



UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE

HOUARI BOUMEDIENE

FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE

DEPARTEMENT TELECOMMUNICATIONS

THESE

Présentée par :

Fatiha YOUCEF ETTOUMI

Pour l'obtention du titre de :

Docteur d'Etat en Electronique

Analyse et Modélisation Multiparamètres en Météorologie :

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie.

Soutenue publiquement le : 06 Janvier 2002

Devant le Jury :

Président : Mr Amar AISSANI Professeur à l'U.S.T.H.B

Directeurs de Thèse : MM Abd-El-Hamid ADANE Professeur à l'U.S.T.H.B

Henri SAUVAGEOT Professeur à l'Université Paul Sabatier

Examineurs : Mmes Yamina DJELLOULI Professeur à l'Université du Maine

Habiba DRIAS Professeur à l'U.S.T.H.B

Mr Amrane HOUACINE Professeur à l'U.S.T.H.B

JE DEDIE MON TRAVAIL

A LA MEMOIRE DE MA MERE, LA BATTANTE.

A LA MEMOIRE DE MON PERE, LE RASSEMBLEUR.

A MES FILLES SHANEZ ET SHERAZED.

A MON FILS AMINE.

A TOUTE MA FAMILLE.

AVEC TOUTE MON AFFECTION.

FATIHA ,VOTRE DEVOUEE.

REMERCIEMENTS

J'EXPRIME MES REMERCIEMENTS A L'OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE POUR LEUR ETROITE COLLABORATION ET LEUR PRECIEUSE AIDE TOUT AU LONG DE LA PREPARATION DE MA THESE.

J'EXPRIME MA PROFONDE RECONNAISSANCE ENVERS LE CENTRE DE RECHERCHES ATMOSPHERIQUES DE CAMPISTROUS, GRACE AUQUEL CETTE THESE A PU ABOUTIR.

J'EXPRIME MA SINCERE GRATITUDE ENVERS LES SERVICES DE L'U.S.T.H.B ET DU MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE POUR LEUR AIDE DANS LA REALISATION DE MES STAGES CMEP.

J'EXPRIME MA SINCERE GRATITUDE ENVERS MONSIEUR LE PROFESSEUR AMAR AISSANI, DOYEN DE LA FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE A L'U.S.T.H.B, POUR LE GRAND HONNEUR QU'IL ME FAIT EN PRESIDANT MON JURY DE THESE.

MES REMERCIEMENTS VONT A MONSIEUR ABD-EL-HAMID ADANE, PROFESSEUR A L'U.S.T.H.B POUR AVOIR DIRIGE MA THESE, POUR LA CONFIANCE QU'IL M'A TOUJOURS TEMOIGNEE EN ME LAISSANT LA LATITUDE D'ENTREPRENDRE ET D'EXPLORER AUSSI BIEN LES ASPECTS THEORIQUES QU'EXPERIMENTAUX DE LA PROBLEMATIQUE DONT IL M'A CHARGEE. IL A SU AINSI CONSOLIDER UN ESPRIT D'EQUIPE. SES CONSEILS ONT TOUJOURS ETE TRES JUDICIEUX ET M'ONT AIDE A MENER A BIEN CE TRAVAIL. JE TIENS A LE REMERCIER EGALEMENT POUR LE SOUTIEN QU'IL M'A APPORTE EN TOUTES CIRCONSTANCES.

J'EXPRIME MES VIFS REMERCIEMENTS A MONSIEUR HENRI SAUVAGEOT, PROFESSEUR A L'UNIVERSITE PAUL SABATIER, POUR AVOIR DIRIGE MA THESE. JE LE REMERCIE POUR L'ACCUEIL DE QUALITE DONT IL M'A FAIT BENEFICIER AU SEIN DE SON EQUIPE, POUR SA CONSTANTE DISPONIBILITE, SES PRECIEUX CONSEILS, SES ENCOURAGEMENTS, SON SOUTIEN ET SA CONFIANCE. JE TIENS A LE REMERCIER TOUT PARTICULIEREMENT POUR SA CONTRIBUTION EFFICACE A LA VALORISATION DE MES TRAVAUX AINSI QU'A LEUR ENRICHISSEMENT. JE LE REMERCIE AUSSI VIVEMENT POUR AVOIR TANT ŒUVRER JUSQU'A L'ABOUTISSEMENT DE MA THESE.

J'ADRESSE MES REMERCIEMENTS A MADAME YAMINA DJELLOULI, PROFESSEUR A L'UNIVERSITE DU MAINE, POUR L'INTERET QU'ELLE A MANIFESTE A CETTE THESE ET POUR AVOIR ACCEPTE DE PARTICIPER A MON JURY.

J'AIMERAIS EXPRIMER MA PROFONDE GRATITUDE A L'EGARD DE MADAME HABIBA DRIAS, PROFESSEUR A L'U.S.T.H.B, POUR SON INTERESSEMENT A MON TRAVAIL, SES PERPETUELS ENCOURAGEMENTS ET POUR AVOIR BIEN VOULU PARTICIPER A MON JURY.

J'ADRESSE MES VIFS REMERCIEMENTS A MONSIEUR AMRANE HOUACINE, PROFESSEUR A L'U.S.T.H.B, DIRECTEUR DU DEPARTEMENT TELECOMMUNICATIONS, POUR SON SOUTIEN CONSTANT ET POUR AVOIR BIEN VOULU PARTICIPER A MON JURY.

JE TIENS A EXPRIMER MA PROFONDE RECONNAISSANCE ENVERS MONSIEUR MOHAMED KADI, DIRECTEUR DU CENTRE NATIONAL DE CLIMATOLOGIE, POUR SA COLLABORATION ET POUR LE SOUTIEN EFFICACE QU'IL M'A TOUJOURS APPORTE.

JE TIENS A REMERCIER MONSIEUR RABAH NAILI, DIRECTEUR DU MATERIEL TECHNIQUE A L'O.N.M ET TOUS LES INGENIEURS DE CETTE MEME DIRECTION, POUR AVOIR MIS A MA DISPOSITION TOUTE LA LOGISTIQUE NECESSAIRE POUR MENER MES EXPERIMENTATIONS.

JE TIENS A REMERCIER MONSIEUR LAMRI NACEF, INGENIEUR AU CENTRE NATIONAL DE CLIMATOLOGIE, POUR SA CONSTANTE DISPONIBILITE ET SON AIDE QUI M'A ETE PRECIEUSE.

JE REMERCIE TRES FORT MONSIEUR YUCEF TOUMI KAMAL, PROFESSEUR AU MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, POUR SES ENCOURAGEMENTS, SON AIDE INCOMMENSURABLE ET SON INTERESSEMENT A MON TRAVAIL.

JE TIENS A ADRESSER MA GRATITUDE A MONSIEUR NACER MESSEN, DIRECTEUR DE RECHERCHES AU CNRB, POUR M'AVOIR CONFIE DES TRAVAUX EN ZONES SEMI-ARIDES DANS LE CADRE DU PROGRAMME NATIONAL DE RECHERCHE 'AMENAGEMENT-ENVIRONNEMENT'.

JE SAISIS CETTE OCCASION POUR RENDRE HOMMAGE A TOUS MES PROFESSEURS QUI ONT CONTRIBUE A MA FORMATION.

JE TIENS A EXPRIMER TOUT PARTICULIEREMENT MA PROFONDE RECONNAISSANCE ENVERS MON PROFESSEUR, MONSIEUR M. KACIMI POUR M'AVOIR ENCADRE EN INGENIORAT (1976) ET EN MAGISTER (1978), POUR AVOIR GUIDE MES PREMIERS PAS DANS LE DEMARRAGE DE MA VIE PROFESSIONNELLE, POUR SES ENCOURAGEMENTS PERMANENTS, POUR SON SOUTIEN SANS FAILLE ET POUR TOUS LES EFFORTS QU'IL A CONSENTIS EN VEILLANT A UNE CONCRETISATION DE QUALITE DE CETTE THESE.

JE REMERCIE MONSIEUR M. BELHAMEL, DIRECTEUR GENERAL DU CDER, L'EQUIPE DU GISEMENT POUR LEUR SOUTIEN. C'EST DANS UNE ATMOSPHERE CONVIVIALE QUE J'AI EU LE PLAISIR DE TRAVAILLER AVEC MM A. MEFTI ET MY. BOUROUBI, JE LES EN REMERCIE.

JE REMERCIE MONSIEUR BOUMAOUR, DIRECTEUR DE L'U.D.T.S POUR AVOIR MIS A MA DISPOSITION UN MODULE SOLAIRE POUR MES EXPERIMENTATIONS.

MA GRATITUDE ET MON AMITIE VONT A MONSIEUR AHMED BOUBAKEUR, PROFESSEUR ET DIRECTEUR DES ETUDES A L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, DISPOSE ET DISPONIBLE A TOUTE HEURE, M'ASSURANT AINSI, A TOUT MOMENT, UNE AIDE COMBIEN PRECIEUSE!

JE REMERCIE MONSIEUR RABIA AKSAS, PROFESSEUR A L'E.N.P ET CAMARADE DE PROMOTION, POUR TOUTE SA CONTRIBUTION.

J'EXPRIME MA PROFONDE GRATITUDE ET TOUTE MON AMITIE A MADAME LILA FALEK, CHARGEE DE COURS A L'U.S.T.H.B, POUR SON AIDE SANS RESERVE EN TOUTES CIRCONSTANCES.

J'ADRESSE MES VIFS REMERCIEMENTS A MONSIEUR MOUSSA BENHAMADI, DIRECTEUR GENERAL DU CERIST, POUR SON AIDE EFFICACE.

UN GRAND MERCI POUR TOUTE L'EQUIPE DE REPROGRAPHIE DU CERIST, TAYEB ET MOHAMED, POUR M'AVOIR SOULAGE DES PROBLEMES DE TIRAGE.

JE REMERCIE TOUS MES AMIS, MES AMIS DE L'U.S.T.H.B, MES AMIS DU C.R.A, MES AMIS DU CERIST, MES AMIS DU C.D.E.R, MES AMIS DE L'E.N.P ET MES AMIS DE L'A.D.E.P POUR LEUR GRAND SOUTIEN ET LEUR AIDE.

JE REMERCIE TOUS MES ETUDIANTS DE LA FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE, DONT L'INCESSANTE SOLlicitATION M'A OBLIGE A TRAVAILLER DAVANTAGE ET A FORTIFIER MES CONNAISSANCES.

MES REMERCIEMENTS VONT A MADAME NATHALIE DESSENS, PROFESSEUR AGREGEE EN LANGUE ANGLAISE A L'UNIVERSITE DE TOULOUSE, POUR AVOIR CONSACRE TOUT LE TEMPS NECESSAIRE A LA LECTURE DE NOS ARTICLES.

J'HONORE MON FILS AMINE, POUR S'ETRE PRIVE DE SON MICROORDINATEUR EN LE METTANT, PENDANT PLUS DE TROIS ANNEES, A LA DISPOSITION DE MES ETUDIANTS POUR LA REALISATION DE LEUR PROJET DE FIN D'ETUDES. JE ME VOIS TRES DESOLEE, SI NOUS LE LUI AVIONS RESTITUE SANS CLAVIER!

A TRAVERS CE PARCOURS,

TANT D'AMITIE SE SONT TISSEES !

TANT D'EXPERIENCES ENRICHISSANTES !

EN FAIT, CE PARCOURS MERITAIT D'ETRE VECU, CAR IL M'A FAIT ACQUERIR UN DEBUT DE MATURITE SCIENTIFIQUE.

FATIHA.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	5
CHAPITRE 1	9
1. ETUDE DES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE L'ALGERIE	9
1.1 PROBLEMATIQUE.....	10
1.2 PROPRIETES GENERALES.....	11
1.2.1 <i>Classification de Köppen</i>	12
1.2.1.1 Climats tropicaux et humides	12
1.2.1.2 Climats secs.....	13
1.2.1.3 Climat humide et frais	13
1.2.1.4 Climat froid	14
1.2.1.5 Climats polaires.....	14
1.2.2 <i>Autres classifications</i>	14
1.3 LE RESEAU ALGERIEN DE STATIONS METEOROLOGIQUES.....	15
1.3.1 <i>Les variables météorologiques : définitions et instrumentation</i>	15
1.3.2 <i>Répartition des stations</i>	17
1.4 CLIMAT DE L'ALGERIE	21
1.4.1 <i>Analyse harmonique des données mensuelles d'insolation</i>	21
1.4.2 <i>Pourcentage de variance expliquée par les différentes harmoniques</i>	22
1.4.3 <i>Cartographie des amplitudes et des phases significatives</i>	23
1.4.4 <i>Résultats</i>	25
1.5 DISCUSSION.....	25
CHAPITRE 2	27
2. ETUDE STATISTIQUE DES MESURES SOLAIRES	27
2.1 LE RAYONNEMENT SOLAIRE	28
2.2 PRE-TRAITEMENT DES DONNEES.....	29
2.3 DISTRIBUTIONS STATISTIQUES.....	31
2.3.1 <i>Données expérimentales</i>	31
2.3.2 <i>Technique d'ajustement basée sur la distribution beta</i>	32
2.3.3 <i>Cartographie de l'insolation journalière en Algérie</i>	36
2.4 CARTOGRAPHIE DE L'IRRADIATION SOLAIRE EN ALGERIE	36
2.4.1 <i>Modélisation de l'irradiation par l'équation d'Ångström</i>	41
2.4.2 <i>Résultats de la modélisation</i>	42
2.4.3 <i>Cartographie par régionalisation</i>	44
2.4.4 <i>Cartographie par interpolation</i>	48
2.5 CORRELATION DE L'INSOLATION AVEC D'AUTRES PARAMETRES METEOROLOGIQUES	54

2.6	SIMULATION DE L'INSOLATION HORAIRE A PARTIR DE LA NEBULOSITE	56
2.6.1	<i>Modélisation de la nébulosité par des chaînes de Markov du premier ordre</i>	60
2.6.2	<i>Modélisation de l'insolation par un processus autorégressif du premier ordre</i>	61
2.6.3	<i>Résultats</i>	62
2.7	MODELE BASE SUR LES CUMULANTS	63
2.7.1	<i>Formulation</i>	63
2.7.2	<i>Résultats</i>	65
2.8	DISCUSSION	68
CHAPITRE 3	.....	71
3.	ETUDE STATISTIQUE DES MESURES DE TEMPERATURE	71
3.1	GENERALITES	72
3.2	ANALYSE DESCRIPTIVE DE LA TEMPERATURE EN ALGERIE	73
3.2.1	<i>Données expérimentales</i>	73
3.2.2	<i>Evolution de la température normale annuelle</i>	73
3.2.3	<i>Evolution de la température moyenne normale</i>	74
3.2.3.1	Température moyenne normale journalière	75
3.2.3.2	Température moyenne normale mensuelle	76
3.3	ANALYSE DES SERIES CHRONOLOGIQUES	80
3.4	MODELISATION DE LA TEMPERATURE PAR UNE DISTRIBUTION DE LAPLACE-GAUSS	81
3.4.1	<i>Distribution de fréquences</i>	81
3.4.2	<i>Ajustement par la loi de Laplace-Gauss</i>	85
3.4.3	<i>Résultats</i>	87
3.5	CARTOGRAPHIE DES PARAMETRES ET SIMULATION DES DISTRIBUTIONS DE LAPLACE-GAUSS	88
3.6	DISCUSSION	92
CHAPITRE 4	.....	93
4.	ANALYSE DES PHENOMENES METEOROLOGIQUES EN ZONES SEMI-ARIDES.....	93
4.1	DONNEES EXPERIMENTALES	94
4.2	TEMPERATURE EN ZONE SEMI-ARIDE	95
4.2.1	<i>Moyenne horaire de température</i>	95
4.2.2	<i>Distribution des fréquences relatives</i>	95
4.2.3	<i>Diagrammes des fréquences cumulées</i>	99
4.3	ANALYSE DES ECARTS THERMIQUES EN ZONE SEMI-ARIDE	102
4.3.1	<i>Méthodologie</i>	102
4.3.2	<i>Résultats</i>	105
4.4	PASSAGE D'UN VENT DE SABLE DANS UNE ZONE STEPPIQUE ALGERIENNE.....	114
4.4.1	<i>Base de données enregistrées</i>	115
4.4.2	<i>Résultats</i>	115

4.5	POLLUTION PAR LES VENTS DE SABLE EN ZONE SEMI-ARIDE.....	120
4.5.1	<i>Données de vents de sable.....</i>	120
4.5.2	<i>Expérimentation.....</i>	122
4.5.3	<i>Résultats.....</i>	124
4.5.4	<i>Analyse des résultats.....</i>	125
4.6	DISCUSSION.....	127
CHAPITRE 5		129
5. ETUDE STATISTIQUE DES MESURES DU VENT.....		129
5.1	POSITION DU PROBLEME	130
5.2	ETUDE SPATIO-TEMPORELLE	131
5.2.1	<i>Données.....</i>	131
5.2.2	<i>Distribution de Weibull.....</i>	131
5.2.3	<i>Méthodologie.....</i>	132
5.2.4	<i>Cartographie du vent.....</i>	135
5.3	CLASSIFICATION DU VENT	137
5.3.1	<i>Méthode de Ward.....</i>	137
5.3.2	<i>L'algorithme K-means.....</i>	137
5.3.3	<i>Sélection des données.....</i>	138
5.3.4	<i>Classification de l'énergie éolienne.....</i>	138
5.4	MODELISATION BIVARIEE DU VENT POUR ES SENIA (ORAN)	142
5.4.1	<i>Distribution de Weibull pour la vitesse du vent.....</i>	142
5.4.2	<i>Modèle basé sur les chaînes de Markov du premier ordre.....</i>	142
5.4.3	<i>Modélisation temporelle de la vitesse du vent par des chaînes de Markov.....</i>	145
5.4.4	<i>Description de la direction du vent par les chaînes de Markov.....</i>	148
5.4.4.1	<i>Regroupement en une classe.....</i>	149
5.4.4.2	<i>Regroupement en quatre classes.....</i>	149
5.4.4.3	<i>Résultats.....</i>	149
5.5	DISCUSSION.....	152
CHAPITRE 6		155
6. ZONAGE CLIMATO-ENERGETIQUE : APPLICATION A LA CLASSIFICATION EN TYPES DE TEMPS.....		155
6.1	GENERALITES	156
6.2	METHODOLOGIE.....	158
6.2.1	<i>Analyse en composantes principales.....</i>	158
6.2.1.1	<i>Principe de l'ACP.....</i>	158
6.2.1.2	<i>Matrice de données.....</i>	158
6.2.1.3	<i>Méthode.....</i>	158
6.2.1.4	<i>Inertie du nuage de points.....</i>	159

6.2.1.5	Calcul des axes principaux	160
6.2.1.6	Qualité ponctuelle de la représentation	160
6.2.2	<i>Classification automatique</i>	161
6.2.2.1	Distance	161
6.2.2.2	Critère d'agrégation	161
6.2.2.3	Classes	162
6.3	ZONAGE CLIMATO-ENERGETIQUE	162
6.3.1	<i>Données</i>	162
6.3.2	<i>Calcul des composantes principales</i>	163
6.3.3	<i>Estimation de la qualité ponctuelle</i>	163
6.3.4	<i>Interprétation</i>	163
6.3.5	<i>Regroupement des stations</i>	164
6.3.5.1	Projection des individus dans les plans principaux	164
6.3.5.2	Regroupement par classification hiérarchique	166
6.3.6	<i>Station étalon</i>	167
6.3.7	<i>Carte des régions</i>	168
6.4	APPLICATION A LA CLASSIFICATION DES TYPES DE TEMPS.....	168
6.4.1	<i>Données de base</i>	169
6.4.2	<i>Application</i>	170
6.4.3	<i>Caractère synoptique des classes</i>	172
6.4.4	<i>Résultats</i>	172
6.5	DISCUSSION	174
	CONCLUSION	177
	ANNEXE A : EXPERIMENTATION ET REALISATION	181
	HELIOGRAPHE ELECTRONIQUE	181
	PYRANOMETRE ELECTRONIQUE	182
	EXPERIMENTATION SUR DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES	185
	ANNEXE B : LES TESTS STATISTIQUES	193
	ANNEXE C : RESULTATS DU ZONAGE CLIMATO-STATISTIQUE	197
	REFERENCES	219

INTRODUCTION

De par sa position géographique, son vaste territoire et l'importance de ses richesses naturelles, l'Algérie est appelée à se développer davantage dans le futur. Et, comme tous les autres pays, elle est confrontée à des problèmes immédiats concernant la préservation et la protection de son environnement [Daget et Djellouli, 1991].

Malgré ses richesses en hydrocarbures et en gaz, l'Algérie ne peut pas satisfaire toute la demande énergétique à l'échelle nationale. C'est ainsi qu'une bonne partie des régions du Sud et certaines régions du Nord, se trouvent encore non connectées au réseau électrique. En fait, le handicap majeur pour ces régions réside dans les investissements considérables nécessaires à la création de réseaux électriques, eu égard à l'étendue du territoire et à la faiblesse de la densité des populations.

L'Algérie a la chance d'être un pays très ensoleillé et certaines de ses régions sont régulièrement soumises à des vents assez forts. L'exploitation de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne constitue une bonne solution pour répondre aux besoins énergétiques pour les régions situées en dehors des réseaux électriques. C'est pourquoi nous pensons qu'il est utile de mener des études approfondies sur le climat dans un contexte régional en vue d'une meilleure connaissance de la climatologie de l'Algérie et d'une exploitation rationnelle des ressources naturelles en énergie [Youcef Ettoumi ; 2000].

En Algérie, diverses grandeurs météorologiques sont mesurées depuis fort longtemps, dans une cinquantaine de stations réparties sur tout le pays et gérées par l'Office National de la Météorologie (O.N.M.). Depuis plus d'une dizaine d'années, des relations de coopération ont été tissées entre l'O.N.M. et l'U.S.T.H.B., notamment entre notre Laboratoire, à savoir le Laboratoire Traitement d'Images et Rayonnement, et le Centre Météorologique de Dar El Beida. Ceci nous a permis de disposer d'une importante base de données météorologiques et d'entreprendre une analyse statistique des principales grandeurs météorologiques dans le but de développer des applications appropriées à l'exploitation des énergies renouvelables. Les séries de données qui composent cette base de données, ont été collectées dans différents sites de l'Algérie et à divers instants, sur de longues périodes. Elles permettent de déterminer les caractéristiques radiatives, thermiques et éoliennes du climat qui prévaut dans une région donnée de l'Algérie.

Les grandeurs météorologiques mises en jeu, accusent généralement des variations régulières à long terme, auxquelles se superposent des fluctuations aléatoires. Les variations régulières sont déterminées en calculant la moyenne mensuelle ou la moyenne annuelle des données météorologiques, selon que l'on veut connaître les mouvements saisonniers ou les mouvements cycliques de ces grandeurs, comme par exemple le cycle décennal du rayonnement solaire. L'évaluation des fluctuations aléatoires nécessite l'emploi d'approches statistiques qui permettent de trouver les distributions de probabilité des grandeurs météorologiques considérées et de mettre en évidence leur caractère stochastique. Selon le phénomène étudié, les distributions de probabilités qui peuvent être utilisées pour lisser les données expérimentales, sont celles qui suivent la loi beta, la loi de Laplace-Gauss ou la loi de Weibull [Weibull, 1951 ; Tackle et Brown, 1977 ; Ledermann et Lloyd, 1984]. Etant donné leur caractère stochastique, les séries de données météorologiques peuvent être représentées par des chaînes de Markov ou par des processus autorégressifs. D'autres techniques telles que celles reposant sur la corrélation entre différentes grandeurs météorologiques, sont aussi utilisables [Olseth et Skartveit, 1987; Graham et Hollands, 1990; Olseth et Skartveit, 1990; Aguiar et Collares-Pereira, 1992; Aguiar *et al*, 1992 ; Festa *et al*, 1992 ; Loufti et Khtira, 1992].

Dans ce contexte, nous avons développé une étude spatio-temporelle dont la finalité est une cartographie de ces données. Nous nous sommes surtout attachés à étudier les propriétés statistiques du rayonnement solaire, de la température et du vent en utilisant des approches telles que celles mentionnées précédemment [Youcef Ettoumi *et al.*, 2001a].

L'une de ces propriétés est la corrélation qui existe entre les observations effectuées dans le présent et celles du passé, car elle est l'expression de la persistance des phénomènes météorologiques mis en jeu. En particulier, quand les mêmes conditions météorologiques persistent sur plusieurs jours, il est possible de définir le type de temps qui prévaut pendant ces journées. Pour réaliser une prévision fiable du type de temps pour les jours à venir, le traitement statistique des données météorologiques est donc d'une importance cruciale [Youcef Ettoumi *et al*, 1995 a, b; Youcef Ettoumi *et al*, 2001d].

Afin de réaliser une classification des types de temps, nous avons déterminé des régions ayant des caractéristiques similaires du point de vue climatique. C'est ce que nous avons appelé le zonage "climato-énergétique". L'objectif d'un tel zonage est double. D'une part, il s'agit de suppléer à un manque de données telle que le flux d'irradiation solaire et d'autre part, d'identifier des classes de types de temps prévalant en Algérie, et par voie de

conséquence des "journées types". Ajoutons que c'est l'analyse spatio-temporelle des propriétés statistiques des grandeurs météorologiques qui permet de définir les "journées types", traduisant les types de temps à l'échelle de l'Algérie et que la notion de journée – type est très utile pour le calcul des dimensions des systèmes de collecte et de conversion d'énergies renouvelables.

Pour mener à bien notre travail, nous avons pris en considération les mesures les plus couramment effectuées dans les stations météorologiques de l'O.N.M.. Ce sont la température, l'insolation, la pression, la vitesse et la direction du vent, le taux de précipitations, la nébulosité, la teneur en humidité, le type de nuages, leur altitude et leur étendue.

Le premier chapitre de cette thèse a pour but la sélection des grandeurs météorologiques qui interviennent de façon significative dans la description du climat. A cet effet, une étude préalable du réseau formé des stations météorologiques de l'O.N.M., est effectuée. Puis, la banque de données météorologiques que nous avons utilisée, est décrite. Les principales caractéristiques du climat algérien sont aussi présentées.

Le deuxième chapitre est une étude spatio-temporelle des caractéristiques du rayonnement solaire.

Dans le troisième chapitre, une étude similaire a été développée sur les données de température.

Le quatrième chapitre, est une analyse des phénomènes météorologiques en zones semi-arides.

Dans le cinquième chapitre, la vitesse et la direction du vent ont été étudiées en fonction du temps et des coordonnées géographiques des stations météorologiques considérées.

Le sixième chapitre est consacré à la recherche d'un zonage climato-énergétique de l'Algérie et d'une classification objective des types de temps pour une région donnée.

CHAPITRE 1

1. Etude des caractéristiques climatiques de l'Algérie

Etant donné que notre travail revient à analyser diverses grandeurs météorologiques et à rechercher une meilleure représentation de celles-ci, les grandeurs issues du réseau d'observation de l'Office National de la Météorologie, sont décrites dans ce chapitre. Nous avons également mené une étude des caractéristiques climatiques qui prévalent en Algérie en relation avec l'observation.

1.1 Problématique

Comme partout dans le monde, les problèmes environnementaux en Algérie, font l'objet de préoccupations à l'échelle nationale. Ce sont, par exemple, l'épuisement de certaines ressources naturelles, les inondations, les phénomènes causés par les déboisements excessifs de certaines régions ou tout simplement par les feux de forêts, la désertification de certaines zones, les diverses pollutions, une réduction de la diversité des espèces et l'explosion démographique [Bagnold, 1954; UNCOD, 1977].

Tous ces problèmes soulèvent d'importantes interrogations sur les variations du climat au 21^e siècle. Par exemple, nous pouvons nous demander comment les enjeux climatiques interviennent dans un développement véritablement durable ou encore, est-ce que les dérèglements météorologiques des dernières années du 20^e siècle sont des signes précurseurs d'un changement global climatique, comme l'ont annoncé les 4000 spécialistes fédérés par le GIEC (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat de l'ONU).

Ainsi, loin d'être uniformes, les changements de climat auraient plutôt tendance à amplifier les situations extrêmes [Houghton *et al*, 1996]. La variation des climats dans le passé s'explique pour l'essentiel par des causes astronomiques. Une autre question liée à l'évolution du climat est celle de la relation des êtres humains avec l'environnement aux cours des siècles [Mainguet et Callot, 1990; Tett *et al*, 1996]. Comme beaucoup d'autres, les régions algériennes ont subi les mutations astronomiques et sont confrontées à de nombreuses transformations environnementales.

