAU, et P. SEBASTIAN, "Adaptation Site et Système éolien, éléments d'aide à la décision par la modélisation par contraintes" Revue des Energies Renouvelables vol. 8, pp. 81-94, (2005).
- [6]. X. FICHER, J. P. NADEAU, et P. SEBASTIAN, "Conception Inversée Intégrée : Pré dimensionnement de produits par satisfaction de contraintes" Mécanique et Industrie, vol. 3, N°6, pp. 593-605, (2002).
- [7]. D. SCARAVETTI, J. P. NADEAU, and P. SEBASTIAN, "Structured function and Constraints Formulation for an Enhanced Environment Design" International CIRP Design Seminar, Grenoble, France, 12-14 May, (2003).
- [8]. Y. HIMRI, S. REHMAN, L. DRACOU, et S. HIMRI, "Wind power potential assessment for three locations in Algeria" Renewable and Sustainable Reviews (2007).
- [9]. DeWind, Publication, DEWIND6 1000KW Wind Machine technical description, < [http : //](http://)
- [10]. FortScreen International, Clean Energy Project Analysis Software, < [http : //](http://)
- [11]. M. BLY, H. BEGHITRI, et B. BENYOUCEF, "Modélisation et Simulation Numérique d'un aérogénérateur dans un Parc éolien" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [12]. M. DERGAL, et A. SEDDINI, "Modélisation et Simulation du Système de pompage éolien mécanique" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).
- [13]. S. TARAFT, D. REKIOUA, D. AOUZELLAG, et K. GHEDAMSI, "Etude des performances de la MADA dans une éolienne à vitesse variable connectée au réseau"

International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

[14]. S. BOUSSALEM, R. MAOUEDJ, B. BENYOUCEF, et N. BOUSSALEM, "Optimisation du fonctionnement d'un système de pompage éolien" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

[15]. S. BOUSSALEM, R. MAOUEDJ, S. BOUGUIMA et B. BENYOUCEF, "Utilisation de l'énergie éolienne pour l'électrification des sites isolés : Application au Sud Algérien" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

[16]. M.B. LAOUISSET, et M. GHALI, "Dimensionnement et choix d'un aérogénérateur destiné à couvrir les besoins énergétiques d'une ferme agricole résidentielle Ksar Chellala à Tiaret" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

[17]. R. MAOUEDJ, S. BOUSSALEM, et B. BENYOUCEF, "Estimation de la puissance moyenne annuelle de sortie d'une éolienne" International Conference on Renewable Energy ICRE'07, November 25-27, Bejaia, Algeria (2007).

[18]. O. GUERRI, K. AMEUR, A. KAAÛB, S. MOUSSA, et A. HARHAD, "Utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau à l'aide d'un aérogénérateur dans la région d'Adrar" Revue des Energies Renouvelables : zones arides (2002), pp. 63-68.

[19]. N. KASBADJI MERZOUK "Evaluation du Gisement Energetique Eolien, Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie" Thèse de Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen (2006).

[20]. N. KASBADJI MERZOUK, et M. MERZOUK, "Estimation du potentiel énergétique éolien utilisable, Application au pompage dans les Hauts Plateaux" Revue des Energies Renouvelables vol. 9 N°3, pp. 155-163, (2006).

CONCLUSION GENERALE

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com

CONCLUSION GENERALE

Plusieurs travaux et études concernant les énergies solaire et éolienne sur le territoire Algérien ont été passés en revue dans ce modeste travail à savoir : l'estimation du gisement solaire, l'évaluation du potentiel énergétique éolien, l'étude des performances de systèmes énergétiques solaires et l'étude des performances des systèmes énergétiques éoliens.

Malgré que la plus grande partie du pays dans les zones habitées, dispose des quantités suffisantes d'énergie, de nombreuses régions demeurent déficitaires ou insuffisantes, d'où la nécessité d'utiliser d'autres sources énergétiques disponibles sur site. Voilà pourquoi, il est devenu urgent de développer de nouvelles sources d'énergie, principalement solaires et éoliennes. D'où l'importance et l'intérêt de l'évaluation préliminaire et réaliste des ressources de ces énergies avant toute exploitation.