Le climat évoque un ensemble de conditions naturelles qui, au fil des siècles, laissent une trace durable sur les populations vivant dans chacune des régions du monde. Dans les stations météorologiques, il est décrit par l'ensemble des observations de l'état atmosphérique et de l'évolution de ce dernier au cours du temps. Concrètement, ces observations sont exprimées sous forme de mesures de diverses grandeurs météorologiques en fonction du temps qui, archivées sur de longues périodes, traduisent l'ambiance atmosphérique.

Dans ce chapitre, se pose la question de la caractérisation du climat de l'Algérie lorsqu'elle doit être réalisée uniquement à partir des mesures au sol. A cet effet, les caractéristiques du climat et les classifications les plus couramment utilisées en climatologie, sont présentées dans les prochaines sections. Ensuite, nous décrivons le réseau algérien d'observation météorologique et nous donnons la répartition des stations météorologiques sur tout le territoire national. Tout en définissant les grandeurs météorologiques habituellement mesurées au niveau de la surface terrestre, nous décrivons l'instrumentation nécessaire à ces

mesures. Finalement, les nuances du climat de l'Algérie seront analysées et la pertinence du choix des paramètres météorologiques à étudier, sera discutée.

1.2 Propriétés générales

Définir une frontière entre météorologie et climatologie n'est pas chose aisée et reste, pour une grosse part, affaire d'appréciation. Ainsi, nous parlons couramment du climat d'un mois donné, d'une année donnée ou pour l'année en cours, alors qu'il ne peut pas être perçu immédiatement par l'observateur local.

Le climat se définit à partir des séries d'observations faites dans les stations météorologiques, à différents instants et pendant de longues périodes, à l'aide de divers appareils de mesure placés près du sol. Les données météorologiques qui en résultent, permettent alors de calculer des moyennes et des paramètres de variabilité sur des périodes pluriannuelles. Elles montrent que le climat est soumis à de continues variations dues principalement à la turbulence de l'air et la circulation générale de l'atmosphère [Trewartha, 1943 ; Viers, 1968 ; Pedelaborde, 1970 ; Arlery *et al*, 1973 ; Pagney, 1976]. A long terme, ce sont des variations cycliques, telles que les saisons, accompagnées d'une certaine variabilité au cours des années. Régulièrement, un bulletin mensuel climatique est donc rédigé par les services de la Climatologie Nationale, sur la base des enregistrements collectés au jour le jour. Seulement, qu'en est-il des limites de la prévisibilité du temps ? Le fait d'effectuer à l'échelle mensuelle la moyenne d'une variable mesurée localement, masque les variations résultant de la succession des types de temps d'un jour à l'autre, alors que ces variations expriment pourtant la variabilité climatique.

Le temps qu'il fait à un moment donné, traduit l'état atmosphérique observé à cet instant. L'état de l'atmosphère peut s'exprimer par la combinaison de différentes grandeurs météorologiques qui forment aussi les éléments du climat. Pour identifier un tel état, il suffit de mesurer des grandeurs météorologiques, telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent et sa direction, ou la couverture nuageuse. D'autres données d'observations sont disponibles dans les stations météorologiques. Ce sont les données collectées par les radars et les satellites. Toutes ces grandeurs varient, dans le temps et dans l'espace, sous l'influence d'un certain nombre de facteurs, appelés facteurs de climat. Ces facteurs sont la latitude et le rayonnement solaire, la nature de la surface et son revêtement, la circulation générale de l'air, le cycle de l'eau et le relief. Cette distinction entre facteurs et éléments est assez artificielle, car elle ne correspond pas toujours à la réalité. Ainsi, un courant atmosphérique peut être considéré à la fois comme facteur et élément, si par exemple il joue un rôle actif. Ce sont les

mêmes paramètres météorologiques qui permettent la détermination du climat. Cependant ils se distinguent par une différence importante dans l'échelle de temps sur laquelle leur évolution est étudiée. Les observations météorologiques effectuées au niveau du sol, permettent aujourd'hui des prévisions fiables pour les jours suivants en tenant compte des jours passés. Grâce à l'interprétation de ces observations, nous pouvons distinguer différents types de climat. Ceci a donné lieu à diverses classifications dont la plus usitée est celle de Köppen.

1.2.1 Classification de Köppen

La classification la plus fréquemment utilisée par les météorologues pour les cartes climatiques est celle de Köppen [Köppen et Geiger, 1930 ;Köppen, 1931 ; Ackerman, 1941 ; Löhmann, 1993]. Köppen a utilisé essentiellement cinq principaux groupes de végétation pour déterminer les critères suivants :

Au dessous de 18°C, certaines plantes à la limite poussent mal.

L'isotherme 10°C en été, correspondant à la limite de la poussée des arbres.

L'isotherme 3°C délimite les régions où la neige recouvre le sol pendant un certain nombre de semaines au cours de l'année.

Cinq grandes familles de climat symbolisées par des lettres, peuvent alors être distinguées.

Ce sont :

- A** : Les climats tropicaux
- B** : Les climats secs
- C** : Les climats humides et frais
- D** : Les climats froids
- E** : Les climats polaires

1.2.1.1 Climats tropicaux et humides

Dans ces régions, les températures sont presque toujours supérieures à 18°C. Les régions tropicales sont aussi caractérisées par une atmosphère très humide et par d'abondantes chutes de pluie. La classification de Köppen en fonction de l'humidité prévoit, les subdivisions suivantes :

AE: lorsque le mois le plus sec reçoit au moins 60 mm.

AW: lorsque pour un ou plusieurs mois en hiver, les précipitations sont inférieures à 60 mm.

AS: même phénomène mais en été.

1.2.1.2 Climats secs

La catégorie des climats secs regroupe les climats de steppe **BS** et les climats désertiques **BW**. Pour déterminer le degré de sécheresse d'un climat, on compare la température annuelle T (en degré Celsius) et les précipitations annuelles P (en centimètres). On peut alors distinguer trois types de répartition des pluies devant répondre aux critères suivants:

Pluies en toute saison:

$$\mathbf{BS:} \quad P < 2(T + 7) \quad \text{et} \quad P > (T + 7)$$

$$\mathbf{BW:} \quad P < (T + 7)$$

Pluies été:

$$\mathbf{BS:} \quad P < 2(T + 14) \quad \text{et} \quad P > (T + 14)$$

$$\mathbf{BW:} \quad P < (T + 14)$$

Pluie en hiver:

$$\mathbf{BS:} \quad T < P < 2T$$

$$\mathbf{BW:} \quad P < T$$

En outre, une autre distinction peut être faite en tenant compte de la température.

Si la moyenne annuelle est inférieure à 18°C, on ajoute la lettre k. **BSk** désigne un climat steppique froid.

Si elle est égale ou supérieure à 18°C, on ajoute la lettre h. Le symbole **BSh** signifie donc un climat steppique et chaud.

1.2.1.3 Climat humide et frais

Ce climat prévaut surtout dans les zones tempérées. La température du mois le plus chaud est supérieure à 10°C et celle du mois le plus froid, comprise entre -3°C et 18°C.

On distingue les subdivisions suivantes:

Cf: pluie en toute saison;

Cw: saison sèche en hiver;

Cs: saison considérée comme sèche en été lorsque la hauteur des pluies est inférieure à 30 mm au cours d'un mois.

Une troisième lettre est ajoutée pour tenir compte de la chaleur de l'été:

a si la température de l'été est supérieure à 22°C.

b si elle est inférieure à 22°C.

c si elle est supérieure à 10°C moins de quatre mois par an.

d même définition que c mais la température du mois le plus froid est inférieure à -38°C.

Csa caractérise le climat côtier méditerranéen.

Cfb représente le climat océanique.

1.2.1.4 Climat froid

Ce climat est observé dans les régions se trouvant dans la partie des hémisphères localisée aux hautes latitudes, juste en dessous des pôles. La température du mois le plus chaud est supérieure à 10°C et celle du mois le plus froid, inférieure à -3°C.

Les subdivisions sont semblables aux précédentes.

Dfc correspond au climat de la moitié du Nord et de la Norvège.

1.2.1.5 Climats polaires

Le climat polaire est évidemment celui qui prévaut dans la région des pôles. La température du mois le plus chaud, est inférieure à -10°C. On distingue :

ET: lorsque la température du mois le plus chaud est supérieure à 0°C.

EF: lorsque les températures de tous les mois sont inférieures à 0°C. Cette subdivision est aussi considérée comme un sixième groupe sous la rubrique **F**.

1.2.2 Autres classifications

La classification de Köppen a le mérite d'être simple. Elle est le plus souvent utilisée, mais ne tient pas compte de l'altitude. Il existe d'autres classifications dérivées de celle de Köppen comme celle de Müller (1982) qui emploie des critères légèrement différents pour définir les limites des zones arides et subarides. Il y a aussi celle de Thornthwaite (1930) qui a classé les climats en fonction des quantités de précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Il existe des classifications qui s'appuient sur la circulation atmosphérique, les diverses masses d'air et les types de temps.

D'autres approches font intervenir l'influence des surfaces enneigées, des glaces, des eaux des océans et des mers sur le climat et sur les modèles de circulation générale de l'atmosphère [Broecker, 1990 ; Le Provost, 1991 ; Hulme, 1992 ; Pirrazoli, 1996 ; Manabe et Stouffer, 1997; Fennessy et Shukla, 2000]. Il s'agit du système appelé : « Terre-océan-atmosphère-cryosphère ». Ce système n'est plus seulement l'atmosphère soumise uniquement à des facteurs internes de causalité, mais l'atmosphère soumise également à des facteurs externes de causalité.

Ce système regroupe quatre sous-systèmes qui interagissent. Par rapport à la question de l'échelle de temps, il est important de préciser quel effet de mémoire chaque sous-système apporte à l'ensemble de ce système.

Le sous-système atmosphérique est le siège de processus intenses de transfert et de transformation de l'énergie, et stocke l'eau sous forme de vapeur.

Le sous-système Terre interagit avec le sous-système précédent à travers les échanges de masse et d'énergie. L'effet de mémoire thermique des sols est long. Ainsi, au cours de 24 heures, la température du sol ne varie pratiquement pas au-delà de 50 cm de profondeur. Par contre, la couche du sol dont la teneur en eau liquide contribue à l'évapotranspiration des plantes, essentiellement le premier mètre du sol, a une mémoire des anomalies de sécheresse beaucoup plus longue que l'atmosphère.

Le sous-système océanique interagit avec l'atmosphère. Schématiquement, ces interactions océan-atmosphère se produisent de la façon suivante :

L'atmosphère exerce essentiellement un forçage dynamique à court terme sur les surfaces océaniques. En effet, un régime de vent fort persistant pendant plusieurs jours va générer de la houle en pleine mer.

Par contre, l'océan exerce sur l'atmosphère un forçage à plus long terme, de nature thermique, à cause de sa capacité calorifique énorme. En effet, lorsque la couche de mélange de l'océan superficiel est épaisse de 50 à 70 m, sa capacité calorifique devient égale à environ vingt fois celle de l'atmosphère.

Le sous-système « cryosphère », qui regroupe à la fois les surfaces neigeuses et glaciaires des continents et la glace de mer s'étend sur environ 10% de la surface du globe. Il reste encore mal connu. Ces surfaces de neige et de glace interviennent principalement par leur interaction avec l'atmosphère sur le bilan radiatif de l'atmosphère, à travers leur albédo élevé. L'albédo de la neige fraîche est de 90%, mais l'albédo moyen de ces surfaces est de 60%, ce qui est trois fois supérieur à celui d'une surface végétale.

Ces modèles sont utilisés pour simuler aussi bien le climat actuel de la Terre qu'un changement climatique de celle-ci.

1.3 Le réseau algérien de stations météorologiques

1.3.1 Les variables météorologiques : définitions et instrumentation

La connaissance de l'atmosphère et du climat est inséparable des mesures physiques [Perrin de Brichambaut, 1977]. Bien que structurées en réseau, ces mesures sont faites là où se situe l'appareil de mesure. Ce sont donc des mesures quasi ponctuelles effectuées dans l'atmosphère, conformément aux recommandations de l'O.M.M. (1971). Ces mesures sont influencées par l'inertie de l'appareil de mesure et par l'environnement où est placé celui-ci [Asch, 1983].

Les principales grandeurs météorologiques qui interviennent dans la formation du climat, sont utilisées pour décrire les échanges d'énergie dans l'atmosphère. Il s'agit de la température de l'air, de l'humidité relative, de la vitesse du vent et de sa direction, de la pression atmosphérique, du taux de précipitations, de la nébulosité, de l'insolation et de l'irradiation solaire.

La température de l'air ambiant T est la température mesurée généralement, à l'ombre, sous un abri météorologique, par un thermomètre ou un thermographe. Le relevé est fait toutes les trois heures. Il sert pour le calcul des moyennes quotidiennes, décadaires et mensuelles.

L'humidité de l'air H s'exprime par la tension de la vapeur d'eau qui y est contenue et par l'humidité relative. Cette dernière est définie comme étant le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale qu'il peut contenir à une température donnée. La mesure du taux d'humidité est effectuée à l'aide d'hygromètres sous abri. En général, cet appareil fait aussi fonction d'enregistreur. Le relevé est fait soit manuellement soit enregistré toutes les trois heures. Ensuite les moyennes à l'échelle du jour, de la décade ou du mois sont déduites.

Le vent V , exprimé en m/s, est un des phénomènes les plus familiers dont les variations sont complexes. Il se caractérise par sa direction et par sa vitesse qu'on appelle force. Celui-ci est né des différences de pression atmosphérique. Il provoque le déplacement de masses d'air et transporte ainsi des caractères climatiques en rapport avec l'origine de ces masses. Ces déplacements d'air dépendent intensément du lieu géographique. Le vent, exprimé par sa vitesse et sa direction, est mesuré à l'aide d'un anémomètre et d'une girouette. Les valeurs moyennes tri-horaires, quotidiennes, décadaires ou mensuelles sont établies sur la base d'une période de 10 minutes.

La pression atmosphérique, en un endroit donné, est égale au poids de la colonne d'air s'étendant jusqu'à la limite supérieure de l'atmosphère, au dessus d'une surface unité. La pression atmosphérique normale, prise à 0°C au niveau de la mer et aux latitudes moyennes, est de 760 mm de mercure ou 1013 millibars. Aujourd'hui, les baromètres à mercure sont toujours utilisés comme instruments de référence pour la mesure de la pression atmosphérique.

Le taux de précipitations est la quantité de pluie recueillie au cours d'un intervalle de temps donné. La mesure du taux de précipitations est réalisée à l'aide de pluviomètres. Cette

mesure est effectuée par un observateur qui mesure le volume de pluie recueilli pendant un laps de temps d'une heure, d'un jour ou encore d'un mois.

La nébulosité N est un facteur influant sur le rayonnement solaire, elle intervient le jour en interceptant une partie de ce dernier, qu'elle réfléchit, diffuse ou absorbe. Ce phénomène entraîne une diminution de l'échauffement de la surface terrestre. Par contre la nuit, elle réduit le rayonnement global pour atténuer son refroidissement. La nébulosité et la visibilité sont estimées à l'œil nu par un météorologue.

L'insolation SS , ou durée de l'ensoleillement, est la fraction de temps pendant laquelle le ciel est dégagé, c'est un paramètre temporel caractérisant le rayonnement solaire. L'insolation représente pour une journée donnée la somme des intervalles de temps au cours desquels l'intensité du rayonnement solaire a atteint ou dépassé un seuil de 120 W/m^2 . Cette durée est mesurée quotidiennement à l'endroit considéré par un héliographe de Campbell-Stockes. Elle est donnée en heures et dixième d'heure.

Le flux global d'irradiation solaire G représente l'énergie totale reçue par unité de surface horizontale dans un intervalle de temps donné. Ces mesures sont effectuées à l'aide d'un pyranomètre Kipp&Zonen, et cumulées quotidiennement. Elles s'expriment en J/cm^2 ou en Wh/m^2 .

L'héliographe de Campbell-Stockes est un appareil robuste et de conception simple, mais non automatisable. Les pyranomètres utilisés dans les stations météorologiques, sont précis mais fragiles. Dans le but de mesurer facilement et rapidement le rayonnement solaire et sa durée à des échelles de temps de l'ordre de la minute, de l'heure ou de la journée, archiver les données obtenues dans un microordinateur et développer des applications solaires dans n'importe quel site, nous avons construit un héliographe électronique et un pyranomètre électronique. Ces deux appareils sont décrits dans l'annexe A.

1.3.2 Répartition des stations

Toutes les stations météorologiques du monde effectuent au même moment des observations complètes des conditions météorologiques en surface. Etant donné que l'Algérie suit les recommandations de l'O.M.M., les données météorologiques collectées dans les stations professionnelles sont du même type que celles enregistrées par les stations météorologiques des autres pays. L'archivage est différent d'une station à une autre, pour plusieurs raisons. L'une de ces raisons est liée aux solutions recherchées pour restituer les données manquantes et corriger les mesures erronées. La cohérence de l'analyse des données nécessite le choix d'une période d'étude commune à toutes les stations.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Une station météorologique est identifiée par le nom du site où elle est installée et par son numéro d'ordre. A ces deux informations, il faudrait ajouter ses coordonnées géographiques, exprimées en degré, sa hauteur par rapport au niveau moyen de la mer, indiquée en mètre, et parfois, la période de mesures.

En Algérie, le réseau des stations d'observations météorologiques est plus dense. au Nord du pays que dans les régions du Sud. Compte tenu de telles exigences, le nombre de stations que nous avons sélectionnées pour les besoins de notre étude, varie d'une trentaine à une cinquantaine selon les applications envisagées. Aussi, les principales informations sur les bases de données utilisées, sont présentées dans la Table1-1. Chacune des stations est identifiée par ses coordonnées géographiques. La période d'étude, de chacune des stations est spécifiée dans cette table. Les variables concernées pour chacune des études sont également précisées. Ce sont l'insolation $\hat{S}\hat{S}$ (m) pour chaque mois (m) et l'insolation SS pour chaque jour (j) d'une part, la température (T) et le vent (V) mesurés toutes les trois heures d'autre part.

Identification		Coordonnées Géographiques			Période de mesures			
N°	Station	Latitude N	Longitude	Altitude (mètre)	SS (m)	SS* (j)	T(3h)	V (3h)
1	Adrar*	27°49'	00°17'O	263	1992/96	1987/97	1965/97	1977/88
2	Ain Séfra*	32°45'	00°36'O	1058	1992/96	1978/97	1977/97	-
3	Alger*	36°43'	03°15'E	24	1992/96	1953/97	1960/97	1979/88
4	Annaba*	36°49'	07°49'E	5	1992/96	1953/97	1968/97	1979/88
5	Assekrem	23°16'	05°38'E	2710	1992/96	-	-	-
6	Arzew	35°49'	00°16'O	0	1992/96	-	-	-
7	Batna*	35°33'	06°11'E	1052	1992/96	1971/97	1971/97	1977/88
8	Béchar*	31°37'	02°14'O	811	1992/96	1987/97	1960/97	1976/88
9	Bédjaia*	36°43'	05°04'E	1	1992/96	1972/97	1968/97	1977/88
10	Béni Abbès	30°13'	02°17'O	499	1992/96	1987/97	-	-
11	Béni Saf*	35°18'	01°21'O	70	1992/96	1953/97	1982/97	1976/88
12	Biskra*	34°48'	05°44'E	86	1992/96	1965/97	1972/97	1977/88
13	Bouira	36°23'	03°53'E	555	1992/96	-	-	-
14	Bousaada*	35°20'	04°12'E	459	1992/96	1985/97	1985/97	-

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

15	BordjBadji Mokhtar	21°12'	00°34'E	397	1992/96	-	-	-
16	Bordj Bou Arreridj	36°04'	04°40'E	928	1992/96	-	1981/97	1979/88
17	Chelf*	36°12'	01°20'E	143	1992/96	1953/97	1960/97	1977/85
18	Constantine*	36°07'	06°37'E	694	1992/96	1953/97	1960/97	1979/88
19	Djanet*	24°16'	09°28'E	964	1992/96	1987/97	1965/97	-
20	Djelfa	36°41'	03°15'E	1144	1992/96	1971/97	1971/97	1975/87

Table 1-1. Liste des stations du réseau météorologique national considérée dans le cas des régimes radiatifs climatiques, l'étude des mesures solaires (SS), l'étude des mesures de températures (T) et celle des mesures du vent (V) respectivement. L'étoile (*) indique les stations concernées par la régionalisation (suite).

Identification		Coordonnées Géographiques			Période de mesures			
N°	Station	Latitude N	Longitude	Altitude (mètre)	SS (m)	SS* (j)	T(3h)	V (3h)
21	El Bayadh	33°40'	01°00'E	1341	1992/96	1972/97	1973/97	1976/88
22	El Goléa*	30°34'	02°52'E	398	1992/96	1987/97	1960/97	1977/88
23	El Kheiter*	34°09'	00°04'E	1000	1992/96	1978/97	1978/97	1978/88
24	El Oued	33°30'	06°47'E	62	1992/96	-	1964/97	1976/88
25	Ghardaia*	32°24'	03°48'E	468	1992/96	1987/97	1964/97	1978/87
26	Guelma	36°28'	07°28'E	227	1992/96	-	1986/97	-
27	Hassi Messaoud	31°40'	06°09'E	142	-	-	1962/97	1979/88
28	In Amenas*	28°03'	09°38'E	561	1992/96	1987/97	1966/97	1977/88
29	In Guezzem	19°34'	05°46'E	401	1992/96	-	-	-
30	In Salah	27°12'	02°28'E	268	1992/96	-	1965/97	1977/88
31	Jijel	36°49'	05°45'E	2	1992/96	-	1984/97	1984/88
32	Ksar Chellala	35°10'	02°19'E	800	1992/96	-	-	-
33	Maghnia*	34°49'	01°47'O	427	1992/96	1978/97	1976/97	1976/88
34	Mascara	35°13'	00°09'E	511	1992/96	-	1977/97	1977/88
35	Méchria	33°31'	00°17'O	1149	1992/96	-	1985/97	-

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

36	Médéa	36°17'	02°44'E	1030	1992/96	-	-	-
37	Miliana*	36°18'	02°14'E	715	1992/96	1967/97	1967/97	1977/81
38	Mostaganem	35°53'	00°07'E	137	1992/96	-	1976/97	1977/84
39	Msila*	35°40'	04°30'E	441	1992/96	1977/97	1977/97	1977/88
40	Naâma	33°16'	0°18'O	1166	1992/96	-	-	-
41	Oran*	35°38'	00°37'O	90	1992/96	1953/97	1960/97	1979/88
42	Ouargla	31°35'	05°24'E	139	1992/96	-	-	-
43	Oum El Bouaghi	35°52'	07°07'E	889	-	-	1986/97	-
44	Saida*	34°52'	00°09'E	750	1992/96	1977/97	1978/97	1977/86
45	Sétif*	36°11'	05°15'E	1033	1992/96	1981/97	1981/97	1981/88
46	Sidi Bel Abbès	35°11'	00°39'O	486	1992/96	-	-	-
47	Skikda*	36°53'	06°54'E	1	1992/96	1960/97	1960/97	1977/88
48	Souk Ahras*	36°17'	07°58'E	680	1992/96	1986/97	1986/97	-
49	Tamanrasset*	22°47'	05°31'E	1377	1992/96	1987/97	1960/97	1976/88

Table 1-1. Liste des stations du réseau météorologique national (suite).

Identification		Coordonnées Géographiques			Période de mesures			
N°	Station	Latitude N	Longitude	Altitude (mètre)	SS (m)	SS* (j)	T(3h)	V (3h)
50	Tébessa*	35°25'	08°07'E	820	1992/96	1972/97	1972/97	1977/88
51	Ténès	36°30'	01°20'E	17	1992/96	-	-	-
52	Tiaret	35°21'	01°28'E	977	1992/96	-	1984/97	1984/88
53	Timimoun	29°15'	00°17'E	312	1992/96	-	1979/97	1977/88
54	Tizi Ouzou	36°42'	04°03'E	188	1992/96	-	-	-
55	Tindouf	27°40'	08°06'O	401	-	-	-	1976/84
56	Tlemcen*	34°57'	01°17'O	592	1992/96	1980/97	1980/97	1980/87
57	Touggourt*	33°07'	06°08'E	85	1992/96	1987/97	1974/97	1977/88

Table 1-1. Liste des stations du réseau météorologique national.

1.4 Climat de l'Algérie

L'Algérie est un vaste territoire, couvrant une superficie de 2 381 741 km². D'après les études géographiques les plus courantes, trois types de climat prévalent en Algérie [Köppen et Geiger, 1930 ; Köppen, 1931]. Ce sont un climat doux et tempéré de type méditerranéen, un climat à caractère continental et un climat de type saharien. Le climat continental est chaud en été et avec des hivers plutôt rudes, où la présence des neiges est dominante. Le climat saharien concerne le sud connu par ses chaleurs torrides et ses pluies diluviennes, dévastatrices.

En réalité, le climat qui prévaut en Algérie est beaucoup plus nuancé. Toute personne peut aisément distinguer des différences climatiques entre la région Oranaise et celle d'Alger. Et pourtant, toutes deux sont des zones côtières. Le climat dans la région méditerranéenne de l'Algérie subit actuellement une sécheresse importante. Quelques fois, une période de faibles précipitations et de déficit hydrique, coïncide avec l'été. La sécheresse estivale est longue, car pendant l'été, on observe fréquemment des périodes de trente jours consécutifs sans aucune pluie. Un phénomène d'inversion des saisons a été constaté dans les régions du Hoggar et du Tassili. Ceci donne à cette région un climat différent de celui qui prévaut habituellement dans le sud du pays, comme à Béchar et à Adrar. Ce climat très particulier résulte de l'influence de la zone de convergence intertropicale.

La division de l'Algérie en trois zones climatiques est compatible avec les variations de l'ensoleillement d'un endroit à un autre du pays. Pour vérifier la validité d'une telle classification, nous avons effectué une caractérisation globale des régimes radiatifs observés en Algérie. Pour ce faire, les mesures d'insolation collectées quotidiennement dans cinquante quatre stations météorologiques réparties sur tout le territoire algérien, ont fait l'objet d'une analyse spatio-temporelle (voir Table 1-1). Celle-ci est une analyse harmonique qui permet d'obtenir une régionalisation du réseau de mesures d'insolation et de déterminer les régimes saisonniers observés par les cinquante quatre stations considérées. La régionalisation du réseau météorologique revient alors à découper l'Algérie en régions homogènes, c'est à dire des régions formées de points qui reçoivent la même insolation.

La classification en régions homogènes et l'évolution des régimes saisonniers de l'insolation permet de mettre en valeur les aspects quantitatifs, en relation avec les régions à fort ensoleillement, et les aspects qualitatifs, liés à l'évolution annuelle du rayonnement solaire.

1.4.1 Analyse harmonique des données mensuelles d'insolation

Les techniques d'analyse harmonique et de classification automatique ont été très utilisées pour caractériser les variations du rayonnement solaire à diverses échelles de temps, c'est à dire le mois, le jour ou l'heure [Balling, 1983 ; Phillips, 1984 ; Gallegos et Lopardo, 1988 ; Amato *et al*, 1989; Koussa *et al*, 1990 ; Mefti *et al*, 1991 ; Youcef Ettoumi *et al*, 1995 ; Bouroubi, 1998 ; Mefti *et al*, 1999 ; Youcef Ettoumi *et al*, 2000 a].

Compte tenu de ses variations saisonnières, l'insolation peut être exprimée sous la forme d'une série de Fourier qui s'écrit:

$$S\hat{S}(m) = A_0 + \sum_{r=1}^{N/2} A_r \cos\left(\frac{2\pi}{N} m r - \theta_r\right) \quad (1-1)$$

où :

$S\hat{S}(m)$: insolation moyenne mensuelle modélisée ;

N : nombre d'observations = 12 mois avec m = 1-12;

r : ordre de l'harmonique ;

$A_0 = \bar{S}\bar{S}$: moyenne mensuelle de l'insolation calculée sur la période 1992-1996.

Les autres paramètres du développement de Fourier, c'est à dire l'amplitude A_r et la phase θ_r , sont respectivement :

$$A_r^2 = \left(\frac{2}{N}\right) \left[\left(\sum_{i=1}^N SS(i) \sin\left(\frac{2\pi}{N} i r\right) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N SS(i) \cos\left(\frac{2\pi}{N} i r\right) \right)^2 \right] \quad (1-2)$$

$$\theta_r = \arctan \left[\left(\sum_{i=1}^N SS(i) \sin\left(\frac{2\pi}{N} i r\right) \right)^2 / \left(\sum_{i=1}^N SS(i) \cos\left(\frac{2\pi}{N} i r\right) \right)^2 \right] \quad (1-3)$$

1.4.2 Pourcentage de variance expliquée par les différentes harmoniques

Le pourcentage de variance "VAREX" expliquée par chaque harmonique, est:

$$VAREX(\%) = 100 \times \frac{A_r^2}{2\sigma_{SS}^2} \quad (1-4)$$

où σ_{SS} est la variance totale.

Elle donne une indication sur la variabilité de l'insolation durant l'année. Une analyse judicieuse des gradients spatio-temporels de ce paramètre, ainsi que de l'amplitude et de la phase des harmoniques permet d'identifier les régimes climatiques du territoire étudié. La Fig. 1-1. représente les courbes de la variance expliquée en fonction de la latitude du lieu. Ces courbes ont été obtenues en considérant les six premiers harmoniques.

1.4.3 Cartographie des amplitudes et des phases significatives

Les Fig. 1-2 et 1-3 représentent les cartes d'interpolation des phases et des amplitudes des harmoniques les plus significatives. Ces cartes montrent le degré de variabilité de l'insolation sur les différentes régions du territoire algérien. Les amplitudes permettent de quantifier les fluctuations saisonnières alors que les phases nous renseignent sur la distribution annuelle de ces fluctuations.

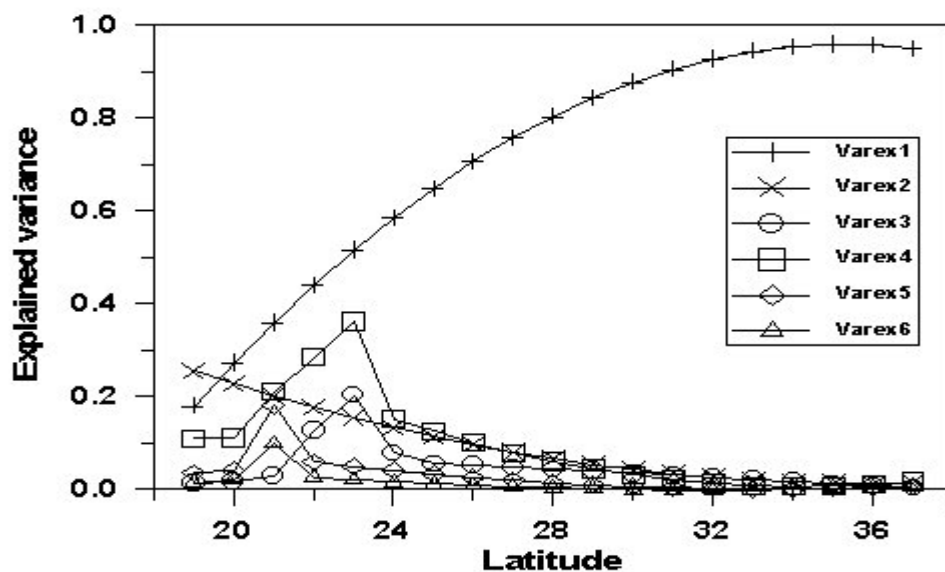


Fig.1-1. Variance expliquée en fonction de la latitude pour les six premiers harmoniques.

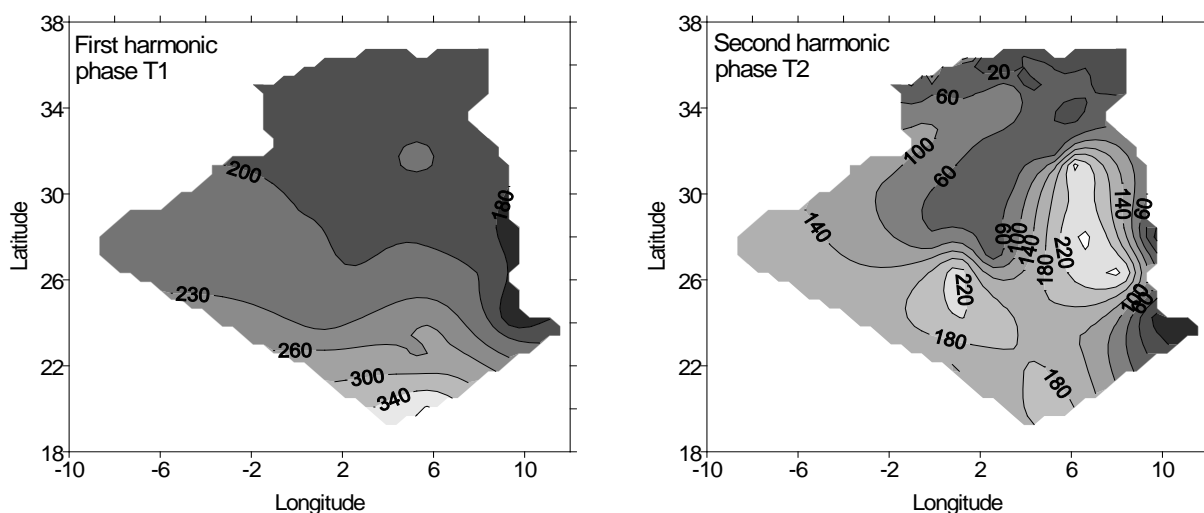


Fig.1-2. Cartographie des phases des deux premières harmoniques.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

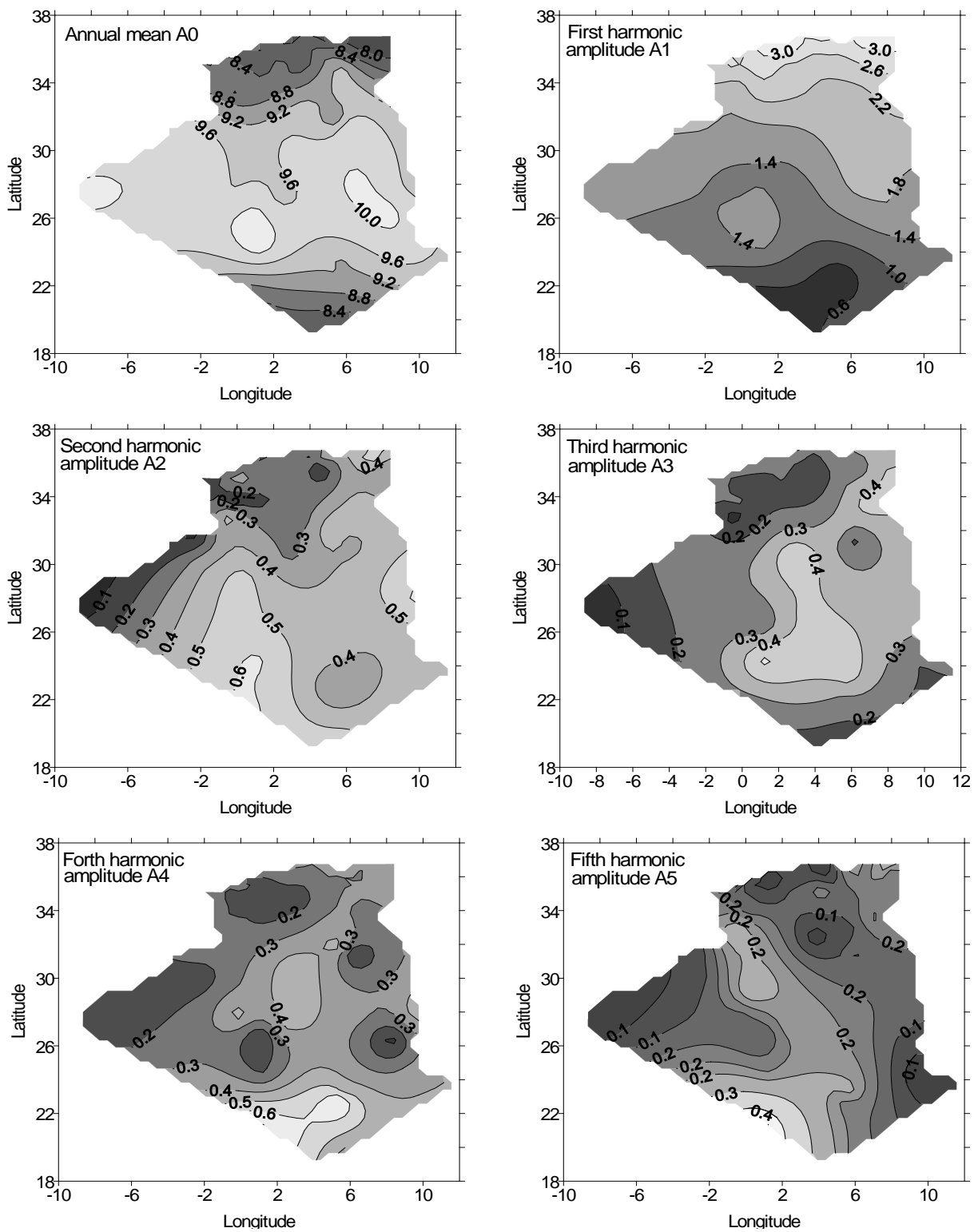


Fig. 1-3 Cartographie de l'amplitude annuelle et de celles des cinq premières harmoniques.

1.4.4 Résultats

L'application de l'analyse harmonique aux données mensuelles d'insolation a montré que la première harmonique explique plus de 90% de la variance totale pour les stations situées au Nord de l'Algérie et sur les Hauts plateaux. Cette variance est comprise entre 60 et 90% pour les sites situés dans le centre du Sahara et est inférieure à 60% sur la région particulière du Hoggar et du Tassili. L'analyse de l'amplitude des harmoniques ainsi que le pourcentage de variance expliquée, permet de décrire les principaux régimes radiatifs des différentes zones que nous avons déterminées.

La première zone est celle pour laquelle la latitude est toujours supérieure à 32° . Elle inclut donc le Nord et les Hauts Plateaux. Elle est caractérisée par des régimes saisonniers à variation annuelle importante. Cependant dans ces régions, le régime saisonnier présente une prédominance de deux saisons, l'été et l'hiver. Au Sahara, aux latitudes comprises entre 25° et 32° , apparaissent des variations saisonnières importantes. La troisième zone est formée du Hoggar et du Tassili. Sa latitude est comprise entre 18° et 25° . Dans cette région, la variation annuelle est très peu marquée par rapport aux variations saisonnières.

1.5 Discussion

La classification effectuée au paragraphe 1.4, est intéressante dans la mesure où le réseau de collecte de données que nous avons considéré, couvre tout le territoire algérien. Grâce à l'analyse harmonique, nous avons pu regrouper les stations qui possèdent des caractéristiques climatiques similaires du point de vue radiatif. La classification en zones homogènes qui en découle, permet alors une compression de l'information qui initialement n'était pas exploitable directement. Cette classification nous a permis également de réaliser une identification locale des types de saisons qui prévalent en Algérie.

Comme une telle approche est basée sur des mesures d'ensoleillement, elle nous renseigne sur les régimes radiatifs. Mais, elle occulte entièrement certaines nuances climatiques propres aux régions. Par exemple, le regroupement du Nord et des Hauts Plateaux, du point de vue du flux d'irradiation solaire, est correct. Mais, le Nord dont la région du Tell, se différencie des Hauts Plateaux par son humidité. Le climat du Nord est méditerranéen, avec des étés chauds et secs et des hivers doux et pluvieux. C'est d'ailleurs la zone la plus humide de l'Algérie, avec des précipitations annuelles variant entre 400 et 1000 mm. Le Nord se caractérise également par des températures hivernales de 11°C et des températures estivales de 25°C . En été, le sirocco, un vent très sec et très chaud en provenance du Sahara, souffle souvent dans cette région. Dans les Hauts Plateaux, le climat est plus sec puisque les précipitations

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

annuelles ne dépassent guère 200 à 400 mm. Remarquons que la démarcation entre l'Atlas Saharien et le Sahara n'apparaît pas avec la classification basée sur l'analyse harmonique puisque ces deux régions font toutes les deux partie de la deuxième classe. L'Atlas Saharien est à la limite d'un climat aride. Le Sahara est un désert sec et tropical. C'est aussi une région ventée et désertique, où les amplitudes thermiques sont le plus souvent énormes. En effet, les variations de température dans le Sahara sont extrêmement élevées le jour et très basses la nuit. Elles s'expliquent par l'absence totale d'une humidité capable d'en atténuer les contrastes. La hauteur des pluies annuelles est inférieure à 130 mm dans l'ensemble du désert algérien.

Par contre, notre approche permet de distinguer les régions du Hoggar et du Tassili de celle du Sahara. En effet, le climat qui prévaut dans le Hoggar et le Tassili est plutôt de type aride et chaud. La température moyenne hivernale à Tamanrasset est de 10°C. En plus, cette région connaît la sécheresse tout au long de l'année.

D'après cette discussion, les mesures de l'ensoleillement donnent une description incomplète du climat, puisqu'elles ne nous permettent pas de percevoir les nuances de celui-ci. Pour atteindre une meilleure caractérisation du climat, il faudrait donc adjoindre d'autres paramètres météorologiques tels que le taux d'humidité, la température et le vent. C'est ce que nous comptons faire dans les prochains chapitres.

CHAPITRE 2

2. Etude statistique des mesures solaires

Ce chapitre traite essentiellement des propriétés statistiques du rayonnement solaire obtenues à l'échelle horaire et à l'échelle journalière. Les modèles utilisés permettent de représenter, de reconstituer et de simuler le rayonnement solaire. L'étude menée sur les moments à différents ordres, met en évidence la persistance du phénomène.

2.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la source d'énergie qui est à l'origine des mouvements de l'atmosphère, d'un grand nombre de réactions physico-chimiques et de divers processus biologiques. L'énergie produite par le Soleil, puis transmise au globe terrestre et à son atmosphère, est un facteur essentiel du climat [WMO, 1981]. Le rayonnement solaire est donc un des indicateurs du climat qui prévaut dans une région donnée. Les grandeurs météorologiques qui caractérisent le rayonnement solaire mesuré au niveau du sol, sont l'insolation, le flux d'irradiation solaire et la nébulosité.

A titre indicatif, les Fig. 2-1, 2-2 et 2-3 donnent les diagrammes de l'insolation en fonction du temps pour Alger, lorsque les mesures sont respectivement totalisées sur l'année, sur le mois et sur le jour. Les Fig. 2-1 et 2-2 ont été établies à partir de données archivées sur une période de quarante ans, soit 1960/ 99, alors que la courbe de la Fig. 2-3 a été construite en considérant des données journalières d'insolation collectées pendant la période 1997/99.

La Fig. 2-1 permet de voir comment évolue le cycle décennal du rayonnement solaire sur quatre décennies. Cette courbe est le résultat de deux mouvements. L'un est une tendance lente probablement liée au réchauffement de la Terre. L'autre est une variation cyclique résultant de l'activité solaire qui a lieu pratiquement toutes les onze années.

La courbe de la Fig. 2-2 exprime les variations de la durée de l'ensoleillement causées par le mouvement de la Terre autour du Soleil, donc liées aux saisons.

Les variations saisonnières sont aussi observées sur la courbe de la Fig. 2-3. D'après cette courbe, des fluctuations aléatoires se superposent au mouvement périodique des saisons. De telles fluctuations obtenues à l'échelle de la journée sont représentatives des perturbations météorologiques. Compte tenu de l'importance des variations saisonnières, l'insolation est donc une variable aléatoire qui est fortement non-stationnaire.

Pour mener à bien l'étude des caractéristiques du rayonnement solaire, nous disposons de données journalières d'insolation enregistrées sur de longues périodes dans différentes stations météorologiques du réseau algérien. Nous possédons aussi des données d'irradiation solaire collectées dans quelques sites de l'Algérie.

Afin de mettre en évidence les propriétés statistiques du rayonnement solaire, nous procéderons, ci-après, à un pré-traitement de ces données consistant essentiellement à les normaliser par rapport à leurs variations hors-atmosphère et à rendre stationnaire la variable aléatoire représentative de ce phénomène . Puis, nous utiliserons, tour à tour, les distributions

beta, les processus autorégressifs, la méthode de régression linéaire et l'analyse des cumulants pour élaborer des modèles spatio-temporels de l'insolation et de l'irradiation solaire. L'impact de cette étude est le dimensionnement des systèmes de conversion d'énergie solaire.

2.2 Pré-traitement des données

Le pré-traitement consiste tout d'abord à organiser les fichiers de données en fonction des différentes échelles de temps considérées dans cette étude et à vérifier que les séries chronologiques représentatives des données solaires, sont complètes et ne comportent pas de mesures erronées.

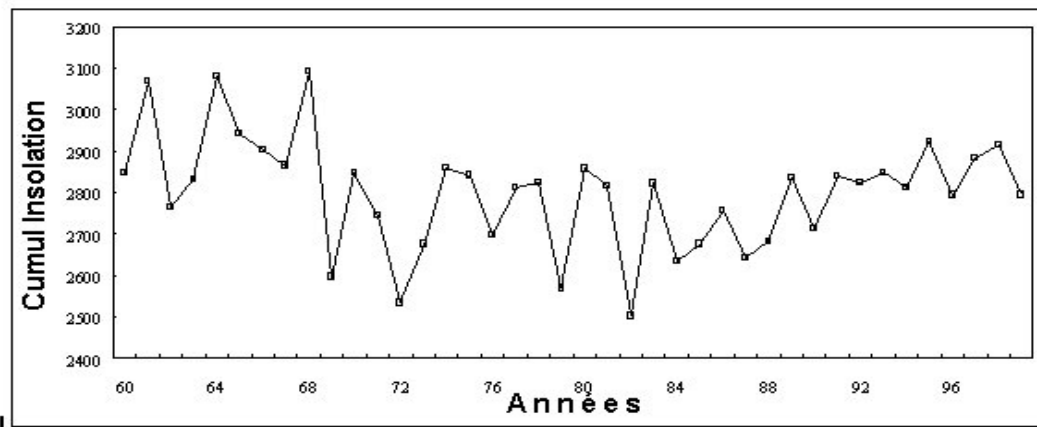


Fig. 2-1 Insolation annuelle en dixième d'heures pour la période 1960 à 1999, Dar El Beida (Alger).

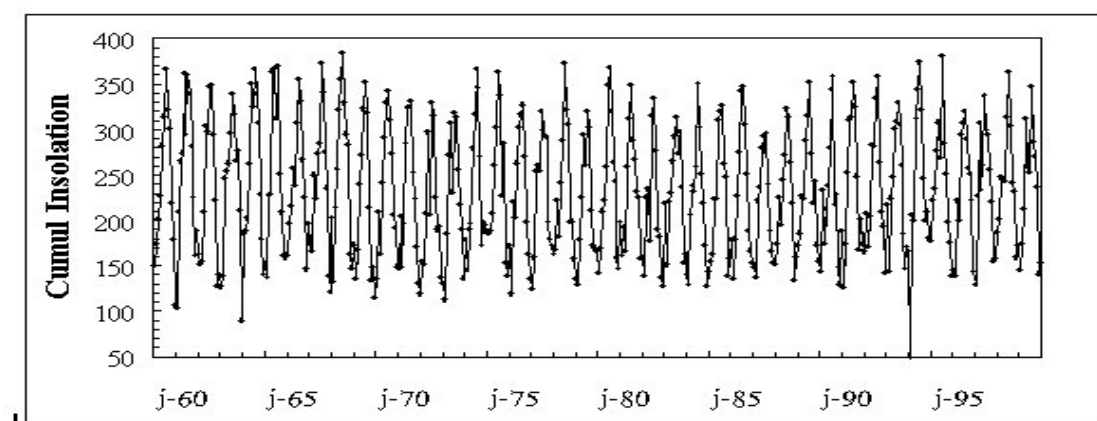


Fig. 2-2. Insolation mensuelle en dixième d'heures pour la période 1960 à 1999, Dar El Beida (Alger).

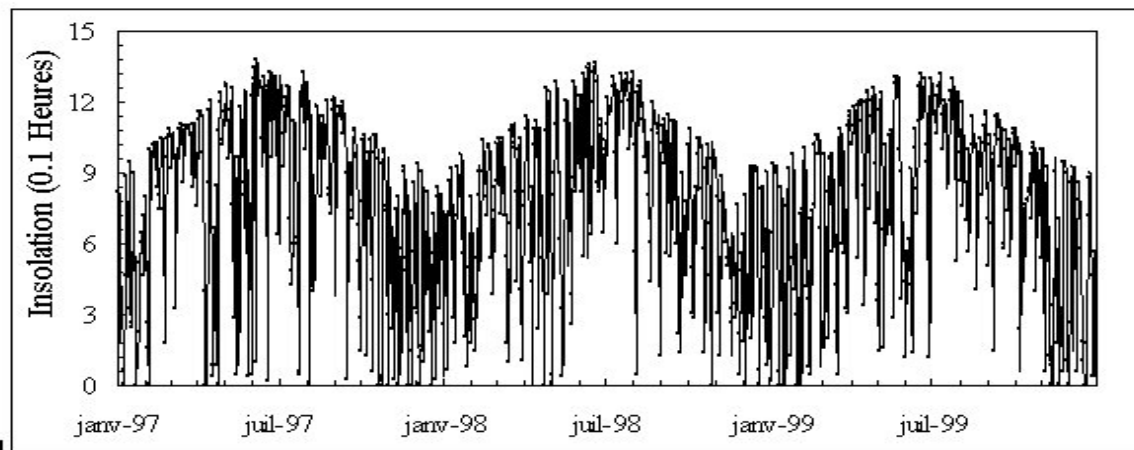


Fig. 2-3. Insolation quotidienne pour la période 1997/99 à Dar El Beida (Alger).

Ensuite, pour rendre stationnaire la variable aléatoire décrivant les changements de climats, nous devons éliminer les variations saisonnières et cycliques. Une façon de réduire l'effet de ces variations, est de diviser chacune des données brutes par sa valeur hors-atmosphère.

Pour l'insolation, on obtient une variable aléatoire qui est :

$$ss = \frac{SS}{SS_0} . \quad (2-1)$$

La valeur hors-atmosphère SS_0 , exprimée en heures, est [A.F.E.D.E.S N°4, 1974] :

$$SS_0 = \frac{24}{180} \arccos(-\operatorname{tg}L\operatorname{tg}\delta) \quad (2-2)$$

L est la latitude du lieu considéré et δ est la déclinaison.

En fonction du jour (j) de l'année, la déclinaison en degrés, s'écrit :

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360(j+284)}{365} \right] \quad (2-3)$$

A l'échelle de l'année, la variable aléatoire ss demeure non-stationnaire car il subsiste une faible variation saisonnière. Aussi, les données journalières d'insolation ont été traitées à l'échelle mensuelle. Cette dernière est une échelle de temps suffisamment courte pour rendre stationnaire la variable aléatoire ss . A cet effet, la base de données a été décomposée en douze sous-ensembles mensuels. Chacun de ces sous-ensembles regroupent les observations journalières obtenues pour les mois de même nom, pendant la période 1960/99.

Pour le flux global d'irradiation solaire mesuré quotidiennement, on procède de façon similaire. La normalisation des données est également effectuée en divisant les données brutes

par la valeur hors-atmosphère [Boileau et Guerrier, 1985]. Exprimée en Wh/m², cette dernière est :

$$G_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi 10^4} I_0 \cos L \cos \delta \left(\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s \right), \quad (2-4)$$

I_0 représente la composante solaire, exprimée en W/m². Elle s'écrit :

$$I_0 = 1367 (1 + 0,033 \cos 0,98j), \quad (2-5)$$

L'angle horaire ω_s , exprimé en degré est :

$$\omega_s = \arcsin(-\operatorname{tg} L \operatorname{tg} \delta). \quad (2-6)$$

Dans ce chapitre, nous utiliserons aussi une autre technique de normalisation des données. Celle-ci consiste à calculer une variable centrée et réduite (X), qui est de la forme :

$$X = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \quad (2-7)$$

Dans cette expression, x est la variable aléatoire associée aux données brutes, \bar{x} est la moyenne et σ , l'écart-type.

2.3 Distributions statistiques

2.3.1 Données expérimentales

En Algérie, l'insolation est mesurée quotidiennement dans cinquante quatre stations (voir Table 1-1). Dans la majorité de ces stations, les mesures ont été effectuées sur de longues périodes. Une analyse préliminaire a montré que des bases de données complètes et fiables, formées de mesures journalières collectées sur des périodes excédant onze années, ne sont disponibles que sur trente deux stations. Ce sont Alger, Chlef, Djelfa, M'Sila, Boussaada, Miliana, Bédjaia, Biskra, Tébessa, Sétif, Skikda, Annaba, Constantine, Batna, Souk Ahras, Saida, Maghnia, Tlemcen, Oran, El Kheiter, El Bayadh, Ain Séfra, Béni Saf, Béni Abbès, Adrar, In Amenas, Béchar, Djanet, Ghardaia, El Goléa, Tamanrasset et Touggourt.

Pour évaluer les propriétés statistiques de l'insolation les distributions mensuelles de fréquences relatives ont été construites en considérant les données expérimentales de chacun des douze sous-ensembles mensuels. La Fig. 2-4 montre, en trait discontinu, les douze distributions de fréquences des rapports SS/SS_0 obtenus à partir des mesures journalières de l'insolation collectées à Alger (Dar El Beida) pendant la période 1954/97. Ces distributions sont toutes dissymétriques et parfois, comprennent plusieurs maximums. Les mêmes

caractéristiques ont été observées pour les distributions de fréquences caractérisant les données solaires collectées dans les autres sites.

Toutes ces distributions peuvent être représentées par des formes mathématiques appropriées utilisant des fonctions de densité de probabilité (PDF). Associé aux approches stochastiques impliquant les processus autorégressifs, ce type de PDF peut être employé pour générer des séquences synthétiques de données d'irradiation solaire, au pas de l'heure et de la journée. Aussi, nous avons élaboré une méthode d'ajustement des distributions de fréquences par des distributions beta. Cette méthode sera présentée ci-après et appliquée aux données journalières d'insolation collectées dans les trente deux stations météorologiques citées précédemment. Le but de cette étude est d'estimer ensuite les distributions de probabilité de l'irradiation solaire pour n'importe quel site de l'Algérie.

2.3.2 Technique d'ajustement basée sur la distribution beta

Supposons que les données ss soient représentées par une variable aléatoire (x) qui varie uniformément de 0 à 1 et dont la densité de probabilité est une distribution beta $f(x)$. Celle-ci s'écrit [Schmetterer, 1974] :

$$f(x) = \frac{1}{\beta(p, q)} x^{p-1} (1-x)^{q-1} \quad (2-8)$$

où $p > 0$, $q > 0$ et $\beta(p, q)$ est une fonction beta donnée par:

$$\beta(p, q) = \int_0^1 x^{p-1} (1-x)^{q-1} dx = \frac{\Gamma(p)\Gamma(q)}{\Gamma(p+q)} \quad (2-9)$$

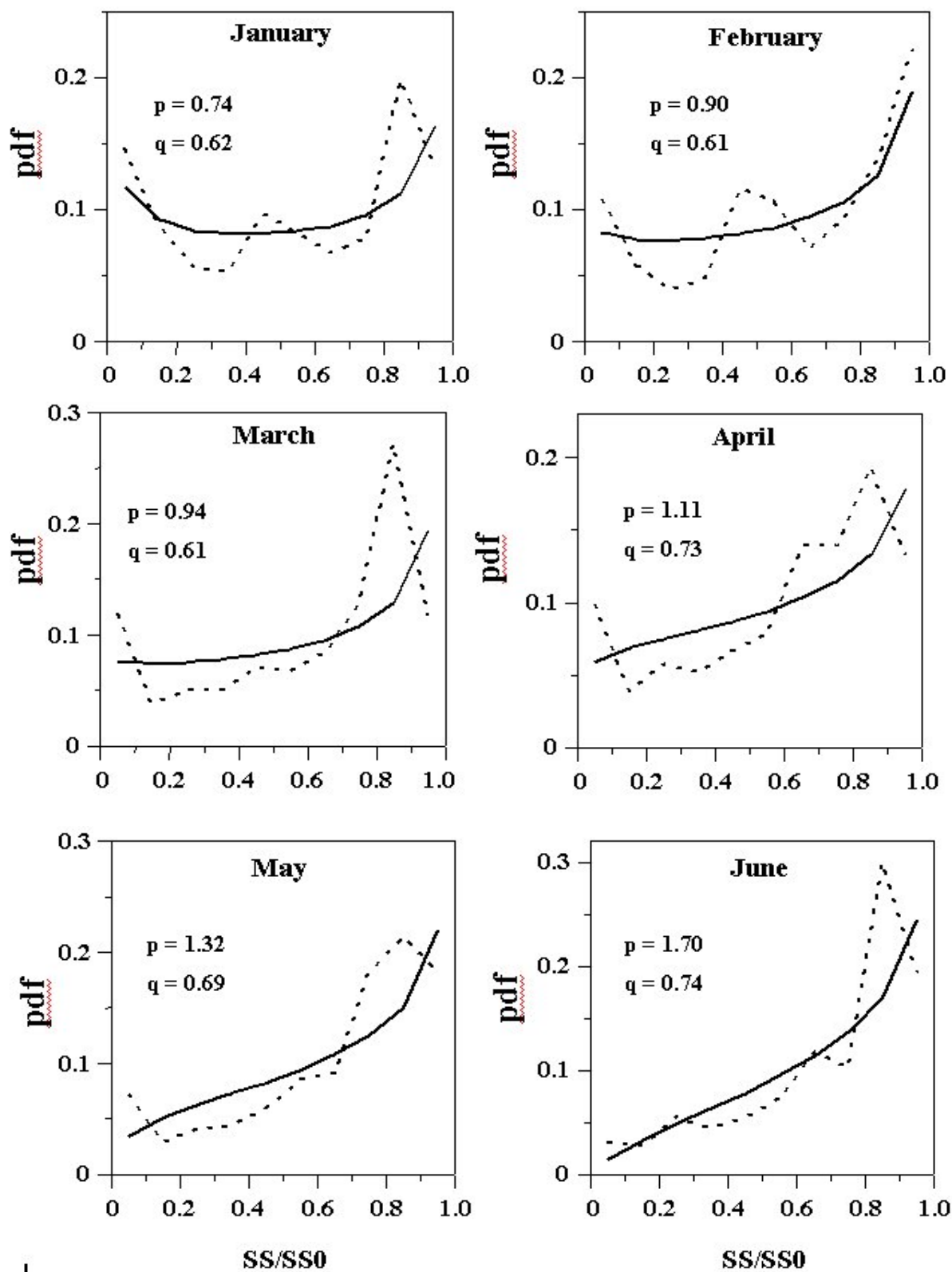


Fig. 2-4. Distributions de fréquences (trait discontinu) et distributions beta (trait continu) des données d'insolation pour Alger (Dar El Beida) et pour tous les mois de l'année (suite).