Les travaux de recherches de nombreuses équipes qui ont essayé d'approfondir les multiples possibilités d'applications des énergies solaire et éolienne, aussi bien sous ses aspects purement thermiques (chauffage des logements et de l'eau sanitaire ou de piscines, distillateurs et séchoirs que thermodynamiques (moteurs, pompes, centrales hélioélectriques et photoélectriques, et générateurs photovoltaïques destinés à l'alimentation des systèmes isolés pour l'éclairage, les télécommunications, l'irrigation et la réfrigération ainsi que la production électrique d'origine éolienne destinée à l'éclairage, l'irrigation et le pompage d'eau.

Les études ainsi effectuées dans le domaine du solaire et éolien ouvrent la voie à plusieurs perspectives d'affiner les Atlas énergétiques grâce à la densification des points de mesure, de même que pour les microclimats ou il faudrait les caractériser et cerner au mieux les potentiels énergétiques existants en installant des points de mesures suffisants et tout en insistant sur la précision des capteurs utilisés.

Par ailleurs, il est intéressant d'envisager des travaux de recherches approfondies en vue de définir les propriétés des sols et des terrains pour caractériser leurs réflectivités vis-à-vis du rayonnement solaire en particulier connu par l'Albédo réel du sol, ainsi que son évolution éventuelle. La détection des nuages au niveau supérieur sur divers type de sol, la précision sur les coefficients d'atténuation des divers types de nuages, l'évaluation de la précision obtenue sur l'estimation des composantes du rayonnement solaire en fonction de la complexité du traitement pour diverses régions du pays, les modèles d'extrapolation proposés pour l'estimation du potentiel énergétique éolien pourraient être améliorés grâce à la multiplication des mâts en divers points du territoire par le climat et par la nature du sol pour tester les modèles sur d'autres sites avec minimisation des pas et augmentation de la précision des capteurs utilisés.

Cependant, il serait important d'entamer des études technico-économiques et de la faisabilité des procédés de conversion solaires et éoliens, car l'utilisateur potentiel est aussi intéressé par l'aspect économique (coût, investissement, amortissement...etc) bien que, ce sujet ne soit pas bien examiné dans les études de recherches ainsi analysées, l'évaluation des performances des systèmes énergétiques solaires et éoliens constitue la première phase pour la réalisation des études économiques sur l'utilisation de ces deux types énergies.

Il est bien évident que, ce sont les performances des systèmes que se soient solaires ou éoliens qui permettent de juger que pour une telle ou telle application si l'énergie solaire ou éolienne est préférable aux autres sources d'énergie.

Alors, un ensemble de renseignements sur les ressources énergétiques renouvelables sur l'utilisation des systèmes énergétiques, permet d'aboutir à la constitution d'un atlas des performances de ces système semble nécessaire pour les applications et pour les utilisateurs potentiels afin d'établir une démarche globale de maîtrise de l'énergie en général par :

- La valorisation des potentiels solaire et éolien en Algérie
- La réalisation d'une base de données fiables pour simulation numérique.
- L'optimisation des systèmes de conversion thermiques, photovoltaïques, et éoliens.
- Etudes et les réalisations des procédés de conversion thermique, photovoltaïque et éolien.
- Simulation des performances des systèmes de conversion.
- Etablissement d'une géographie des utilisations de l'énergie solaire à basses, moyennes et hautes températures et de l'énergie éolienne à faibles, moyenne et grande vitesse du vent.

Sont des thèmes à revoir d'une façon approfondie à la charge des chercheurs d'une part, et de l'état Algérien d'autre part, afin de donner une relance remarquable pour le développement du pays et la construction d'une économie autonome et prospère.

L'ensemble de ces thèmes mène dans le but de :

- La généralisation de l'utilisation des énergies solaire et éolienne dans les différents secteurs de l'économie (télécommunication, éclairage, signalisation, chauffage, séchage, irrigation, production d'hydrogène solaire et éolien,...).
- Le développement des techniques de maîtrise des énergies renouvelables.
- L'optimisation des procédés de conversion des ressources énergétiques en particulier d'origine solaire et éolienne.

- La mise en place d'un programme de recherche et de développement dans la conversion thermique, photovoltaïque et éolienne, ce qui permet d'établir une démarche globale de maîtrise de l'énergie en général et une économie prospère forte et autonome.
- La valorisation des ressources énergétiques.
- La contribution à l'évolution du secteur industriel par l'élaboration de nouvelles techniques et procédées de conception dans diverses disciplines.
- La contribution au développement de l'économie nationale par la bonne maîtrise des processus technologiques de production.

PDF Create! 2 Trial
www.scansoft.com