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

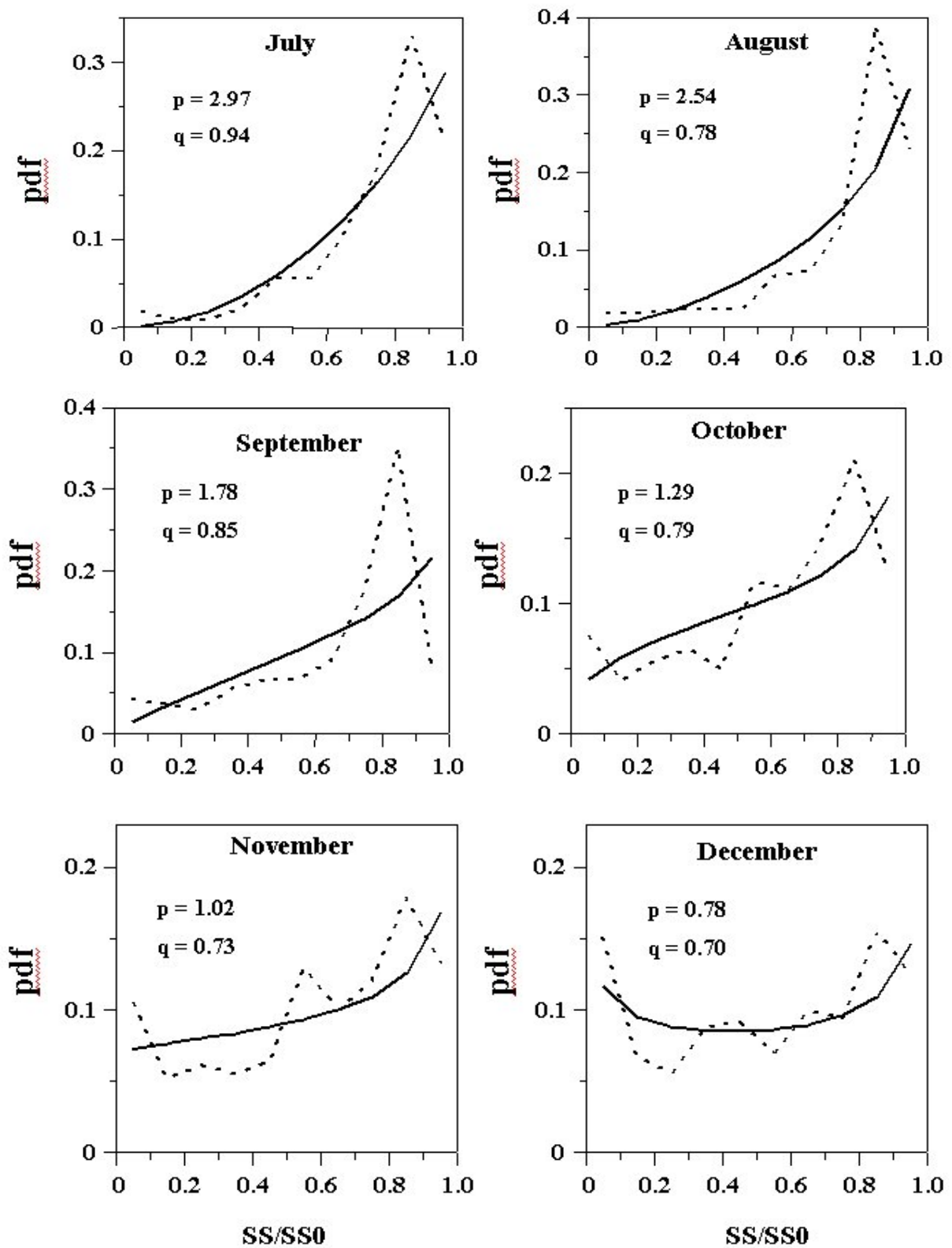


Fig. 2-4. Distributions de fréquences (trait discontinu) et distributions beta (trait continu) des données d'insolation pour Alger (Dar El Beida) et pour tous les mois de l'année.

Les fonctions gamma qui composent l'expression (2-9), sont de la forme :

$$\Gamma(u) = \int_0^{\infty} x^{u-1} e^{-x} dx \quad (2-10)$$

avec $u=p, q$ ou $p+q$.

La probabilité de réaliser une mesure solaire (X), est :

$$F(X) = P(x \leq X) = \int_0^X f(x) dx \quad (2-11)$$

La moyenne de la distribution de probabilité beta (2-8) vaut alors :

$$\bar{x} = \frac{p}{p+q} \quad (2-12)$$

et son écart-type est :

$$\sigma = \left\{ \frac{pq}{(p+q)^2 (p+q+1)} \right\}^{1/2} \quad (2-13)$$

Supposons que la moyenne et l'écart type de la distribution beta soient respectivement identiques à ceux caractérisant la distribution de fréquences relatives des données expérimentales. Pour un site donné, la moyenne (x_m) et l'écart type (σ_m) de la distribution de fréquences est d'abord calculée pour chaque mois de l'année. Pour un mois donné, les deux paramètres sont alors remplacés par leur valeur numérique, dans le système d'équations (2-12) et (2-13). L'étape suivante est la résolution des deux équations pour obtenir les valeurs numériques des paramètres p et q de la distribution beta. Le calcul donne :

$$p = A x_m, \quad (2-14)$$

$$q = A (1 - x_m), \quad (2-15)$$

$$A = \{x_m (1 - x_m) / \sigma_m^2\} - 1. \quad (2-16)$$

Dans la Fig. 2-4, les distributions beta obtenues avec les données journalières d'insolation d'Alger, sont tracées pour chacun des douze mois de l'année, en trait continu. Ces courbes montrent que les données expérimentales sont ajustées de façon satisfaisante par les distributions beta.

Pour vérifier la validité de la méthode utilisée, les résultats de la Fig. 2-4 ont été soumis au critère de Cramer-Von Mises (voir annexe B). Pour chacun des douze mois de l'année, l'application de ce test à 200 échantillons de ss, donne $n\omega_n^2 < 0,19$. D'après la table de Cramer-Von Mises, nous avons $n\omega_n^2 < 0,461$, pour un risque d'erreur de 0,05. Cette valeur

signifie que tous les échantillons se trouvent dans un intervalle de confiance de 0,95 et prouve que pour le site d'Alger, les distributions mensuelles de fréquences relatives de ss sont très bien décrites par des distributions beta convenablement choisies.

Pour évaluer l'efficacité de cette méthode d'ajustement, nous avons étendu le calcul aux mesures journalières de l'insolation enregistrées dans les autres sites de l'Algérie. Ceci nous a permis d'établir une cartographie de l'insolation journalière couvrant l'ensemble du territoire algérien. Cette cartographie sera présentée dans le prochain paragraphe.

2.3.3 Cartographie de l'insolation journalière en Algérie

Les distributions de probabilité beta caractérisant les données journalières d'insolation collectée dans les trente deux stations considérées dans l'étude et chaque mois de l'année ont été calculées selon l'approche décrite précédemment. Toutes ces distributions et les échantillons de données qui leur sont associés ont subi le test de Cramer-Von Mises. Le calcul des valeurs de $n\omega^2_n$ montre que ces dernières sont toujours inférieures à 0,27, puisque $n\omega^2_n < 0,461$ à 0,05 près. Par conséquent, toutes les distributions beta considérées dans cette étude, satisfont au test d'hypothèse de Cramer-Von Mises.

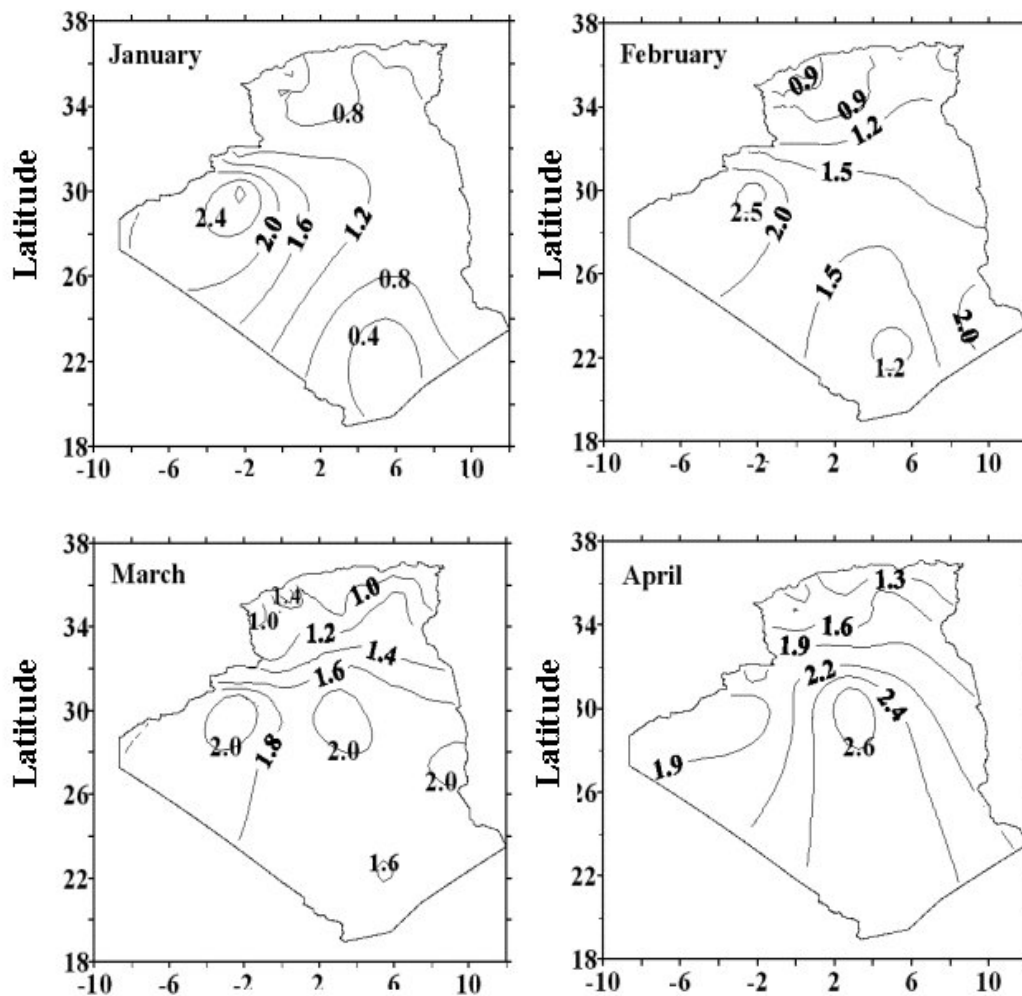
Les Fig. 2-5 et 2-6 représentent les cartes des paramètres beta obtenues pour chacun des douze mois de l'année en Algérie. Dans ces cartes, les iso-lignes des paramètres (p) et (q) ont été tracées en fonction de la latitude et de la longitude. Ces cartes diffèrent d'un mois à l'autre selon les variations saisonnières de l'insolation en Algérie. Grâce à ce type de cartographie, nous pouvons maintenant extraire des informations utiles sur la climatologie régionale de l'Algérie et estimer l'insolation pour les sites où il y a absence de mesures solaires.

2.4 Cartographie de l'irradiation solaire en Algérie

Différentes approches permettent d'évaluer le flux de l'irradiation solaire connaissant les mesures de l'insolation [Ångström, 1924; Black *et al.*, 1954; Decarli *et al.*, 1986 ; Sayigh, 1987; Coppolino, 1989; Chaudhary, 1990; Alsaad, 1990; Alnaser, 1993; De Miguel *et al.*; 1994; Youcef Ettoumi et Adane, 2000 ; Youcef Ettoumi *et al.*, 2001 b]. L'équation d'Ångström conduit à de bonnes estimations du flux global de l'irradiation solaire reçu sur plan horizontal. Ensuite, les valeurs ainsi estimées, peuvent être transformées en flux global d'irradiation solaire capté par des surfaces inclinées. Ces résultats sont alors exploitables pour dimensionner des systèmes photovoltaïques travaillant à poste fixe et des installations munies de capteurs plan [Hay, 1993].

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

En Algérie, seules six stations météorologiques effectuent régulièrement la mesure du rayonnement solaire. Il s'agit des stations d'Alger, de Batna, d'Oran, de Béchar, de Sétif et de Tamanrasset. Les composantes globale, directe et diffuse de l'irradiation solaire sont collectées quotidiennement dans ces stations. Les mesures horaires de ces grandeurs sont effectuées uniquement dans les stations d'Oran et de Tamanrasset.



Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

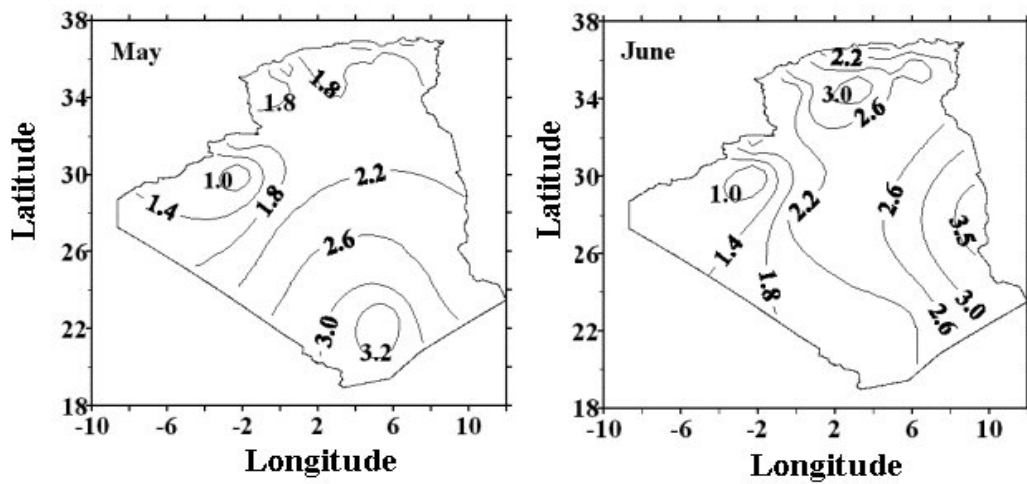
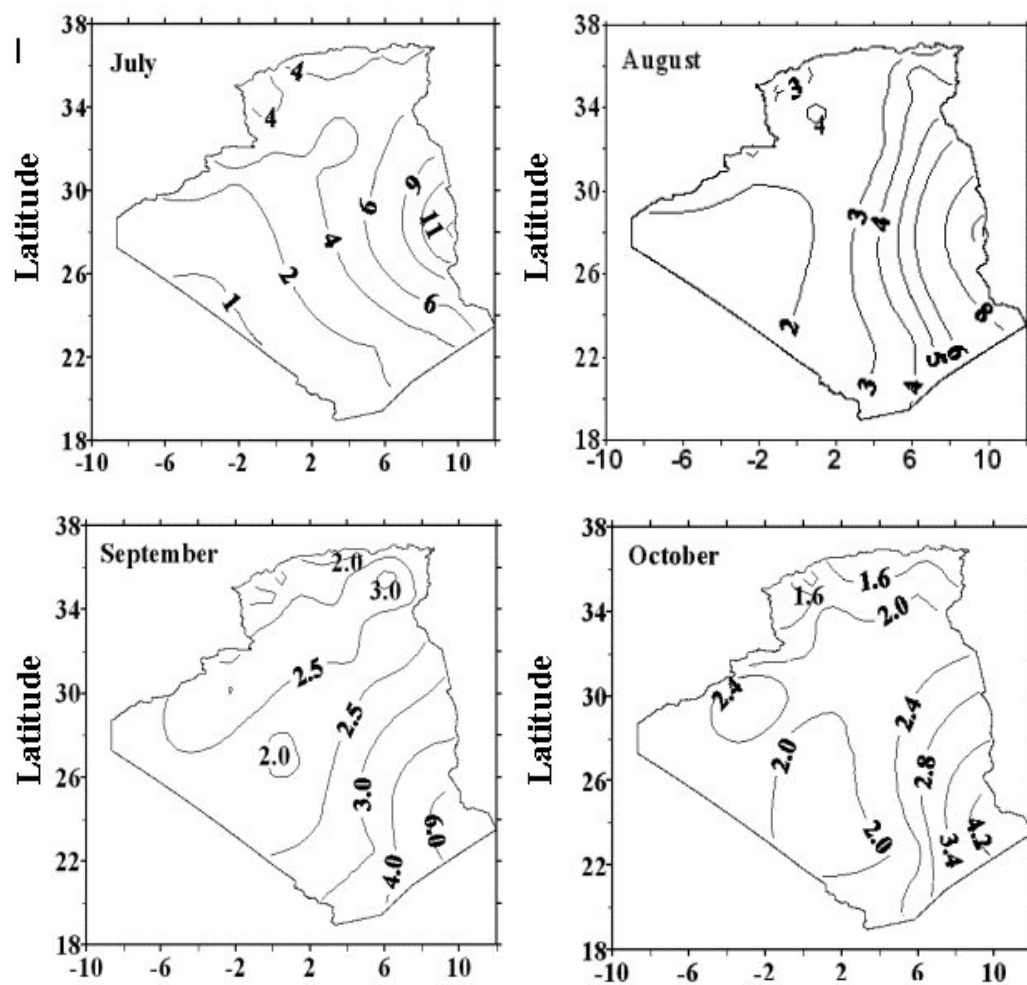


Fig. 2-5. Iso-coefficients (p) des distributions de probabilité beta représentant les données d'insolation en Algérie pour tous les mois de l'année (suite).



Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

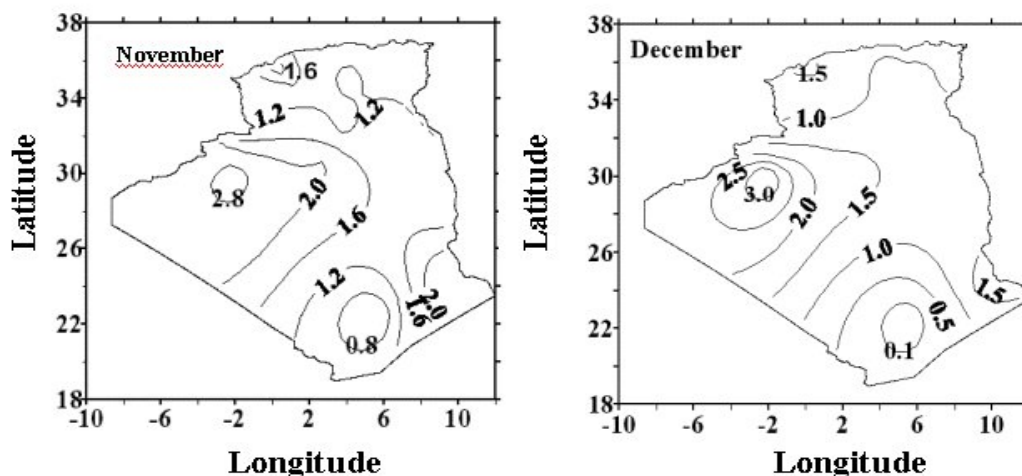
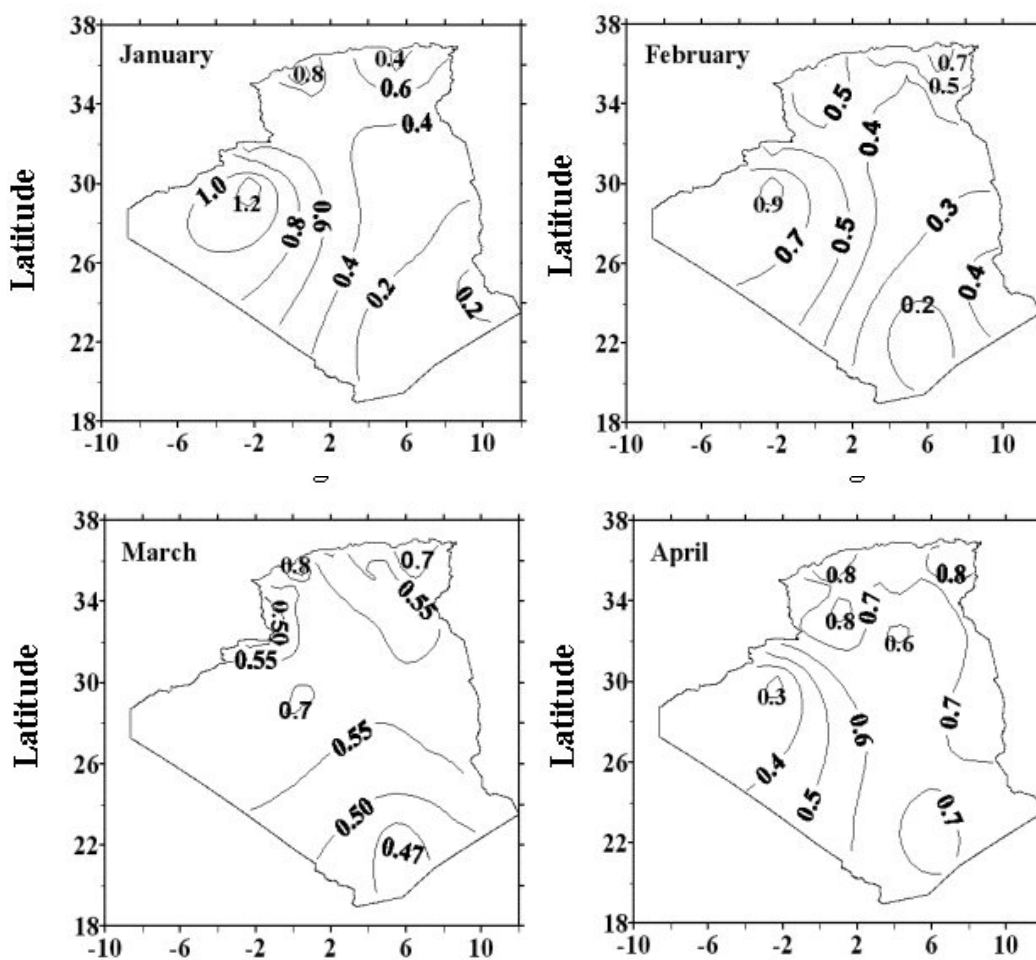


Fig. 2-5. Iso-coefficients (p) des distributions de probabilité beta représentant les données d'insolation en Algérie pour tous les mois de l'année.



Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

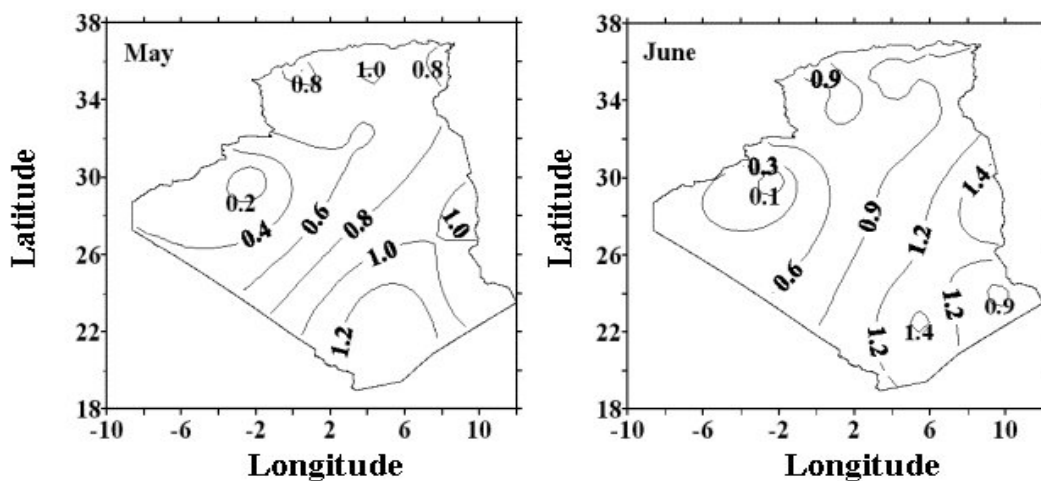
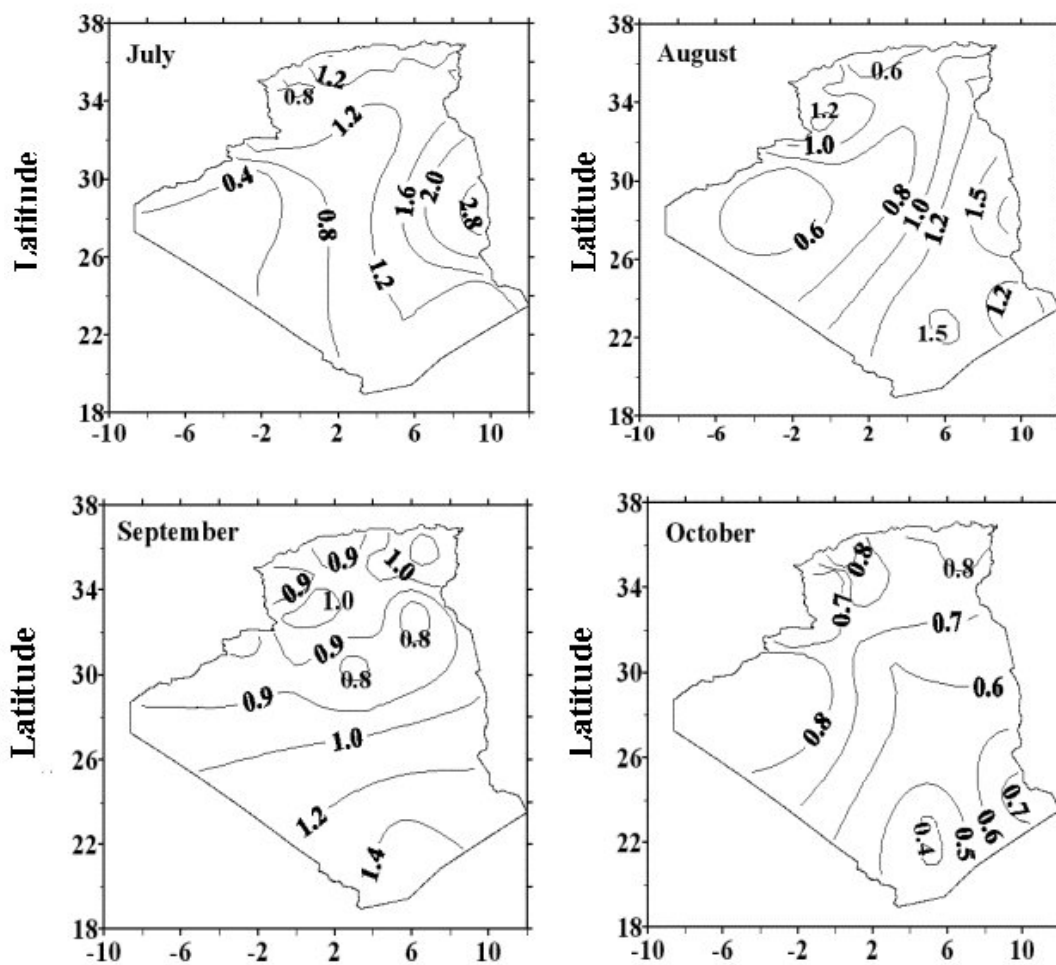


Fig. 2-6. Iso-coefficients (q) des distributions de probabilité beta représentant les données d'insolation en Algérie pour tous les mois de l'année (suite).



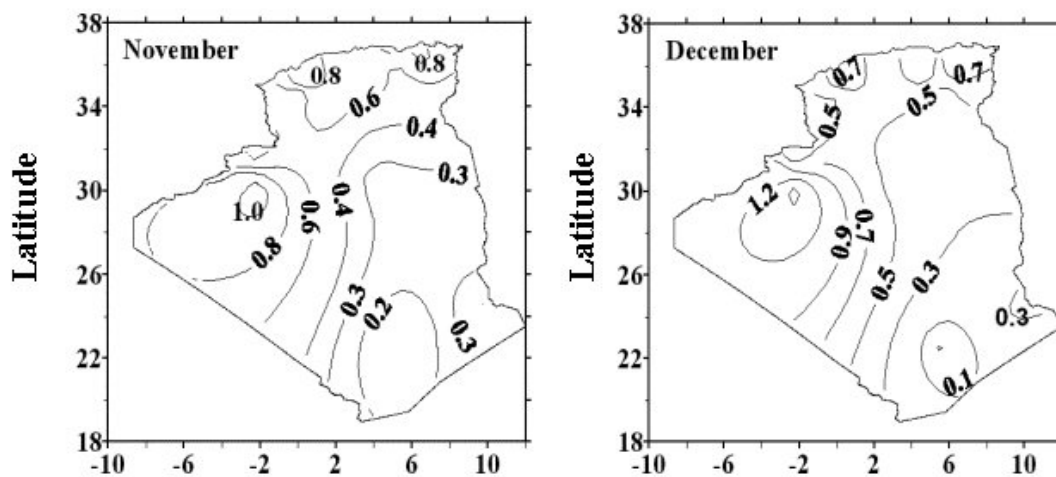


Fig. 2-6. Iso-coefficients (q) des distributions de probabilité beta représentant les données d'insolation en Algérie pour tous les mois de l'année.

En associant l'équation d'Ångström à la cartographie des paramètres beta caractérisant l'insolation, il est possible d'établir une cartographie du flux global d'irradiation solaire pour l'Algérie. Pour réaliser une telle simulation, nous nous sommes basés sur une régionalisation de l'Algérie et sur l'interpolation des paramètres de l'équation d'Ångström. Les données utilisées, représentent la durée d'ensoleillement et le flux global d'irradiation solaire, mesurés quotidiennement dans les stations météorologiques d'Alger, de Batna, d'Oran, de Béchar, de Sétif et de Tamanrasset. Les périodes d'enregistrement dans chacun de ces sites, sont respectivement 1972/82, 1985/95, 1985/92, 1978/81, 1991/94 et 1989/95.

2.4.1 Modélisation de l'irradiation par l'équation d'Ångström

L'équation d'Ångström permet de relier l'expression normalisée (G/G_0) du flux global d'irradiation solaire reçu sur le plan horizontal, à la fraction d'insolation $ss = SS/SS_0$. Cette équation s'écrit :

$$\frac{G}{G_0} = a + b ss + \varepsilon \quad (2-17)$$

où a et b sont les paramètres de régression linéaire, et ε est l'erreur d'ajustement.

Soit (y_i, x_i) , les valeurs numériques des variables aléatoires, représentant respectivement G/G_0 et ss . Dans notre étude, le modèle pris en compte est de la forme :

$$y_i = a + bx_i + e_i \quad (2-18)$$

L'ajustement est réalisé au sens des moindres carrés. Il consiste à calculer les coefficients (a) et (b). La qualité de l'ajustement est mesurée par la valeur de l'écart e_i , qui doit être proche de zéro. On doit donc minimiser l'expression suivante :

$$\sum_i e_i = \sum_i (y_i - a - bx_i)^2 = s(a, b) \quad (2-19)$$

Lorsque le coefficient de corrélation est proche de l'unité, nous pouvons dire que le modèle obtenu représente bien le processus. Ce modèle a été appliqué aux douze sous-ensembles mensuels, extraits des bases de données G et SS relatives à chacun des sites étudiés.

2.4.2 Résultats de la modélisation

Pour les six stations citées précédemment, les taux moyens d'ensoleillement $\langle ss \rangle$ sont compris entre 0,6 et 0,8. Ce sont des valeurs compatibles avec le climat qui prévaut en Algérie.

Pour le site d'Alger, la durée journalière de l'ensoleillement est comprise entre 0 et 13,9 heures, tandis que le flux global d'irradiation quotidien solaire parvenant au sol, situe entre 2370 et 3036 J/cm². En moyenne, on a 1587 J/cm² pour l'irradiation solaire et de 7,4 heures pour l'insolation. Leur variation est stable durant toute la période d'étude. Les coefficients de corrélation sont très élevés, à savoir 0,86 pour le mois d'août à 0,96 pour les mois d'Avril et de Novembre.

Pour le site de Béchar, le maximum du flux global d'irradiation solaire quotidienne est de 3567 J/cm² et son minimum vaut 428 J/cm², tandis que le maximum de l'insolation journalière est de 13,6 heures, et son minimum est de 0 heure. Ces données présentent une bonne stabilité autour de leurs moyennes respectives, soit 2381 J/cm² pour l'irradiation solaire et 9,57 heures pour l'insolation.

Pour apprécier la qualité de l'estimation à l'aide de l'équation d'Ångström, nous avons calculé le coefficient de corrélation (R) liant les valeurs expérimentales et les valeurs estimées, puis l'écart-type (SD) entre les deux séries de valeur. Les courbes de la Fig. 2-7 donnent les valeurs mensuelles de (R) et de (SD) obtenues pour Alger, Oran, Batna, Béchar et Tamanrasset.

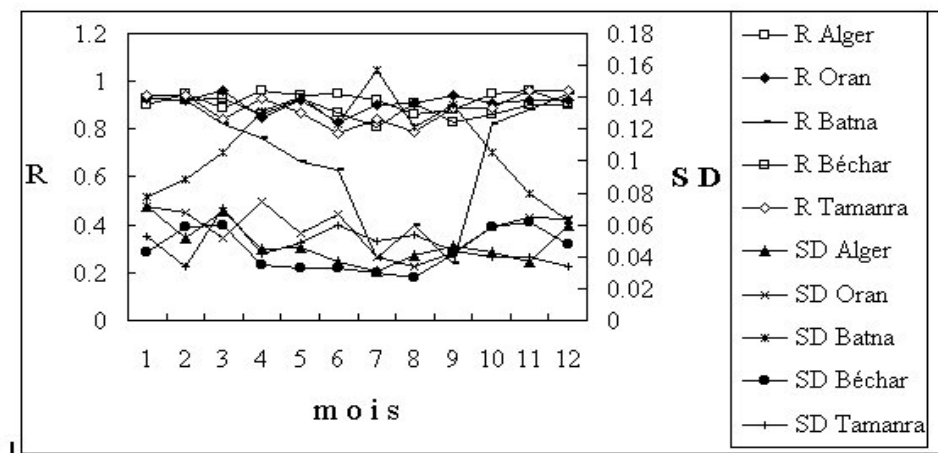


Fig.

2-7. Taux de corrélation (R) entre le flux global d'irradiation solaire et l'insolation journalière, erreur quadratique (SD), pour tous les mois de l'année et pour les sites d'Alger, d'Oran, de Batna, de Béchar et de Tamanra.

Nous constatons que les coefficients de corrélation ont des valeurs très élevées, ce qui dénote la forte liaison entre le flux global d'irradiation solaire et l'insolation. Les erreurs exprimées par l'écart-type, sont très proches de zéro, ce qui signifie que les modèles obtenus décrivent bien les données solaires pour les sites étudiés.

La reconstitution des données est effectuée au moyen des modèles mensuels que nous avons obtenus. En guise d'illustration, nous avons pris le cas de Béchar. La Fig. 2-8 en donne les principaux résultats et permet de comparer les moyennes mensuelles issues de l'observation à celles obtenues à partir de l'ajustement. Nous remarquons qu'il y a une grande concordance entre les valeurs du flux global d'irradiation solaire mesurées et celles reconstituées au moyen du modèle d'Ångström. L'écart type se situe entre 3% et 11%, ce qui valide les ajustements obtenus pour le site de Béchar.

La Fig. 2-9 illustre le cas d'Oran. Nous constatons que les valeurs moyennes mensuelles de l'irradiation solaire obtenues à partir des modèles d'Ångström se confondent avec celles issues de l'expérimentation. Le taux de corrélation varie entre 0,83 et 0,95.

Pour Batna, le taux de corrélation obtenu, est important pour les mois du premier semestre et du dernier trimestre. Cependant, pour les mois de Juillet, d'Août et de Septembre, les valeurs de R sont relativement faibles, à cause d'un défaut de fiabilité des données pendant cette période. Notons que Batna est une zone ensoleillée avec une insolation pouvant atteindre 13,8 heures et une irradiation solaire comprise entre 222 et 3477 J/cm².

Pour Tamanrasset, les taux de corrélation mensuels varient entre 0,78 et 0,96.

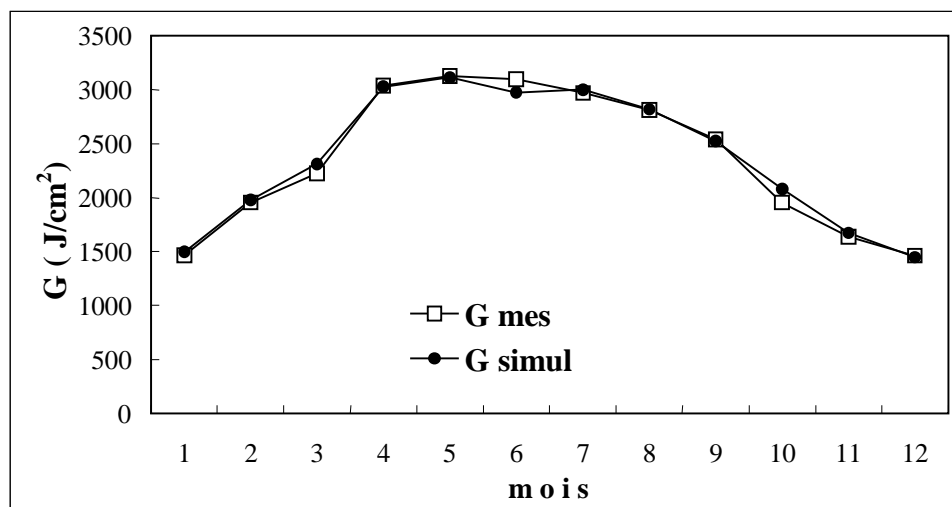


Fig. 2-8. Irradiation moyenne par jour mesurée (G_{mes}) et de celle générée (G_{simul}) à l'aide du modèle d'Ångström, pour le site de Béchar, pour chacun des mois de l'année.

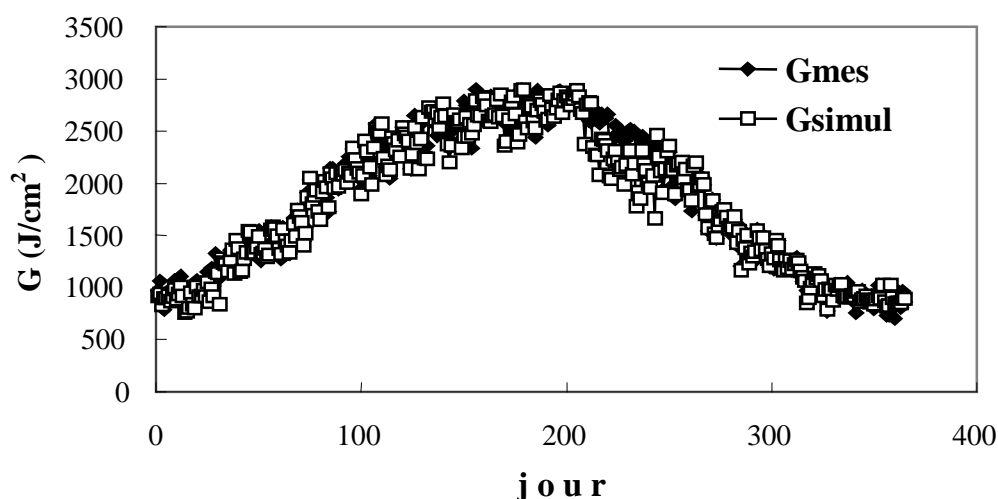


Fig. 2-9. Irradiation quotidienne mesurée (G_{mes}), et celle simulée à l'aide du modèle d'Ångström (G_{simul}), pour le site d'Oran durant l'année 1995.

Plus généralement, grâce au modèle d'Ångström et aux cartes des Fig. 2-5 et 2-6, il suffit de déterminer, pour chaque mois et pour chaque site, deux paramètres beta et deux paramètres de régression, pour générer les données journalières d'irradiation solaire.

2.4.3 Cartographie par régionalisation

Dans les paragraphes 1.4 et 1.5, nous avons mis en évidence une partition de l'Algérie en régions homogènes du point de vue radiatif. La notion de régions homogènes permet de faciliter la représentation des grandeurs solaires. Par définition, une région donnée sera

homogène si les propriétés de l'irradiation solaire sont presque identiques en chaque point de cette région. A travers les cartes des Fig. 2-5 et 2-6, nous pouvons voir que les iso-lignes de p et de q sont plus confinées dans le Nord que dans le Sud. Ces résultats sont en parfait accord avec ceux donnés par les Fig. 1-2 et 1-3, où les composantes de Fourier de l'insolation mensuelle ont été cartographiées pour l'Algérie. En particulier, on retrouve les trois principales zones typiques du climat algérien, c'est à dire le Nord, le Sud et le Centre du pays.

La région du Sud algérien se trouve dans la zone de convergence intertropicale où l'irradiation solaire est abondante et varie comme sa composante astronomique. Dans cette région, les paramètres p et q ont une répartition uniforme.

La concentration des iso-lignes dans le Nord algérien s'explique par l'hétérogénéité du relief constituant cette région et l'influence du climat méditerranéen qui est fréquemment la cause des variations de nébulosité.

La distribution spatiale des iso-lignes qui apparaît dans la zone intermédiaire de l'Algérie, est principalement due à l'effet thermique du désert du Sahara et à la présence avoisinante du climat intertropical.

Les cartes des paramètres beta, données par les Fig. 2-5 et 2-6, permettent d'obtenir les distributions mensuelles de probabilité de l'insolation journalière pour n'importe quel site de l'Algérie. Parmi les régions homogènes composant chacune des cartes, les sites où le flux d'irradiation solaire est régulièrement mesuré, ont été considérés. L'impact visé est de transformer les données d'insolation collectées dans ces régions, en données d'irradiation solaire au moyen de l'équation d'Ångström

Par exemple, les villes d'Alger, de Tizi Ouzou et de Bédjaia se trouvent dans la même zone homogène et le flux global d'irradiation solaire a été mesuré quotidiennement à Alger à l'aide d'un pyranomètre horizontal depuis 1972 à ce jour. Les distributions mensuelles de probabilité de l'insolation ont été reconstituées pour les trois sites considérés à l'aide des cartes des Fig. 2-5 et 2-6. En associant ces distributions aux paramètres de régression calculés pour Alger, nous avons construit les distributions mensuelles de probabilité caractérisant le flux global d'irradiation solaire reçu à Alger, Tizi Ouzou et Bédjaia respectivement.

Dans le cas d'Alger, les distributions de fréquences obtenues à partir des mesures d'irradiation solaire ont été comparées aux distributions de probabilité beta qui leur sont associées. On trouve que les deux types de distributions sont quasiment identiques.

Pour Bédjaia, l'hypothèse de la similarité de son climat avec celui d'Alger avait été déjà utilisée pour estimer le flux global d'irradiation solaire à partir des mesures journalières de l'insolation [Adane et Ramdani, 1996]. Par la suite, ces données ont été employées pour dimensionner un système photovoltaïque à usage domestique. Ce système qui a été conçu pour travailler à poste fixe, comporte une surface de captation de 3 m² et une capacité de stockage de 2,88 kWh. Le système a été expérimenté de façon satisfaisante à Bédjaia de 1995 à 1997 et a permis de valider l'hypothèse de zones homogènes. Les distributions mensuelles de fréquences des données journalières d'irradiation solaire de Bédjaia ont été comparées aux distributions beta qui leurs sont associées. On trouve que les deux types de distributions sont pratiquement les mêmes.

Dans la région de Tizi Ouzou, le flux global d'irradiation solaire a été mesuré quotidiennement avec un pyranomètre horizontal durant la période 1998/99. En dépit du nombre réduit de données, les distributions mensuelles de fréquences de l'irradiation solaire paraissent proches des distributions de probabilité beta qui leurs correspondent.

Pour valider le concept de zone homogène, nous avons considéré six sites où sont effectuées régulièrement des mesures de rayonnement solaire, mais se trouvant dans les mêmes zones homogènes. Ces sites sont Batna, Béchar, Béni-Abbès, Oran, Saida et Sétif. En effet, Saida, Béni-Abbès et Sétif appartiennent respectivement aux mêmes régions homogènes qu'Oran, Béchar et Batna. Les distributions mensuelles de fréquences de l'irradiation solaire ont, d'abord, été construites à partir des mesures journalières pour les sites de Saida, Béni-Abbès et Sétif. Ensuite, les distributions de probabilité beta de l'insolation qui leurs correspondent, ont été établies grâce aux cartes des Fig. 2-5 et 2-6. Puis, nous avons transformé les données d'insolation extraites de ces distributions, en flux global d'irradiation solaire, en se servant des coefficients d'Ångström caractérisant respectivement les sites d'Oran, de Béchar et de Batna.

Les Fig 2-10, 2-11 et 2-12 donnent les moyennes mensuelles des données journalières d'irradiation solaire extraites des distributions expérimentales de fréquences et des distributions beta pour Saida, Béni-Abbès et Sétif respectivement. D'après ces diagrammes, les distributions expérimentales et celles obtenues par le calcul, sont peu différentes. Un tel résultat prouve que les distributions mensuelles de fréquences du flux global d'irradiation solaire suivent la loi de probabilité beta. En outre, on trouve que le flux global d'irradiation

solaire mesuré au sol, est pratiquement identique pour tous les sites appartenant à une même région homogène.

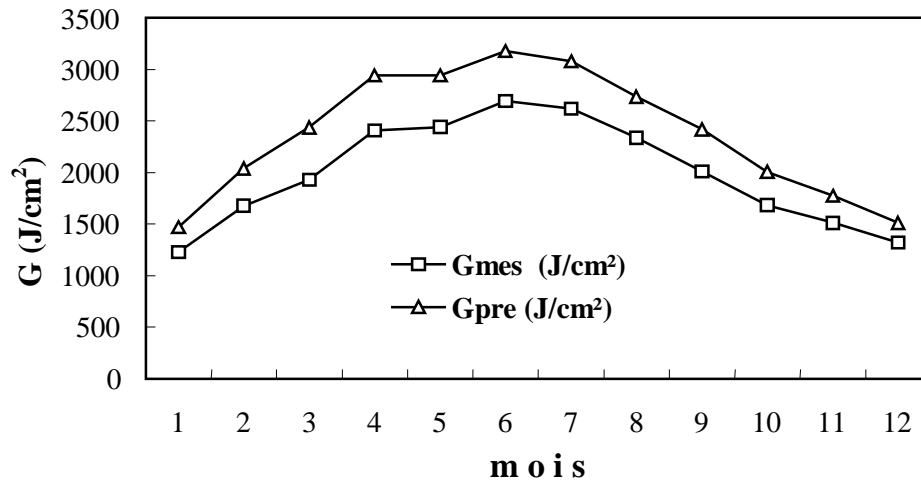


Fig. 2-10. Valeurs moyennes quotidiennes mesurées et estimées par la méthode de régionalisation du flux global d'irradiation solaire pour le site de Béni Abbès et pour 1979.

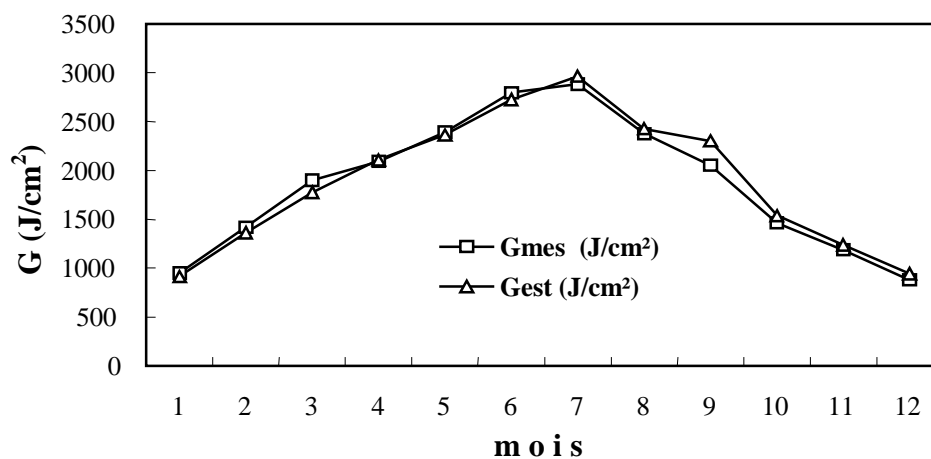


Fig. 2-11. Valeurs moyennes par jour mesurées et estimées par la méthode de régionalisation du flux global d'irradiation solaire pour le site de Saida et pour l'année 1978.

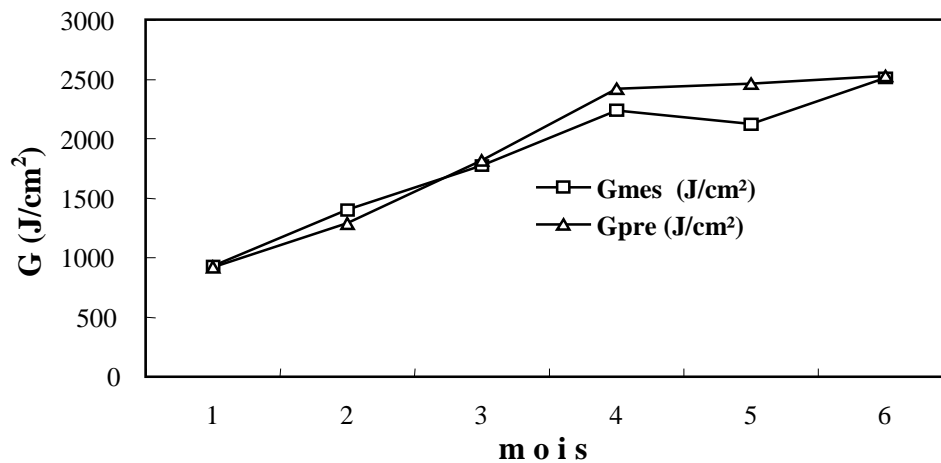


Fig. 2-12. Valeurs moyennes par jour mesurées et estimées par la méthode de régionalisation du flux global d'irradiation solaire pour le site de Sétif et pour l'année 1999.

2.4.4 Cartographie par interpolation

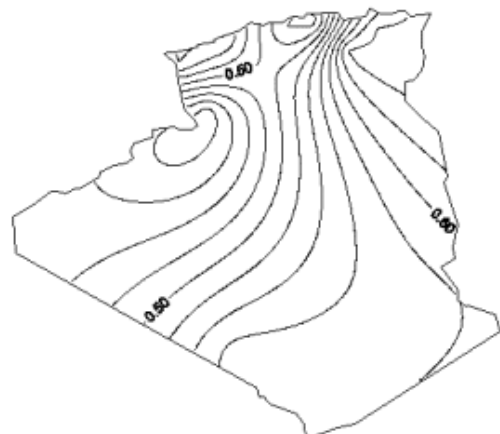
La cartographie par interpolation est une représentation des paramètres (a) et (b) de l'équation d'Angström par des fonctions linéaires. Cette technique appelée aussi kriging, consiste à lier un nombre de points dans un contour bien défini, en faisant apparaître les iso-valeurs des coefficients (a) et (b) [Decarli *et al*, 1986 ; Hutchinson, 1995].

Les cartes de la Fig. 2-13 ont été établies pour l'ensemble des mois de l'année dans le cas de l'Algérie, sachant que les mesures du flux global d'irradiation solaire n'ont été effectuées que dans sept stations, à savoir Alger, Oran, Béchar, Saïda, Sétif, Tamanrasset et Béni-Abbès.



Janvier

(a)



(b)

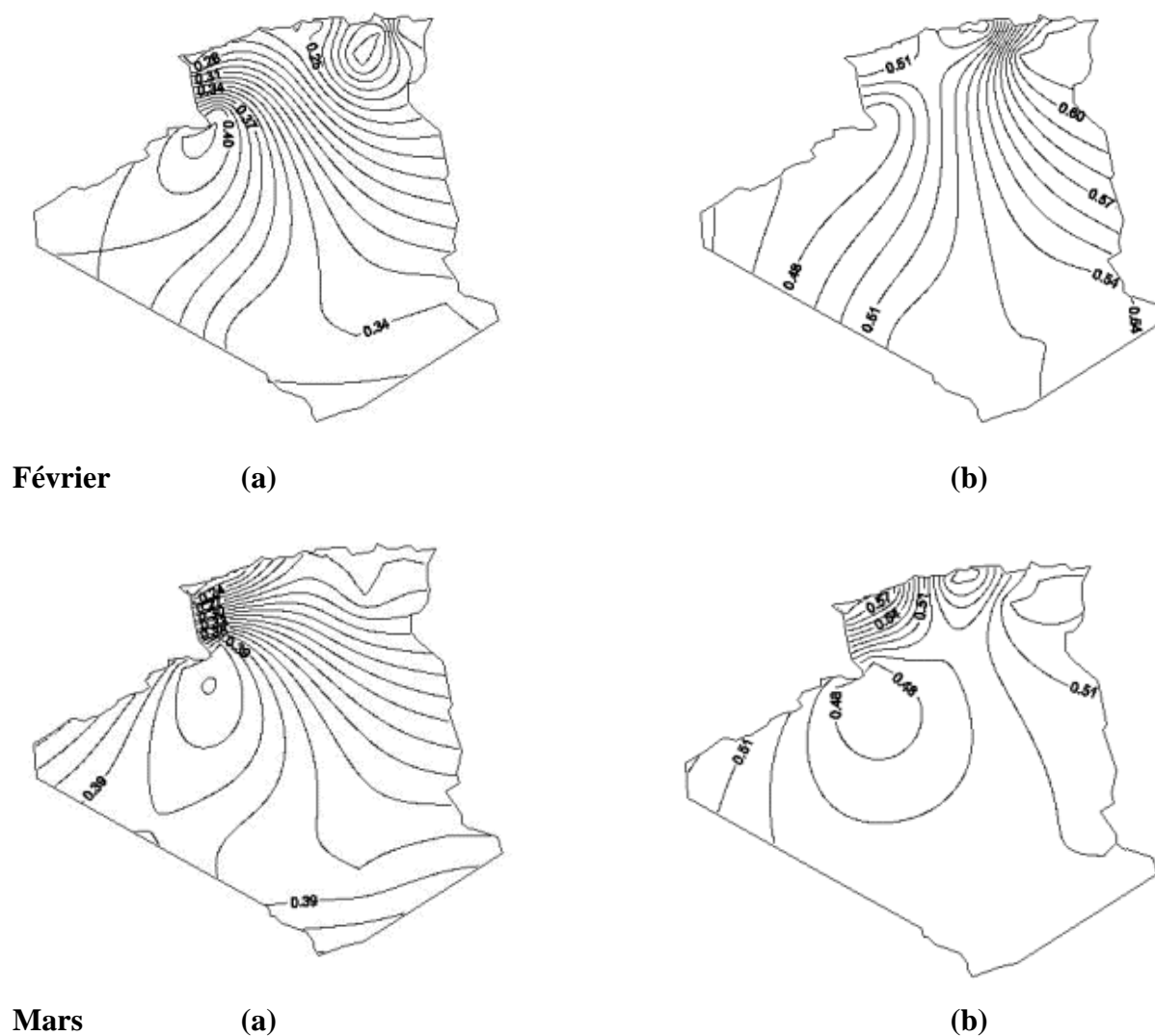
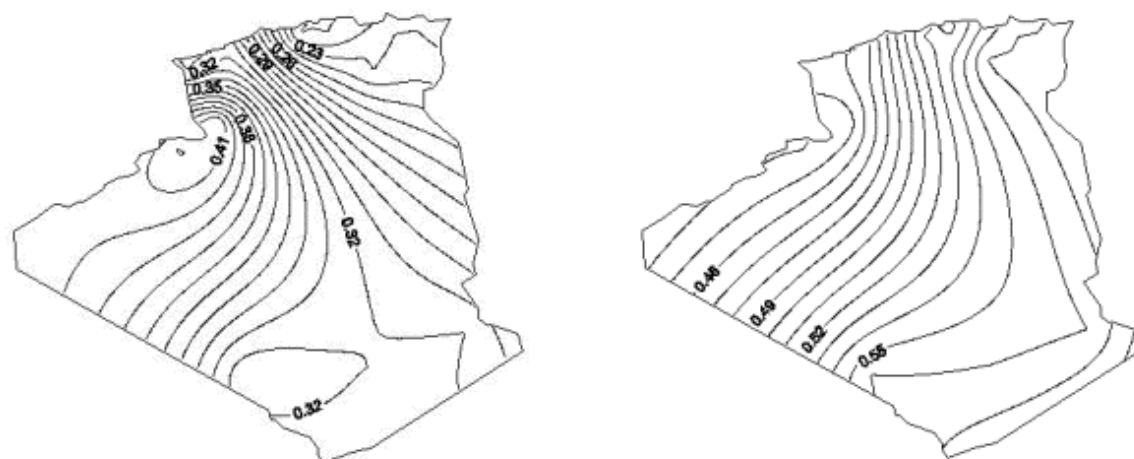
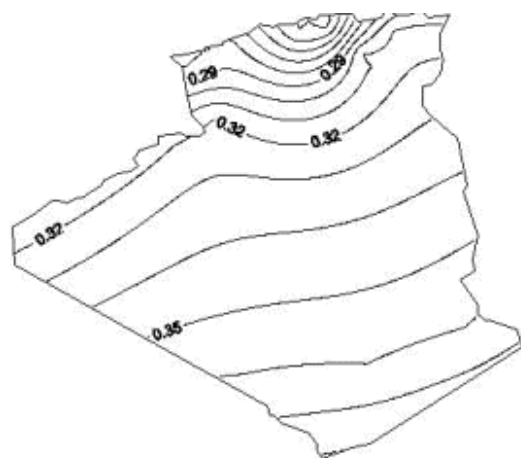


Fig. 2-13. Iso-coefficients de régression (a) et (b) pour les douze mois de l'année (suite).



Avril

(a)

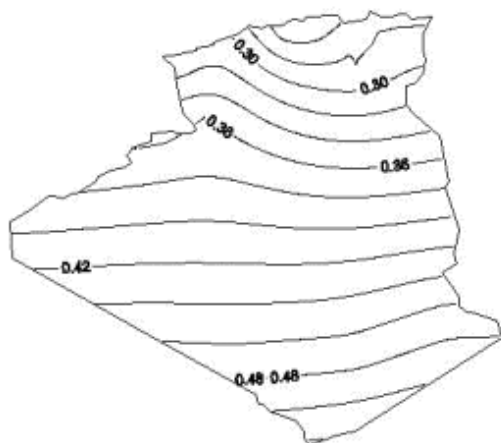


(b)

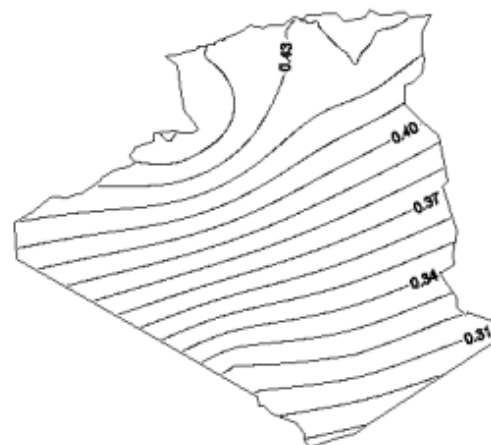


Mai

(a)

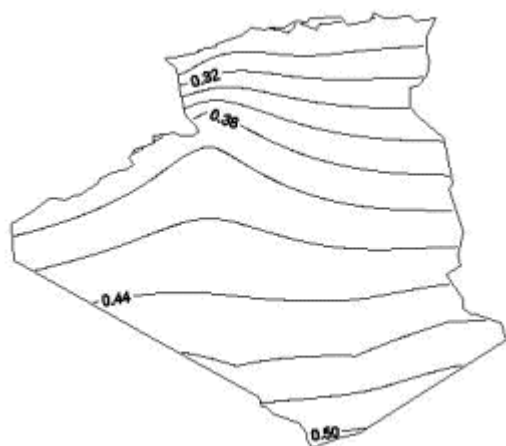


(b)



Juin

(a)



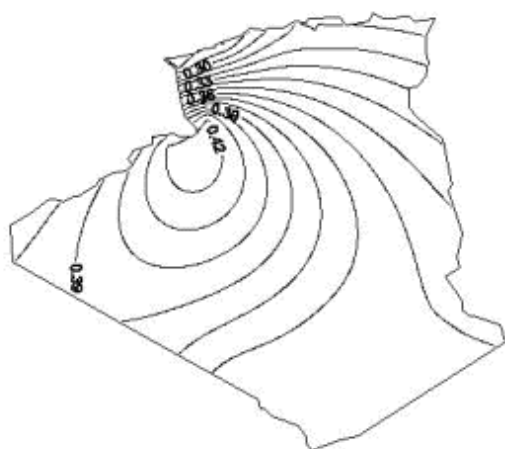
(b)



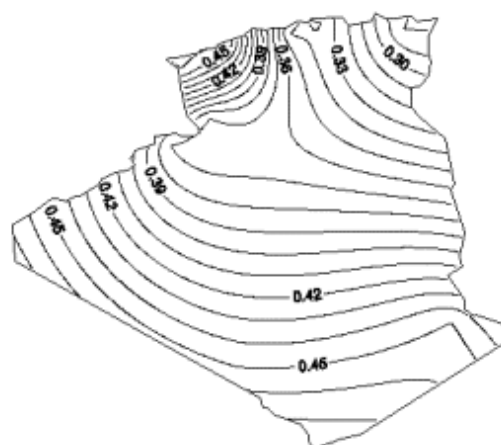
Fig. 2-13. Iso-coefficients de régression (a) et (b) pour les douze mois de l'année (suite).

Juillet

(a)

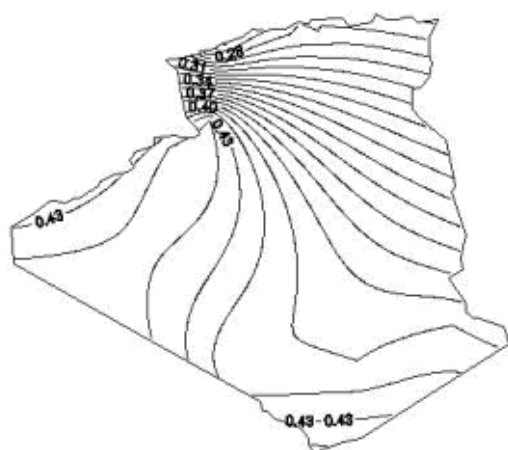


(b)



Août

(a)

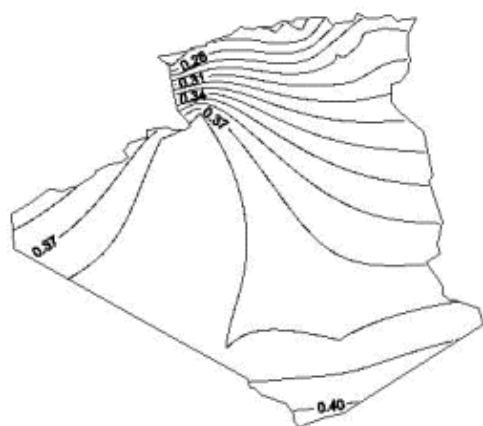


(b)



Septembre

(a)



(b)

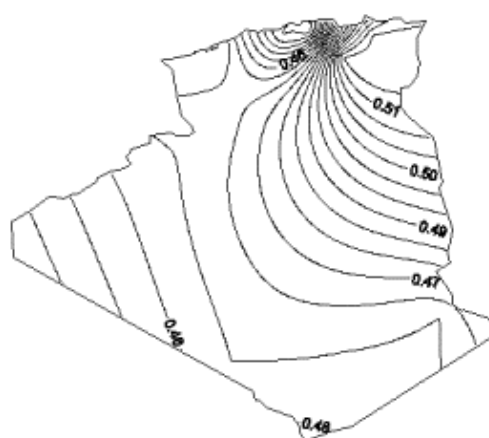


Fig. 2-13. Iso-coefficients de régression (a) et (b) pour les douze mois de l'année (suite).

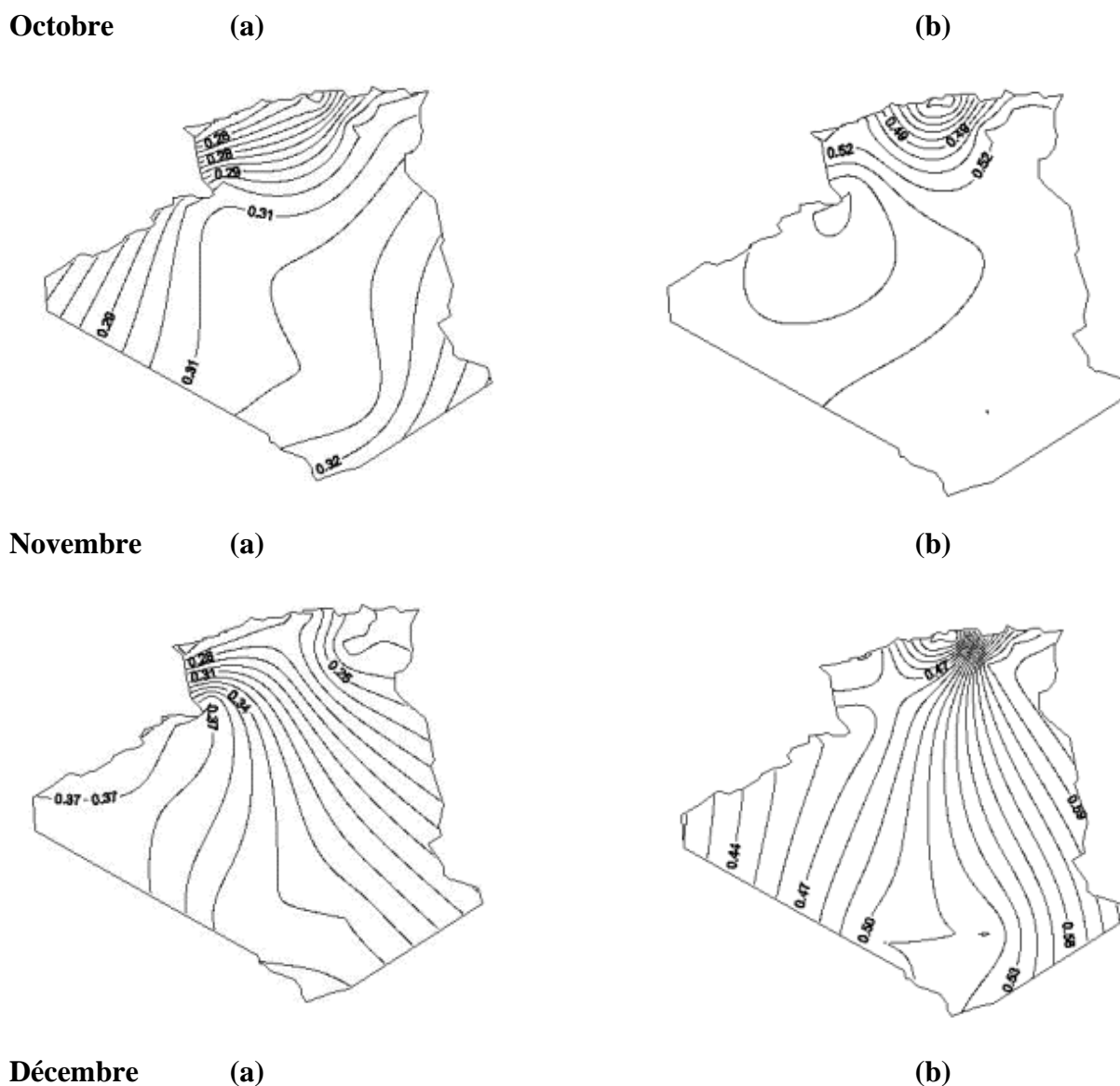


Fig. 2-13. Iso-coefficients de régression (a) et (b) pour les douze mois de l'année.

Comme ce type de cartographie est d'autant plus fiable que le nombre de points à utiliser est important, nous avons augmenté artificiellement le nombre de sites à considérer. Ces sites ont été choisis en fonction de leur proximité vis à vis des sept stations de base et de leur similarité climatique. A titre d'exemple, les coefficients a et b propres au site d'Alger ont été affectés aux sites de Tizi Ouzou, de Bouira et de Médéa. Les diagrammes de l'irradiation globale estimée par la méthode d'interpolation pour Saida, Béni-Abbès et Sétif, sont donnés respectivement par les Fig. 2-14, 2-15 et 2-16.

Nous avons comparé les résultats de la méthode d'interpolation à ceux de la méthode de régionalisation. Pour ce faire, nous avons défini les paramètres suivants :

$\sigma_m^{(Rég)} =$ valeur minimum de l'écart-type obtenue par régionalisation.

$\sigma_M^{(Rég)} =$ valeur maximum de l'écart-type obtenue par régionalisation.

$\sigma_m^{(Int)} =$ valeur minimum de l'écart-type obtenue par interpolation linéaire.

$\sigma_M^{(Int)} =$ valeur maximum de l'écart-type obtenue par interpolation linéaire.

$R^{(Rég)} =$ coefficient de corrélation obtenu par régionalisation.

$R^{(Int)} =$ coefficient de corrélation obtenu par interpolation linéaire.

Les résultats de la comparaison sont:

Saida:

$\sigma_m^{(Rég)} = 174,5 \text{ J/cm}^2$ et $\sigma_m^{(Int)} = 162,7 \text{ J/cm}^2$ pour le mois de Novembre.

$\sigma_M^{(Rég)} = 327,2 \text{ J/cm}^2$ et $\sigma_M^{(Int)} = 320 \text{ J/cm}^2$ pour le mois de Juin.

$R^{(Rég)} = 0,68$ et $R^{(Int)} = 0,65$ pour le mois de Novembre.

Béni Abbès:

$\sigma_m^{(Rég)} = 187,5 \text{ J/cm}^2$ et $\sigma_m^{(Int)} = 204,8 \text{ J/cm}^2$ pour le mois de Décembre.

$\sigma_M^{(Rég)} = 534,4 \text{ J/cm}^2$ et $\sigma_M^{(Int)} = 529 \text{ J/cm}^2$ pour le mois d'Avril.

$R^{(Rég)} = 0,98$ pour le mois d'Octobre et $R^{(Int)} = 0,96$ pour les mois de Janvier et Mai.

Sétif:

$\sigma_m^{(Rég)} = 89,9 \text{ J/cm}^2$ et $\sigma_m^{(Int)} = 82 \text{ J/cm}^2$ pour le mois de Janvier.

$\sigma_M^{(Rég)} = 345,6$ et $\sigma_M^{(Int)} = 292,2 \text{ J/cm}^2$ pour le mois de Mai.

$R^{(Rég)} = 0,88$ pour les mois de Janvier, Mai et Juin et $R^{(Int)} = 0,90$ en Juin.

On trouve que les résultats de la technique d'interpolation sont très proches de ceux de la méthode de régionalisation.

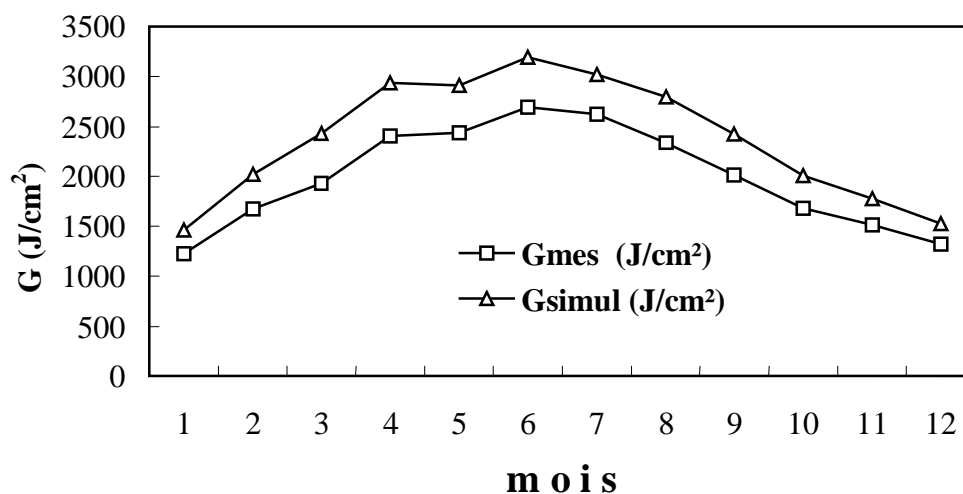


Fig. 2-14. Valeurs moyennes par jour mesurées de l'irradiation globale et estimées par la méthode d'interpolation, pour le site de Béni-Abbès et pour l'année 1979.

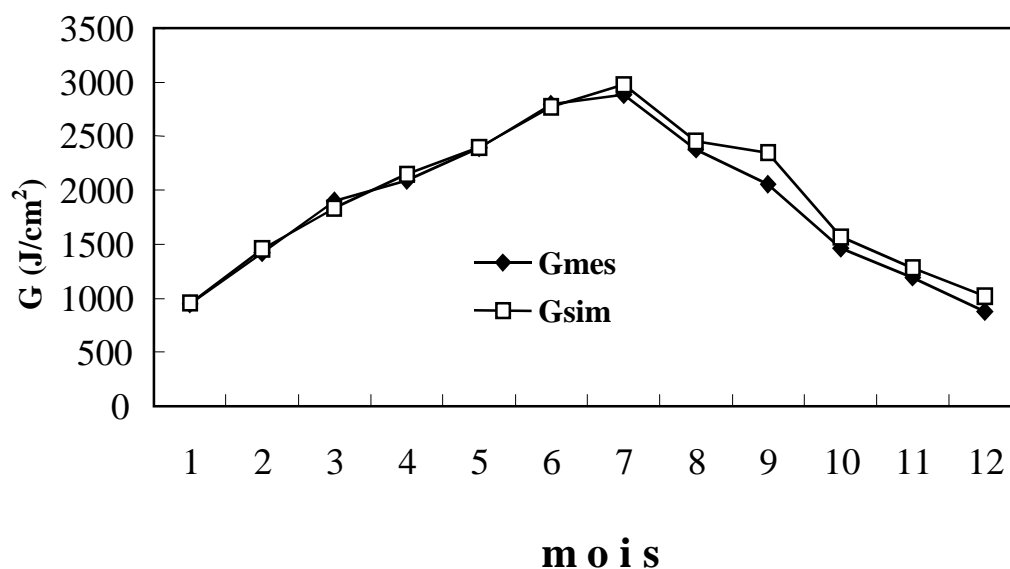


Fig. 2-15. Valeurs moyennes par jour mesurées de l'irradiation globale et estimées par la méthode d'interpolation, pour le site de Saida et pour l'année 1978.

2.5 Corrélation de l'insolation avec d'autres paramètres météorologiques

Rappelons qu'un climat d'une région est imposé par les conditions météorologiques dues essentiellement à l'environnement et à des phénomènes naturels tels que le flux global d'irradiation solaire, la vitesse du vent et les échanges thermiques. Ces conditions sont généralement exprimées en termes de variables météorologiques telles que l'insolation, le flux

d'irradiation solaire, la température de l'air, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, le degré d'humidité et la nébulosité. L'étude de la corrélation entre l'insolation et d'autres paramètres météorologiques est menée ici. Elle a pour but de développer des modèles linéaires de prévision et de simulation de l'insolation. Les modèles considérés dans cette étude, sont basés sur les processus autorégressifs [Astier et Duhamel, 1983; Callegari *et al*, 1992]. L'analyse de ces processus est conduite à heures séparées puis à heures confondues.

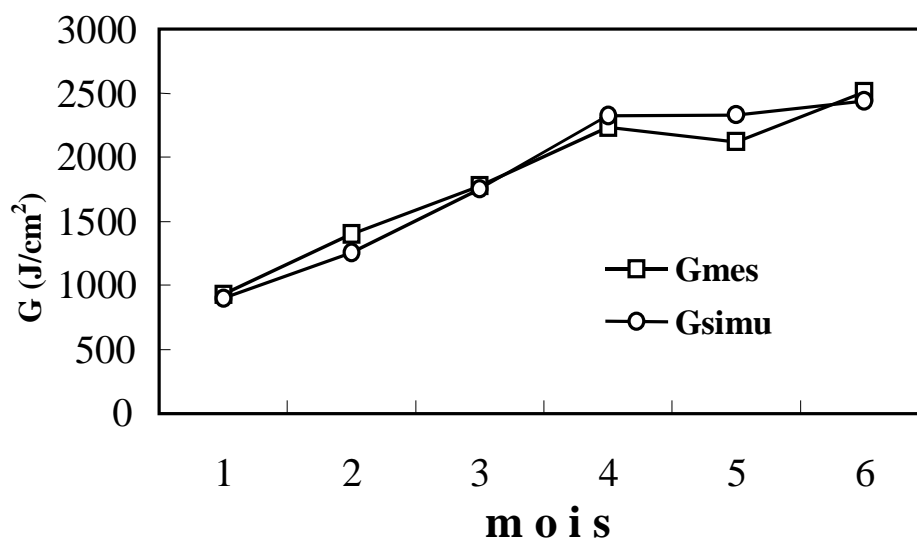


Fig. 2-16. Valeurs moyennes par jour mesurées de l'irradiation globale et estimées par la méthode d'interpolation, pour le site de Sétif et pour l'année 1978.

Les paramètres météorologiques pris en compte dans notre étude, sont la nébulosité, l'humidité, la température ambiante et la force du vent, enregistrées à Es Sénia (Oran) pendant la période 1984/87. Ces paramètres sont mesurés toutes les trois heures, sauf l'insolation qui est mesurée chaque heure.

L'identification de modèles autorégressifs ne peut être réalisée que si les séries temporelles issues des mesures des paramètres météorologiques, sont stationnaires [Boileau et Guerrier, 1985]. Pour satisfaire cette condition, nous avons transformé les séries de données étudiées, en variables centrées et réduites à l'aide de la relation (2-7). Les variations saisonnières de ces séries de données sont ainsi éliminées et il en résulte alors un processus stationnaire du second ordre. Le modèle obtenu est de type monovarié, c'est à dire un cas particulier des modèles multivariés [Morrison, 1976 ; Dagnelie, 1985 ; Monfort et Gourieroux, 1990]. En effet, la prédiction de l'insolation est effectuée à partir d'un prédicteur

pris à un instant antérieur. Ce prédicteur est choisi parmi l'un des paramètres météorologiques considérés, à savoir l'insolation (SS), la nébulosité (N), le taux d'humidité (H), la température ambiante (T) ou encore la force du vent (FV). Soit Y_{t+1} , la variable à prédire à l'instant $t+1$ qui, dans notre cas, est l'insolation SS_{t+1} et soit X_t , l'une des variables N_t , H_t , T_t et FV_t , prise à l'instant t et jouant le rôle de prédicteur. On obtient, au pas de l'heure, un modèle de régression linéaire simple dont l'équation est :

$$Y_{t+1} = a_t X_t + \varepsilon_{t+1} \quad (2-20)$$

a_t est le paramètre du modèle estimé par la méthode des moindres carrés et ε_{t+1} est la partie résiduelle, représentant les écarts entre les valeurs observées de la variable expliquée et celles obtenues à l'aide de l'équation de régression.

Les Tables 2-1, 2-2, 2-3 et 2-4 résument les principales caractéristiques des modèles dont l'entrée est respectivement l'insolation, la température ambiante, la force du vent et le taux d'humidité. Pour ces quatre modèles, le coefficient de corrélation entre le prédicteur et le prédicteur s'identifie au paramètre de régression, puisque toutes ces variables ont été centrées et réduites. La Table 2-5 représente les principales caractéristiques du modèle correspondant à la nébulosité prise comme prédicteur. Comme ce paramètre est sans dimensions, nous l'avons représenté par une variable centrée. On trouve que le paramètre de régression diffère du coefficient de corrélation ρ . D'où, ce paramètre a été pris en compte dans la Table 2-5. Remarquons que l'insolation possède une certaine mémoire car elle dépend fortement de ses valeurs mesurées à des instants antérieurs. La variance résiduelle est alors négligeable. La nébulosité à l'instant t est un paramètre qui influe notablement sur l'insolation obtenue à l'instant $t + 1$. Cette dernière s'avère donc un bon prédicteur de l'insolation, ce qui n'est pas le cas des autres paramètres. En effet, la variance résiduelle du modèle dont l'entrée est la température, est très élevée. Elle l'est davantage pour la force du vent et l'humidité.

2.6 Simulation de l'insolation horaire à partir de la nébulosité

Compte tenu des résultats obtenus dans le paragraphe 2.5, il apparaît clairement qu'il existe une forte corrélation entre l'insolation prise à un instant donné et celle prise l'instant antérieur. De même, l'insolation est très liée à la nébulosité. En effet, nous pouvons citer, à titre d'exemple, que le coefficient de corrélation est proche de 0,75, lorsqu'il est estimé à 9 h dans la localité d'Es Sénia pour les mois de Décembre et d'Avril. Des résultats similaires ont été obtenus pour chaque mois de l'année.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Heure	6h - 9h		9 h -12 h		12 h -15 h		15 h - 18 h		Heures confondues	
	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2
1	-	-	0.85	0.28	0.80	0.36	0.77	0.40	0.81	0.35
2	-	-	0.79	0.38	0.82	0.33	0.77	0.49	0.77	0.40
3	0.21	0.96	0.83	0.31	0.84	0.29	0.81	0.35	0.82	0.32
4	0.66	0.57	0.76	0.43	0.91	0.17	0.77	0.41	0.81	0.34
5	0.78	0.38	0.80	0.36	0.75	0.44	0.82	0.33	0.79	0.38
6	0.74	0.45	0.82	0.33	0.84	0.30	0.84	0.30	0.83	0.31
7	0.61	0.62	0.89	0.21	0.84	0.29	0.77	0.41	0.83	0.30
8	0.58	0.66	0.85	0.27	0.68	0.54	0.79	0.37	0.77	0.40
9	0.40	0.83	0.70	0.51	0.81	0.35	0.79	0.38	0.76	0.42
10	-	-	0.73	0.47	0.71	0.49	0.76	0.41	0.74	0.46
11	-	-	0.80	0.35	0.77	0.40	0.76	0.44	0.78	0.40
12	-	-	0.72	0.48	0.82	0.32	0.80	0.36	0.78	0.39

Table 2-1. Paramètres du modèle monovarié dont l'entrée est l'insolation.

Heure	6H-9H		9H-12H		12H-15H		15H-18H		Heures confondues	
	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2
1	-	-	-0.45	0.80	0.18	0.97	0.31		0.01	0.9997
2	-	0.98	-0.14	0.98	0.34	0.89	0.18	0.97	0.13	0.98
3	-	0.98	0.022	0.999	0.43	0.81	0.35	0.87	0.27	0.92
4	0.46	0.78	0.27	0.92	0.12	0.98	0.25	0.94	0.21	0.95
5	-	0.76	0.47	0.78	0.27	0.93	0.19	0.98	0.29	0.92
6	-	0.95	0.45	0.79	0.32	0.90	0.26	0.93	0.34	0.88
7	-	0.73	0.52	0.73	0.36	0.87	0.28	0.92	0.39	0.85
8	-	0.69	0.06	0.996	0.08	0.99	0.30	0.91	0.14	0.98
9	-	0.72	0.19	0.96	0.37	0.86	0.23	0.96	0.26	0.93
10	-	0.88	-0.08	0.99	0.19	0.96	0.11	0.99	0.0001	0.1
11	-	0.99	0.01	0.999	0.21	0.95	0.20	0.96	0.14	0.98
12	-	-	-0.10	0.99	0.23	0.95	0.23	0.95	0.12	0.99

Table 2-2. Paramètres du modèle monovarié dont l'entrée est la température ambiante.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Heure	6 h - 9 h		9 h - 12 h		12 h - 15 h		15 h - 18 h		Heures confondues	
	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2
1	-	-	-0.32	0.90	-0.24	0.94	-0.002		-0.19	0.96
2	-0.15	0.98	-0.24	0.94	-0.34	0.89	0.001	0.999	-0.19	0.96
3	-0.12	0.99	-0.32	0.89	-0.16	0.97	0.05	0.997	-0.14	0.98
4	-0.22	0.98	-0.08	0.99	0.14	0.98	0.048	0.998	0.03	0.999
5	-0.005	0.95	-0.14	0.98	0.015	0.999	0.15	0.98	0.008	0.999
6	0.006	0.999	0.03	0.99	0.11	0.99	0.21	0.95	0.13	0.98
7	-0.10	0.999	-0.03	0.999	0.27	0.92	0.28	0.92	0.17	0.97
8	0.14	0.989	0.04	0.99	0.25	0.93	-0.033	0.999	0.09	0.99
9	0.04	0.98	-0.09	0.99	0.014	0.999	0.08	0.99	0.0004	0.999
10	-0.19	0.998	-0.28	0.92	-0.16	0.97	0.04	0.998	-0.13	0.98
11	-	0.96	-0.21	0.95	-0.20	0.96	0.02	0.999	-0.13	0.98
12	-	-	-0.91	0.99	-0.10	0.99	-0.67	0.99	-0.09	0.99

Table 2-3. Paramètres du modèle monovarié dont l'entrée est la force du vent.

Heure	6 h - 9 h		9 h - 12 h		12 h - 15 h		15 h - 18 h		Heures confondues	
	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2	ρ	σ^2
1	-	-	0.01	0.999	-0.5	0.74	-0.34	0.95	-0.28	0.92
2	0.1	0.99	-0.15	0.98	-0.56	0.69	-0.39	0.85	-0.36	0.87
3	-0.22	0.95	-0.40	0.84	-0.57	0.68	-0.46	0.78	-0.48	0.77
4	-0.27	0.93	-0.37	0.86	-0.10	0.99	-0.48	0.77	-0.31	0.90
5	-0.33	0.89	-0.53	0.72	-0.19	0.96	-0.37	0.86	-0.36	0.87
6	-0.30	0.91	-0.52	0.72	-0.28	0.92	-0.32	0.89	-0.37	0.86
7	-0.39	0.84	-0.46	0.79	-0.27	0.86	-0.25	0.94	-0.36	0.87
8	-0.34	0.88	-0.14	0.98	-0.13	0.99	-0.29	0.91	-0.18	0.96
9	-0.15	0.98	-0.10	0.99	-0.20	0.96	-0.20	0.96	-0.17	0.97
10	-	0.998	-0.14	0.98	-0.33	0.89	-0.02	0.999	-0.16	0.98
11	0.26	0.93	-0.15	0.98	-0.28	0.92	-0.23	0.95	-0.22	0.95
12	-	-	-0.002	0.999	-0.26	0.93	-0.21	0.95	-0.16	0.97

Table 2-4. Paramètres du modèle monovarié dont l'entrée est le taux d'humidité.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

heure	6 h - 9 h			9 h -12 h			12 h - 15 h		
	ρ	a_t	σ^2	ρ	a_t	σ^2	ρ	a_t	σ^2
1	-	-	-	-0,70	-0,28	0,51	-0,67	-0,27	0,55
2	-0,21	-0,08	0,95	-0,67	-0,28	0,55	-0,62	-0,26	0,62
3	-0,58	-0,24	0,67	-0,73	-0,27	0,46	-0,61	-0,25	0,63
4	-0,65	-0,25	0,57	-0,54	-0,19	0,71	-0,25	-0,11	0,94
5	-0,76	-0,30	0,41	-0,68	-0,29	0,53	-0,50	-0,23	0,75
6	-0,67	-0,24	0,55	-0,67	-0,24	0,55	-0,51	-0,18	0,74
7	-0,79	-0,27	0,38	-0,74	-0,26	0,45	-0,57	-0,24	0,67
8	-0,78	-0,30	0,39	-0,66	-0,25	0,56	-0,64	-0,26	0,59
9	-0,71	-0,30	0,50	-0,67	-0,26	0,55	-0,69	-0,26	0,53
10	-0,59	-0,26	0,65	-0,61	-0,27	0,62	-0,55	-0,29	0,69
11	-0,41	-0,19	0,78	-0,70	-0,30	0,51	-0,62	-0,27	0,61
12	-	-	-	-0,58	-0,24	0,66	-0,64	-0,27	0,59

Table 2-5. Paramètres du modèle monovarié dont l'entrée est la nébulosité (suite).

Heure	15 H-18 H			Heures confondues 6 H, 9 H, 12 H, 15 H		
	ρ	a_t	σ^2	ρ	a_t	σ^2
1	-0,65	-0,29	0,57	-0,67	-0,28	0,55
2	-0,52	-0,24	0,73	-0,60	-0,26	0,63
3	-0,58	-0,26	0,66	-0,64	-0,26	0,58
4	-0,67	-0,28	0,55	-0,49	-0,19	0,76
5	-0,65	-0,29	0,58	-0,61	-0,27	0,62
6	-0,48	-0,18	0,77	-0,55	-0,20	0,69
7	-0,50	-0,23	0,75	-0,61	-0,25	0,63
8	-0,66	-0,28	0,56	-0,65	-0,26	0,57
9	-0,68	-0,27	0,54	-0,67	-0,26	0,54
10	-0,58	-0,29	0,66	-0,58	-0,28	0,66
11	-0,73	-0,33	0,46	-0,69	-0,30	0,53
12	-0,56	-0,24	0,68	-0,59	-0,25	0,65

Table 2-5. Paramètres du modèle monovarié dont l'entrée est la nébulosité.

Dans le but de développer des applications solaires, nous avons considéré une autre base de données. Celle-ci est formée de mesures horaires de l'insolation et tri-horaires de nébulosité collectées à la station d'Es Senia durant la période 1982/92. Puis, nous avons élaboré un modèle de simulation de l'insolation horaire à partir des données tri-horaires de nébulosité. Ce modèle consiste, tout d'abord, à représenter la nébulosité par des chaînes de Markov du premier ordre à trois états. Ensuite, les distributions des séquences de tels états ont été construites et un bruit blanc a été généré au moyen de l'algorithme de Box et Muller. Finalement, les séquences de l'insolation ont été simulées par un processus autorégressif du premier ordre dont les paramètres ont été déduits du modèle markovien de la nébulosité. Ces modèles seront décrits ci-après.

2.6.1 Modélisation de la nébulosité par des chaînes de Markov du premier ordre

Rappelons que la nébulosité est le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale dans une localité considérée. Les valeurs possibles de la nébulosité sont des nombres entiers 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 et 8. Pour chaque mois de l'année, la moyenne conditionnelle $\bar{x}(SS(t+1)/n(t))$, l'écart-type conditionnel $\sigma(SS(t+1)/n(t))$ et le coefficient de corrélation conditionnel $R(SS(t+1)/n(t))$, sont estimés.

A partir des distributions de \bar{x} , σ et R , trois états significatifs ont été définis. Ce sont :

l'état '1', ou 'état de nébulosité faible', si $0 \leq n < 3$,

l'état '2', ou 'état de nébulosité moyen', si $3 \leq n < 6$,

l'état '3', ou 'état de nébulosité fort', si $6 \leq n < 8$.

Considérons une variable aléatoire (X_t) qui prend l'une des valeurs 1, 2 et 3 à l'instant $3t$ correspondant aux états '1', '2' et '3' respectivement. La probabilité d'avoir une transition d'un état de nébulosité à un autre, est $P_{ij} = P(X_{t+1} = j / X_t = i)$, avec i et $j = 1, 2$ ou 3 . Toutes les valeurs possibles de P_{ij} ont été estimées par maximum de vraisemblance.

Pour le jour (j) d'un mois de même nom (m) de la période 1982/92, des matrices de transition M_1, M_2, M_3, M_4 et M_5 sont obtenues respectivement pour les intervalles 6 h/9 h, 9 h/12 h, 12 h/15 h, 15 h/18 h et 18 h/6 h. Pour l'un de ces cinq intervalles, la moyenne des éléments de matrice a été calculée à l'échelle du mois considéré. On obtient cinq matrices de transition de la forme $M = \langle M_k \rangle$ avec $k = 1, 2, 3, 4$ et 5 . Pour le mois (m), ces cinq matrices décrivent, en moyenne, les variations de la nébulosité au cours de la journée. Nous avons

alors constaté que les séquences d'états de nébulosité observées durant k heures, sont distribuées suivant une loi de probabilité géométrique.

Les probabilités de Markov obtenues à long terme, ont été calculées à partir des probabilités de transition P_{ij} . La Fig. 2-17 représente les diagrammes des probabilités à long terme $P(X_t = 1)$, $P(X_t = 2)$ et $P(X_t = 3)$ sur une base annuelle. Cette figure donne aussi les probabilités à priori $P(1)$, $P(2)$ et $P(3)$, correspondant aux états '1', '2' et '3'. Pour chacun de ces états, on trouve que les probabilités markovienne à long terme sont pratiquement égales aux probabilités à priori. Ces résultats montrent que la nébulosité est un processus de Markov du premier ordre à trois états.

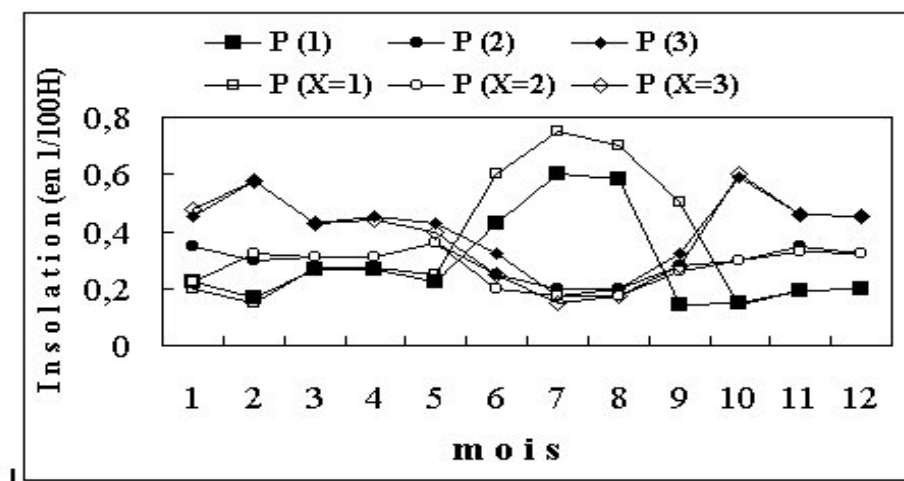


Fig. 2-17. Probabilités à long terme et à priori relatives à la modélisation de la nébulosité par des chaînes de Markov du premier ordre à trois états.

2.6.2 Modélisation de l'insolation par un processus autorégressif du premier ordre

A l'échelle de la journée, les variations horaires de l'insolation peuvent être décrites par un modèle autorégressif du premier ordre qui s'écrit :

$$\frac{[SS(t+1) - \bar{x}(t+1)]}{\sigma(t+1)} = \frac{R(t+1) \cdot [SS(t) - \bar{x}(t)]}{\sigma(t)} \quad (2-21)$$

La moyenne \bar{x} , l'écart-type σ et le coefficient de corrélation R dépendent des transitions entre les états de nébulosité. Dans un premier temps, pour chacun des douze mois de l'année, les paramètres sont estimés chaque trois heures ($3t$), à l'aide du modèle markovien du premier ordre à trois états de nébulosité. Puis, les séquences d'états de nébulosité sont générés chaque trois heures, pour chaque mois de l'année, en utilisant les paramètres de la loi géométrique pour des temps discrets.

L'état initial de nébulosité étant connu, un nombre aléatoire est généré, les éléments de matrice $\langle M_k \rangle$ sont comparés à ce nombre et l'état suivant est déterminé. Le nombre aléatoire varie entre 0 et 1 et ses valeurs possibles sont uniformément distribuées. Autrement dit, la durée de vie de l'état obtenu est simulée par la production d'un autre nombre aléatoire dont la distribution suit une loi géométrique. Les états successifs sont générés en répétant cette procédure. Un bruit blanc $e(t+1)$ est généré en utilisant l'algorithme de Box et Muller.

L'insolation est décrite par un processus autoregressif de la forme :

$$SS(t+1) = a(t) SS(t) + e(t+1) \quad (2-22)$$

Le coefficient $a(t)$ est évalué à l'aide de la relation (2-22).

L'entrée de ce processus étant le bruit $e(t+1)$, les données synthétiques d'insolation sont alors simulées chaque heure. Après application du test de χ^2 , on trouve que les valeurs de l'insolation simulée coïncident avec les données expérimentales (voir Fig. 2-18 et 2-19).

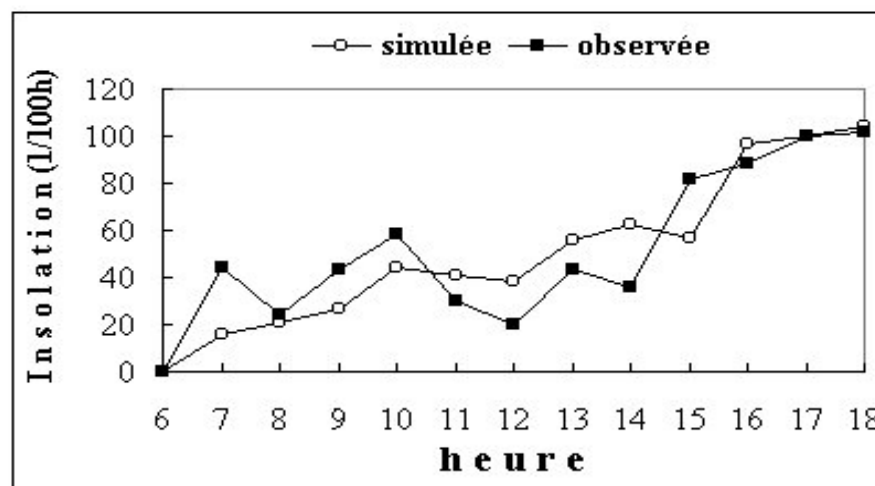


Fig. 2-18. Insolation horaire simulée et mesurée pour le premier Avril 1992.

2.6.3 Résultats

Comme nous venons de le montrer, le modèle ainsi établi est un processus autorégressif du premier ordre à paramètres ajustables [Youcef Ettoumi et Adane, 1994 a]. Ce modèle génère des séquences synthétiques de données d'insolation avec une bonne approximation. En effet, les résultats de la simulation sont en bon accord avec ceux obtenus par l'expérimentation. Le modèle autorégressif ainsi établi, tient compte de la non stationnarité de la variable aléatoire à l'échelle de la journée. Cette propriété a été obtenue en utilisant les paramètres du modèle markovien de nébulosité pour adapter les paramètres du processus AR(1) décrivant l'insolation horaire.

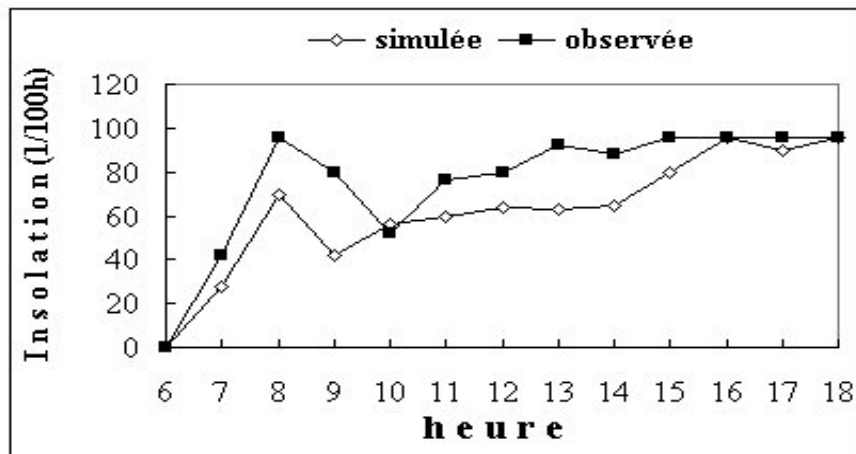


Fig. 2-19. Insolation horaire simulée et mesurée pour le deux Avril 1992.

Remarquons que le processus AR(1) ne fait intervenir que les moments du premier ordre et du second ordre. Compte tenu de la validité de nos résultats, on peut se demander si l'introduction des moments d'ordre supérieur améliore ce type de modélisation.. Une telle approche peut être développée en évaluant les cumulants.

2.7 Modèle basé sur les cumulants

2.7.1 Formulation

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.3, les distributions de fréquences de l'insolation sont dissymétriques et comportent parfois plusieurs maximums (voir Fig. 2-3 et 2-4). L'allure de ces distributions implique que les moments d'ordre supérieur à deux doivent apporter une contribution non négligeable à la génération du processus stochastique décrivant les variations de l'insolation.

L'effet des moments d'ordre supérieur a été initialement pris en considération dans des modèles décrivant des signaux non stationnaires et non gaussiens, tels que le signal de parole [Rao, 1970; Hall *et al*, 1983; Barlaud *et al*, 1987]. Ce type de modèle a ensuite été appliqué à l'étude de la non stationnarité du flux global d'irradiation solaire [Youcef Ettoumi et Adane, 1994 b]. Cette étude a mis en évidence l'importance du caractère évolutif du degré de liaison de l'irradiation solaire d'un jour à l'autre de l'année. Les résultats obtenus permettent de prédire et de simuler flux global d'irradiation solaire sur deux jours consécutifs.

Une autre façon d'aborder la question de la non stationnarité de l'irradiation solaire est de considérer différentes classes de la variable étudiée. Cependant, la complexité introduite par

cette approche, fait qu'il n'y a pas eu d'améliorations significatives dans la description de la dépendance entre deux observations successives.

Récemment, de nouvelles techniques faisant appel aux moments d'ordre supérieur, ont été développées, soit par estimation des cumulants dans le domaine temporel, soit par analyse des polyspectres dans le domaine fréquentiel [Mendel, 1991]. Aussi, nous avons appliqué la méthode des cumulants à l'analyse des variations aléatoires de l'insolation au cours du temps. Cette analyse est menée, ci-après, sur les données horaires enregistrées à Es-Sénia (Oran) de 1982 à 1992.

La série de données brutes d'insolation est formée de mesures $x(n, j, t)$ effectuées à l'heure (t) du jour (j) du mois (m) de l'année (n) de la période d'études (avec $9 \text{ h} \leq t \leq 17 \text{ h}$, $1 \leq j \leq m$, $m = 28, 30$ ou 31 selon le mois de l'année, $1 \leq n \leq N$ et $N=11$ années).

Après pré-traitement, la variable aléatoire normalisée est:

$$X(n, j, t) = \frac{x(n, j, t) - \bar{x}(t)}{\sigma(t)} \quad (2-23)$$

Les valeurs horaires de la moyenne $\bar{x}(t)$ des séries mensuelles de données d'insolation, sont :

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{N m} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^m x(n, j, t), \quad (2-24)$$

et celles de l'écart-type $\sigma(t)$ s'écrivent :

$$\sigma(t) = \frac{1}{N m} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^m [x(n, j, t) - \bar{x}(t)]^{1/2}, \quad (2-25)$$

Considérons les variables aléatoires centrées suivantes : x_1, x_2, x_3 et x_4 . En général, les cumulants d'ordre 2, 3 et 4 sont respectivement définis comme étant.

$$\text{cum}(x_1, x_2) = E(x_1 x_2), \quad (2-26)$$

$$\text{cum}(x_1, x_2, x_3) = E(x_1 x_2 x_3), \quad (2-27)$$

$$\text{cum}(x_1, x_2, x_3, x_4) = E(x_1 x_2 x_3 x_4) - E(x_1 x_2)E(x_3 x_4) - E(x_1 x_3)E(x_2 x_4) - E(x_1 x_4)E(x_2 x_3) \quad (2-28)$$

Ces relations ont été adaptées de façon à mettre en évidence la non stationnarité des séries de données horaires d'insolation. A cet effet, nous avons estimé les cumulants en tenant compte de leur caractère évolutif à l'échelle de la journée. Les relations (2-26), (2-27) et (2-28) écrites en fonction du temps, deviennent :

$$C_{2,X}(t; \tau_1) = \text{cum}(X(n, j, t), X(n, j, t + \tau_1)) = E\{X(n, j, t)X(n, j, t + \tau_1)\} \quad (2-29)$$

$$C_{3,X}(t; \tau_1, \tau_2) = \text{cum}(X(n, j, t), X(n, j, t + \tau_1), X(n, j, t + \tau_2)) \\ = E\{X(n, j, t)X(n, j, t + \tau_1)X(n, j, t + \tau_2)\} \quad (2-30)$$

$$C_{4,X}(t; \tau_1, \tau_2, \tau_3) = \text{cum}(X(n, j, t), X(n, j, t + \tau_1), X(n, j, t + \tau_2), X(n, j, t + \tau_3)) \\ = E\{X(n, j, t)X(n, j, t + \tau_1)X(n, j, t + \tau_2)X(n, j, t + \tau_3)\} \\ - C_{2,X}(\tau_1, t)C_{2,X}(\tau_2 - \tau_3, t) \\ - C_{2,X}(\tau_2, t)C_{2,X}(\tau_3 - \tau_1, t) \\ - C_{2,X}(\tau_3, t)C_{2,X}(\tau_1 - \tau_2, t) \quad (2-31)$$

τ_i est le laps de temps qui sépare le processus pris à l'heure t et le processus pris à une, deux, trois heures plus tard (avec $i = 1 ; 2 ; 3$).

Ces cumulants peuvent s'écrire sous la forme d'une relation plus générale qui est :

$$C_{k,X}(t; \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{k-1}) = \\ = \text{cum}(X(n, j, t), X(n, j, t + \tau_1), \dots, X(n, j, t + \tau_{k-1})) \quad (2-32)$$

L'indice k représente l'ordre des moments considérés (avec $k = 2 ; 3 ; \dots$).

L'estimation des cumulants du second ordre et du troisième ordre, se fait en calculant respectivement les moyennes suivantes:

$$C_{2,X}(t; \tau_1) = \frac{1}{N m} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^m X(x, j, t)X(x, j, t + \tau_1) \quad (2-33)$$

$$C_{3,X}(t; \tau_1, \tau_2) = \frac{1}{N m} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^m X(x, j, t)X(x, j, t + \tau_1)X(x, j, t + \tau_2) \quad (2-34)$$

Le cumulants $C_{4,X}(t; \tau_1, \tau_2, \tau_3)$ est fonction des cumulants d'ordre 2 et du moment d'ordre

4. Ce dernier peut être estimé à l'aide de la relation suivante :

$$E\{X(n, j, t)X(n, j, t + \tau_1)X(n, j, t + \tau_2)X(n, j, t + \tau_3)\} \\ = \frac{1}{N m} \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^m X(n, j, t)X(n, j, t + \tau_1)X(n, j, t + \tau_2)X(n, j, t + \tau_3). \quad (2-35)$$

Les retards τ_i ($i=1, 2$ et 3) représentent aussi dans notre cas, le pas d'échantillonnage (en heures), avec $\tau_1 \geq \tau_2$ et $\tau_1 \geq \tau_3$.

2.7.2 Résultats

L'application des cumulants à l'insolation a montré que ceux-ci diminuent au fur et à mesure que les retards τ_i augmentent [Youcef Ettoumi et Adane, 1996 a].

Les diagrammes des Fig. 2-20 et 2-21 représentent respectivement les variations des cumulants d'ordres 2 et 4 au cours de la journée pour différents retards τ . Ces diagrammes montrent que le degré de liaison entre les observations horaires séparées d'une, de deux ou de trois heures, diminue au fur et à mesure que le temps écoulé entre deux observations augmente.

A titre indicatif, la Fig. 2-22 indique les variations horaires des cumulants d'ordre 2, 3 et 4 pour le mois de Juillet, tandis que la Fig. 2-23 donne les variations horaires des cumulants d'ordre 3 et 4 pour le mois de Mars. On constate que l'influence du cumulant d'ordre 4 est plus sensible, mais que celle des cumulants d'ordre 2 et 3 n'est pas négligeable.

En réalité, pour tous les mois de l'année, nous remarquons l'importance des cumulants d'ordre 4 par rapport à ceux d'ordre 3, sauf pour les mois pour lesquels on passe d'une saison à l'autre. De plus, les cumulants d'ordre 2 ne varient pas beaucoup au cours de la journée et sont proches de 80% pour le retard $\tau_1 = 1$ h. Notons que les cumulants d'ordre 3 et 4 sont faibles en période d'hiver, d'automne et de printemps. En général, ils sont inférieurs à 1,5. Par contre, ils sont nettement plus importants en été car ils sont supérieurs à 1,5.

Ces résultats montrent qu'on a bien affaire à un processus à distribution dissymétrique et que celui-ci est non stationnaire aux ordres 3 et 4. Une description appropriée de ce processus implique alors l'élaboration d'un modèle autorégressif faisant intervenir les cumulants pour identifier les paramètres de ce modèle.

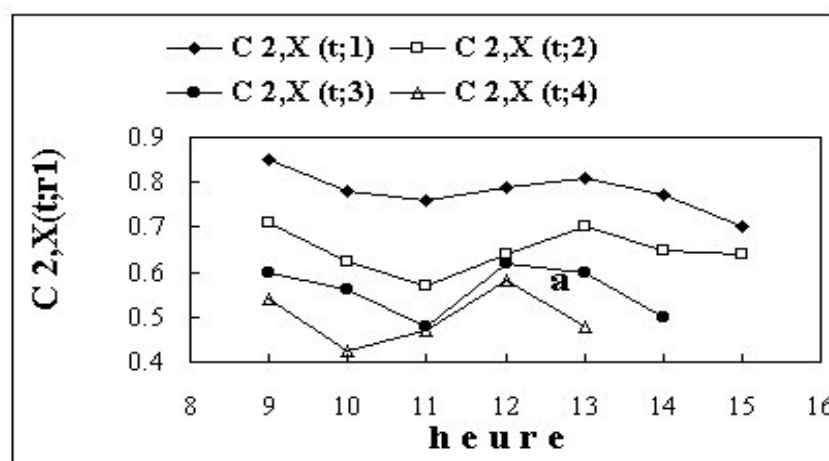


Fig. 2-20. Variations des cumulants d'ordres 2 au cours de la journée, pour différents retards.

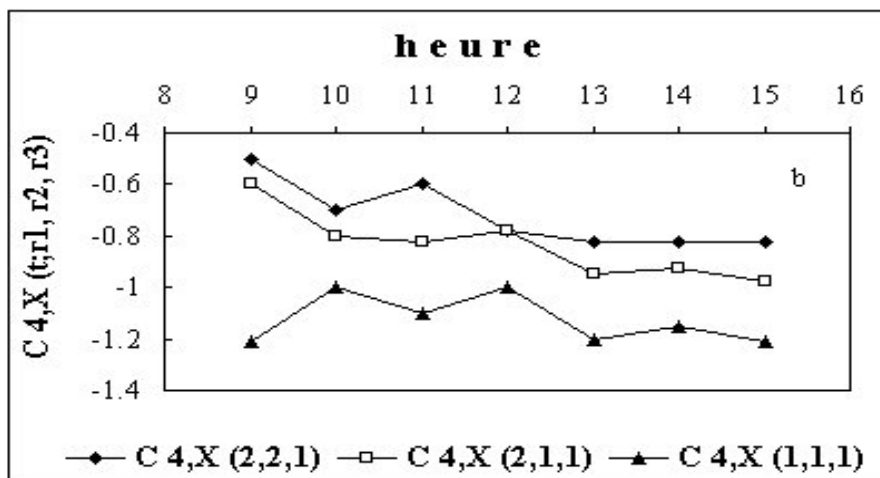


Fig. 2-21. Variations des cumulants d'ordres 4 au cours de la journée, pour différents retards.

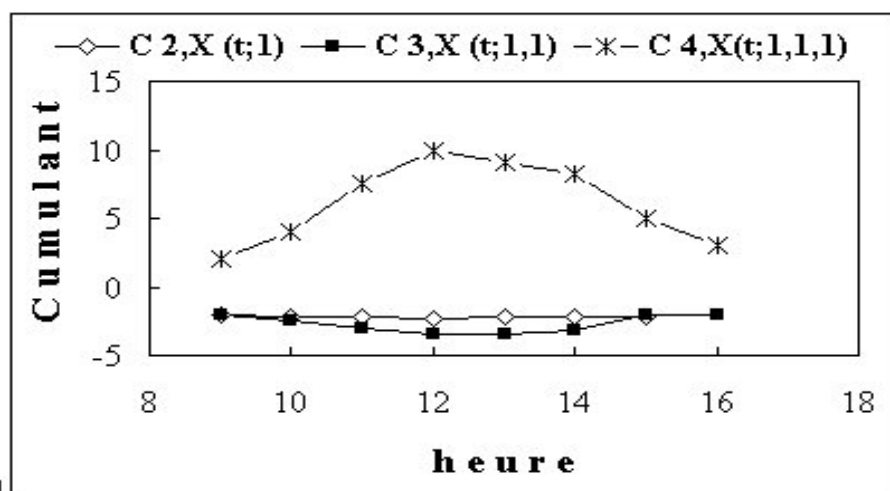


Fig. 2-22. Variations horaires des cumulants d'ordre 2, 3 et 4 pour le mois de Juillet.

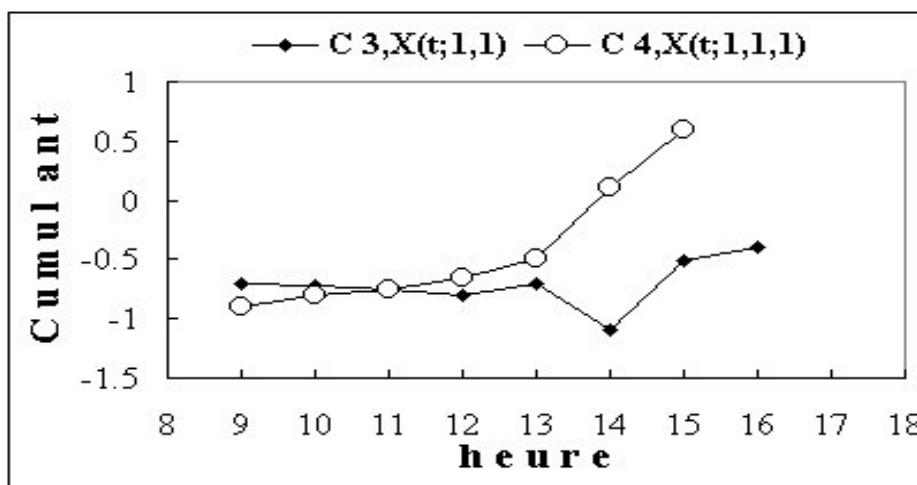


Fig. 2-23. Variations horaires des cumulants d'ordre 3 et 4 pour le mois de Mars.

2.8 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons montré que les données journalières de l'insolation, collectées dans différents sites de l'Algérie, peuvent être convenablement décrites par des distributions beta. Cette approche a aussi été appliquée au flux global d'irradiation solaire mesuré, heure par heure, à Bouzaréah (Alger) durant la période 1987 à 1989. Les distributions de fréquences établies à partir des mesures de l'irradiation solaire, sont presque toutes bimodales. Elles ont été lissées par une combinaison linéaire de deux distributions beta [Youcef Ettoumi *et al*, 20001 a]. La cartographie des paramètres beta effectuée au paragraphe 2.3.3, indique que plusieurs sites possèdent les mêmes caractéristiques du rayonnement solaire et peuvent être regroupés en une seule région homogène. Une telle partition associée à l'équation d'Ångström, permet une bonne évaluation de l'irradiation solaire pour n'importe quel site de l'Algérie.

Les modèles à une variable développés au paragraphe 2.5, montrent que les prédictors de l'insolation les plus importants sont l'insolation proprement dite et la nébulosité, observées dans le passé immédiat. Les autres paramètres, à savoir la température, la force du vent et l'humidité influent très peu dans la reconstitution de l'insolation.

Un modèle autorégressif du premier ordre décrivant les fluctuations de l'insolation, a ensuite été élaboré en considérant que l'insolation est fortement liée à la nébulosité. Le processus autorégressif considéré étant évolutif, nous avons obtenu des résultats qui sont meilleurs que dans le cas d'un processus autorégressif à coefficients constants.

L'emploi des cumulants a montré que le processus AR(1) qui décrit les données horaires d'insolation, est caractérisé par une distribution dissymétrique et que ce processus est non stationnaire aux ordres 3 et 4. D'où, l'intérêt de faire intervenir les cumulants dans la modélisation du rayonnement solaire.

Les modèles que nous avons développés dans ce chapitre, peuvent servir tout aussi bien dans le calcul prévisionnel, que dans la simulation de grandes séries chronologiques de données solaires [Youcef Ettoumi et Adane, 2000 a]. De tels modèles sont très utiles dans le calcul de la taille des systèmes de conversion de l'énergie solaire. En effet, en évaluant la moyenne de l'énergie solaire et de ses écarts à partir des données solaires que nous avons générées, il est possible d'estimer respectivement la surface de captation de ces systèmes et leur capacité de stockage. Dans ce but, nous avons expérimenté des modules photovoltaïques au silicium monocristallin et au silicium polycristallin sur le site de Dar El Beida (voir annexe

A). Ces expériences ont montré l'influence du flux global d'irradiation solaire, de la température, du vent et de l'humidité sur les performances de ces modules. Actuellement, nous menons des travaux dont le but essentiel est l'amélioration des performances des modules photovoltaïques [Youcef Ettoumi *et al.*, 2002].

CHAPITRE 3

3. Étude statistique des mesures de température

La température est un paramètre important dans les processus d'échanges. L'étude menée sur cette grandeur et sur ses différents comportements à différentes échelles de temps, conduit à l'élaboration d'une approche basée sur la loi de Laplace-Gauss. Cette approche permet la génération de la température en n'importe quel lieu en Algérie.

3.1 Généralités

Dans les stations météorologiques du réseau algérien, les collectes de la température ambiante se font toutes les trois heures. Sur la base de ces enregistrements, les températures extrêmes journalières maximales et minimales sont relevées. Ces deux types de température sont utiles dans la prévision du temps. Il y a également la température moyenne quotidienne déduite des mesures tri-horaires. De cette manière, nous pouvons accéder soit à la température moyenne journalière, soit à la température diurne. Ce sont là deux températures que les services de météorologie communiquent. En effet, elles sont jugées comme de bons indicateurs en matière de prévision du temps [Viers, 1968 ; Arléry *et al*, 1973 ; Houghton *et al*, 1996 ; Youcef Ettoumi *et al.*, 2001f].

De façon générale, nous nous sommes intéressés à l'étude et à l'analyse des aspects thermiques qui prévalent en Algérie, pour de nombreuses raisons. L'énergie thermique intervenant dans les échanges atmosphériques varie fortement, sous ses diverses formes, dans l'espace et dans le temps en fonction des paramètres astronomiques et météorologiques. La température se trouve liée à un grand nombre de phénomènes physiques, physiologiques et pathologiques.

Actuellement, nous sommes à la veille de la disparition des ressources énergétiques fossiles. Il serait donc opportun de connaître la distribution des ressources thermiques en Algérie, vu sous l'angle d'une énergie potentielle de substitution. Cette question concerne l'ensemble des stations d'observations météorologiques, où la mesure tri-horaire de la température est disponible.

Envisagée du seul point de vue thermique, l'installation de grands systèmes et la conception de grands projets dans le futur, nécessitent la connaissance des caractéristiques thermiques des lieux d'investissement. Cette connaissance est conditionnée par l'existence de séries de données, à la fois, complètes et fiables sur de longues périodes.

Cette information peut être obtenue par deux méthodes. L'une revient à effectuer une campagne de mesures qui est très coûteuse et qui demande beaucoup de moyens. L'autre méthode consiste à déterminer les caractéristiques thermiques dans des stations météorologiques de référence puis, à étendre ces caractéristiques à des endroits voisins de ces stations. Cette méthode permet de prédire différents paramètres météorologiques en vue de satisfaire des besoins spécifiques, notamment dans le cas de la conversion héliothermique.

Le but de notre étude est de décrire le comportement du champ de température en Algérie. Dans ce chapitre, le comportement de la température est analysé en considérant une importante base de données. Cette dernière comprend quarante trois stations météorologiques où les enregistrements ont été effectués, pour la plupart, durant la période 1930/97 (voir Table1-1). Des caractéristiques telles que la température normale à l'échelle du jour puis à l'échelle du mois ainsi que des écarts, définis en tant qu'amplitude d'oscillation thermique, sont estimés. Finalement, les distributions journalières de fréquences des température seront modélisées en considérant la distribution de Laplace-Gauss et les paramètres d'ajustement seront ensuite cartographiés.

3.2 Analyse descriptive de la température en Algérie

3.2.1 Données expérimentales

Partant des données brutes de la température tri-horaire, la procédure consiste à effectuer, pour chacun des sites, les étapes suivantes :

Extraction et organisation des données tri-horaires de la température et calcul de la valeur quotidienne. Cette valeur est la moyenne de huit mesures effectuées toutes les 3 heures, chaque jour. Elle est considérée comme manquante s'il y a absence de plus de trois mesures tri-horaires en une journée.

Détermination de la période de travail après élimination des années où les températures quotidiennes sont manquantes.

Pour effectuer l'analyse de ces données, 43 stations où sont archivées plus de trente années de mesures successives ont été sélectionnées . La période de mesure va de 1960 à 1997.

Remarquons que du point de vue de la représentativité, la répartition des stations à travers le territoire national est correcte.

3.2.2 Evolution de la température normale annuelle

La température normale annuelle est la moyenne des mesures quotidiennes effectuée sur toute l'année [Guttman et Plantico, 1987]. Le traitement des données de température normale annuelle obtenues pour la période 1960/99, fait ressortir l'existence d'une tendance séculaire, d'une tendance cyclique et d'une fluctuation aléatoire.

La représentation de ces trois mouvements est donnée par la Fig. 3-1. Nous trouvons que la tendance séculaire à long terme est linéaire. Cette tendance est représentée par l'expression : $y_s = 0,0268x + 15,133$, avec un coefficient de corrélation valant 0,26. La

moyenne mobile prise sur deux valeurs successives de température représente très bien la tendance cyclique. Ces dernières ont été lissées par un polynôme d'ordre 6 dont l'équation est : $y_c = 6 \cdot 10^{-8} x^6 - 3 \cdot 10^{-5} x^5 + 0,0052 x^4 - 0,5137 x^3 + 28,4 x^2 - 829,22 x + 10010$. Le coefficient de corrélation résultant de ce lissage, vaut 0,86. De ces deux lissages, résulte un coefficient de corrélation dépassant 0,88 entre les données expérimentales (x) et les moyennes mobiles lissées (avec mm2 = moyenne mobile du second ordre). Comme le montre la Fig. 3-1, deux alternances bien distinctes formées de deux demi-périodes de onze années, apparaissent pendant la période 1970/91. Cette tendance cyclique est liée à l'activité solaire. Après l'élimination des tendances cycliques et séculaires, on observe des fluctuations aléatoires de la température d'une année à l'autre. Ces fluctuations ont été modélisées par un processus autorégressif du premier ordre. Le paramètre du modèle AR(1) vaut $-0,4$ et la variance de l'erreur est de 0,069. D'après le diagramme de la Fig. 3-1, le modèle AR(1) décrit très bien les fluctuations de température. En comparant ce modèle au modèle AR(1) de l'insolation donné par l'expression (2 – 20), on trouve que l'effet de mémorisation dans le processus de la température est plus important que dans le cas du rayonnement solaire. Ceci s'explique par le fait que les variations de la température sont plus lentes que celles du rayonnement solaire. Les prochains paragraphes seront consacrés à l'étude du comportement de la température à différentes échelles de temps.

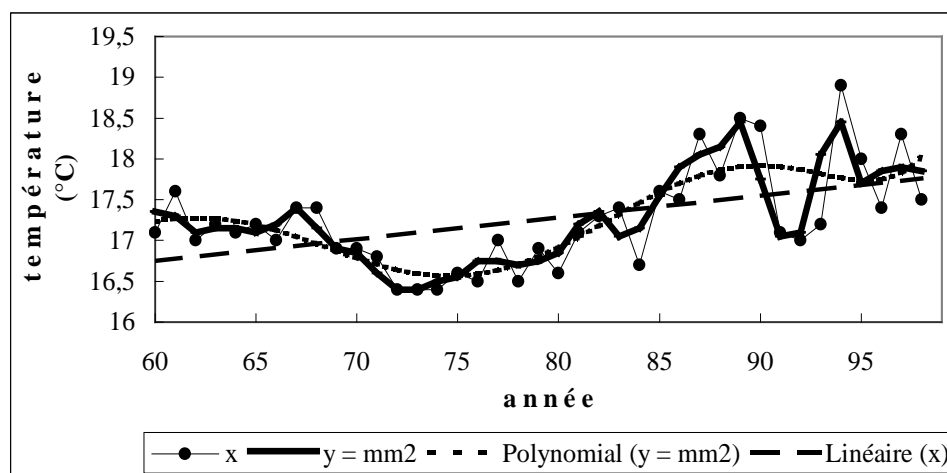


Fig. 3-1. Variations de la température normale annuelle à Skikda.

3.2.3 Evolution de la température moyenne normale

Pour un site donné de l'Algérie, les caractères généraux de la température de l'air sont décelés en considérant un nombre d'années aussi grand que possible. Les courbes annuelles qui en résultent, sont plus ou moins déformées par des irrégularités dues à plusieurs

phénomènes tels que le passage de perturbations, les changements de masse d'air caractérisant le temps réellement observé, les reliefs et l'emplacement suivant les altitudes. Mais, compte tenu des écarts thermiques, on distingue toujours l'oscillation thermique annuelle exprimant le fait que l'été est toujours plus chaud que l'hiver.

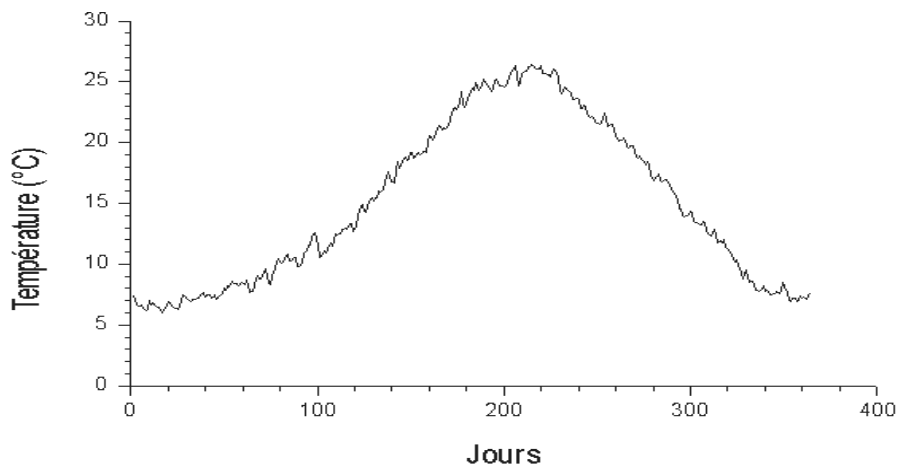
3.2.3.1 Température moyenne normale journalière

Pour chaque jour de l'année et pour chaque station sélectionnée, la température moyenne normale a été calculée au moyen d'une longue série d'observations, en faisant [WMO, 1989]:

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad (3-1)$$

où N est le nombre total d'observations quotidiennes sur toute la période d'étude et T_i , la température quotidienne.

A titre d'exemple, les variations quotidiennes de la température à la station de Constantine d'Alger et de In Salah sont illustrées par les diagrammes de la Fig. 3-2. Les courbes obtenues sont dentelées, laissant apparaître de nombreuses irrégularités et des singularités. Nous pouvons noter que les irrégularités sont plus prononcées pour les stations d'Alger et de Constantine, comparativement à la station d'In Salah. Ceci est probablement lié à leur situation géographique. Ainsi, l'évolution moyenne de cette variation pour les trois sites sont de type astronomique. Les fluctuations qui les accompagnent peuvent être liées aux perturbations météorologiques qui ne se répètent pas de la même manière d'une année à l'autre. La température moyenne normale a été calculée pour les stations d'Alger, de Constantine et d'In Salah, respectivement sur la base de 37 ans, de 37 ans et de 32 ans. Les irrégularités qui apparaissent sur les courbes de la Fig. 3-2, s'expliquent par une forte dispersion des données sur une période de plus de trois décennies.



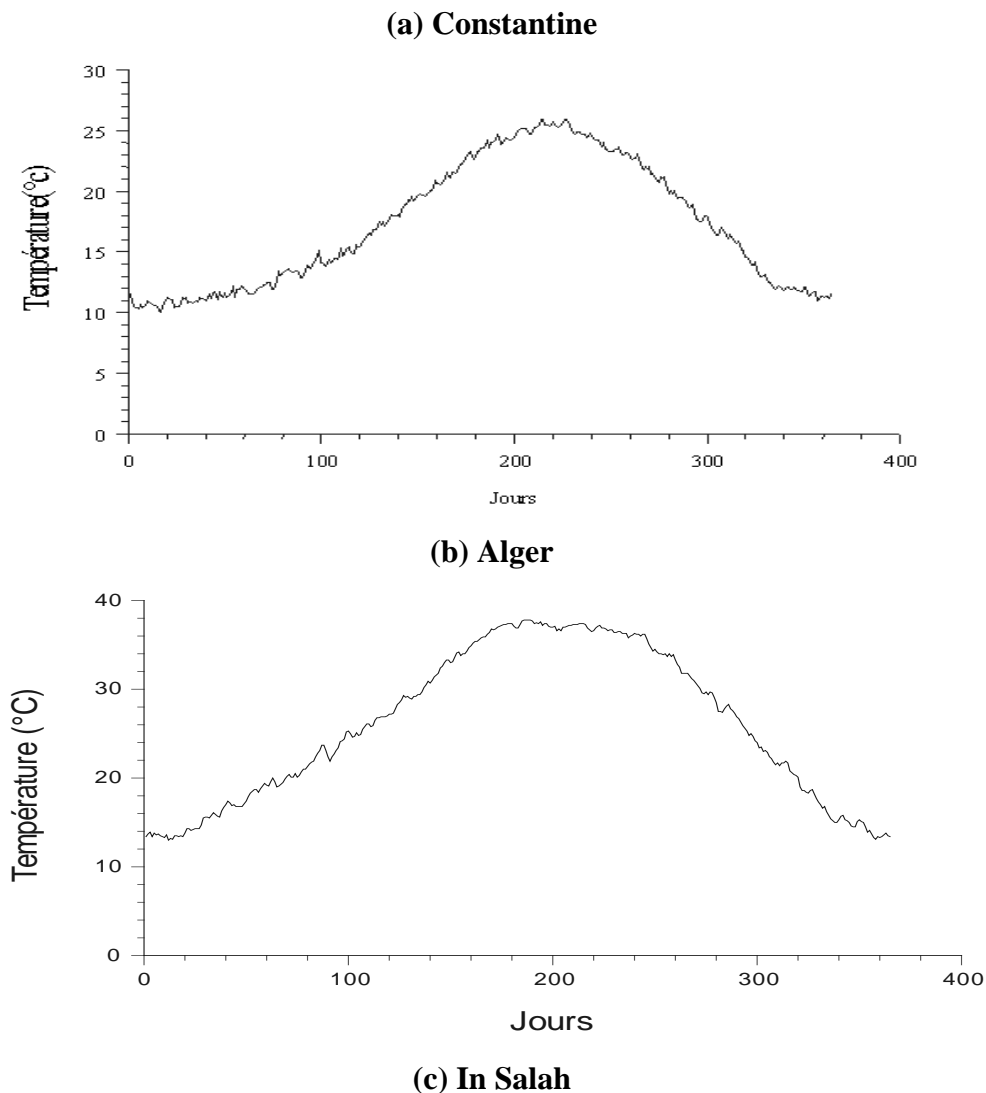


Fig. 3-2. Variations de la température moyenne quotidienne.

3.2.3.2 Température moyenne normale mensuelle

Les valeurs moyennes normales mensuelles de température peuvent être déduites en appliquant la relation (3 – 1). Pour cela, il suffit de regrouper les données journalières par mois de même nom sur la période d'étude, puis d'en effectuer la moyenne. Ces températures sont établies sur un nombre aussi grand que possible d'années d'observations. Elles constituent les températures normales mensuelles, utilisées en pratique pour l'étude de la variation annuelle de la température. L'amplitude de l'oscillation annuelle moyenne est déterminée en faisant la différence entre la moyenne du mois le plus chaud de l'année (Juillet ou Août) et celle du mois le plus froid (Janvier ou Décembre).

Dans la Fig. 3-3, la température normale mensuelle a été représentée en fonction de la latitude. Les diagrammes de cette figure montrent que la température mensuelle normale est

comprise entre 4 et 40°C. La température la plus élevée est atteinte au mois de juillet à In Salah. La température la plus faible est obtenue à El Bayadh.

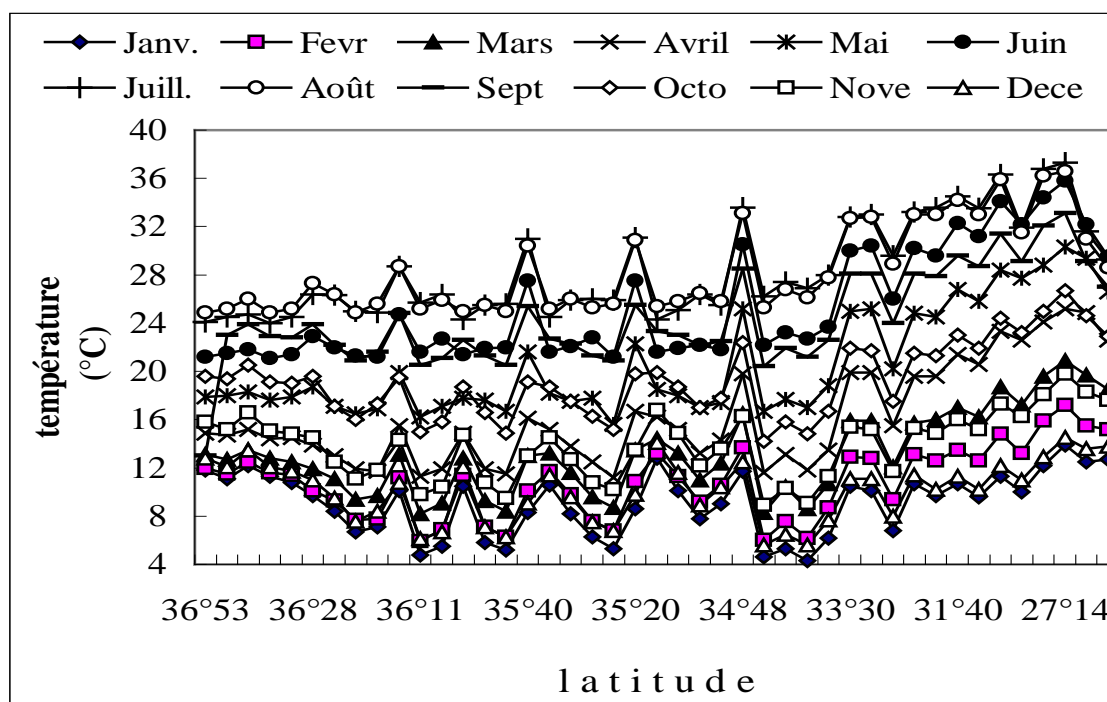


Fig. 3-3.Représentation de la température mensuelle normale en fonction de la latitude.

Compte tenu de ces résultats, la base totale de données quotidiennes de température que nous avons considérée, a été répartie en douze sous-ensembles mensuels auxquels on ajoute deux séries chronologiques caractérisant les mois des extrêmes, c'est à dire les mois représentant respectivement la saison chaude et la saison froide. Les courbes de la Fig. 3-4 représentent les moyennes mensuelles, les moyennes annuelles et l'amplitude de l'oscillation annuelle moyenne, caractérisant la variation annuelle de la température pour différentes zones climatiques de l'Algérie. Il s'agit des régions d'Alger, d'Oran, d'El-Bayadh, d'In Salah et de Tamanrasset.

La Fig. 3-5 illustre l'évolution de la moyenne annuelle de température et l'amplitude de l'oscillation en fonction de la latitude. Ces résultats montrent que l'évolution annuelle de la température a le même comportement que celui de l'irradiation solaire incidente. Par ailleurs, il existe une oscillation unique avec des extrêmes décalés d'environ un mois et une courbe annuelle presque symétrique et maximum en Juillet, sauf pour les stations côtières où le maximum se produit en Août. Ainsi, le maximum à Alger (36°43'N) se produit en Août, tandis que le maximum à In Salah (27°14'N) a lieu en Juillet. Cette différence d'évolution, entre les stations maritimes et les stations continentales, se traduit par le fait que, pour les

premières, l'Automne est plus chaud que le printemps alors qu'on observe l'inverse pour les secondes. A Oran, la température moyenne en Avril est de 15,2°C. Elle est inférieure à celle observée en Octobre, soit 18,7°C. Par contre, à Djanet, la température moyenne en Avril, est de 24,9°C. Elle est donc supérieure à celle obtenue en Octobre, soit 24,6°C.

La variabilité des températures moyennes, aux échelles mensuelles et annuelles, est plus marquée en hiver qu'en été et elle augmente avec la latitude et le degré de continentalité. A In Amenas, la différence de température moyenne entre les mois de Janvier et de Février, est de 3,2°C. Par contre, cette différence entre les mois de Juillet et d'Août, est de 0,4°C. A Constantine, la différence de température entre les mois de Janvier et de Février, est de 1°C, tandis que cette différence entre les mois de Juillet et d'Août, est de 0,1°C.

L'amplitude de l'oscillation annuelle moyenne de la température est influencée par la latitude, l'altitude, le relief et le degré de continentalité (voir Fig. 3-6a). En excluant la région montagneuse du Hoggar et du Tassili et la région des Hauts Plateaux, les résultats obtenus, indiquent que cette amplitude augmente du Nord au Sud. En effet, elle est de 13,1°C à Skikda, 21,8°C à Biskra, 22,3°C à El Oued et 23,4°C à In Salah.

Les températures moyennes annuelles constituent un indicateur simple pour délimiter les régions à climat froid vis à vis des régions à climat chaud. Cependant celles-ci varient considérablement d'une région à une autre, allant de 14°C à 26°C sur tout le territoire national. Notons que dans le Nord de l'Algérie, la température moyenne est voisine de 16°C. Au Nord du Sahara, elle varie entre 19°C et 22°C. Il en est de même dans la région du Hoggar et du Tassili alors qu'elle atteint 26°C au Sahara central et à l'extrême Sud (voir Fig. 3-6b).

Comme l'indique la Fig. 3-6, la répartition spatiale des températures annuelles constitue un schéma simplifié de l'apparition des principales zones d'influence thermique du climat de l'Algérie. Ce schéma peut être combiné à d'autres facteurs climatiques importants, tels que les précipitations, l'humidité et l'ensoleillement. Tous ces résultats sont directement utilisables pour l'évaluation des besoins en énergie thermique.

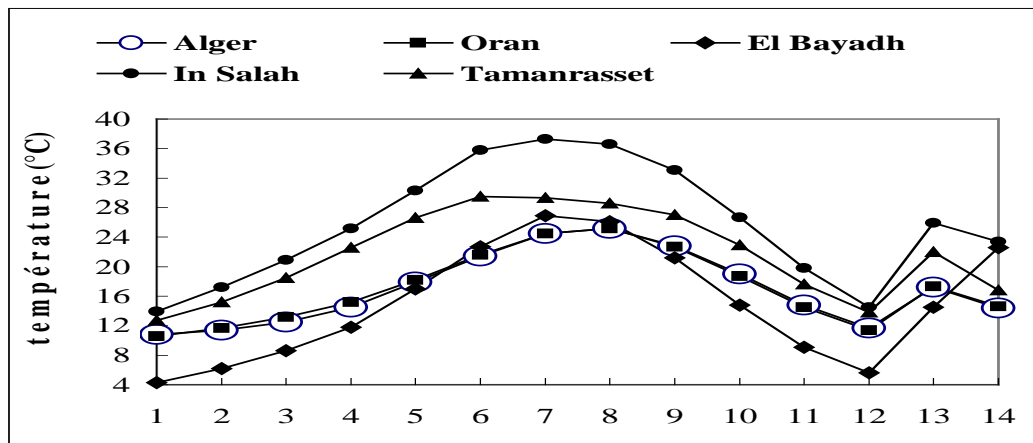


Fig. 3-4. Température moyenne, pour les douze mois de l'année (1 à 12), pour la saison chaude (13) et pour la saison froide (14).

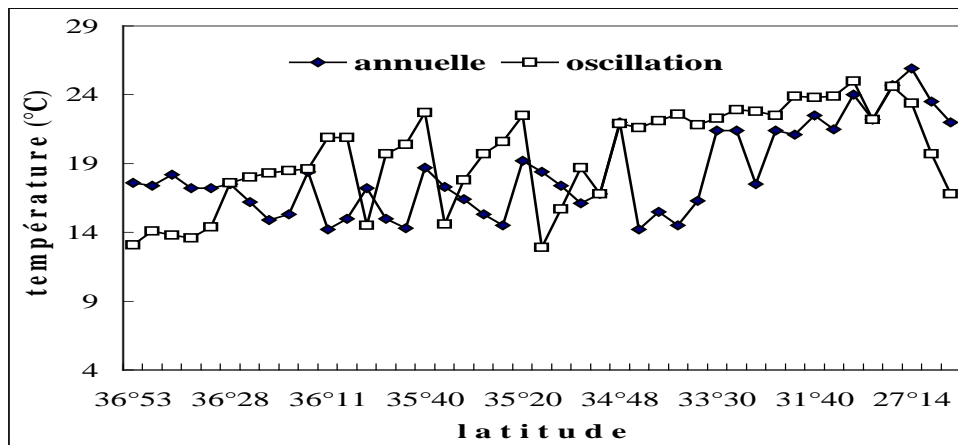
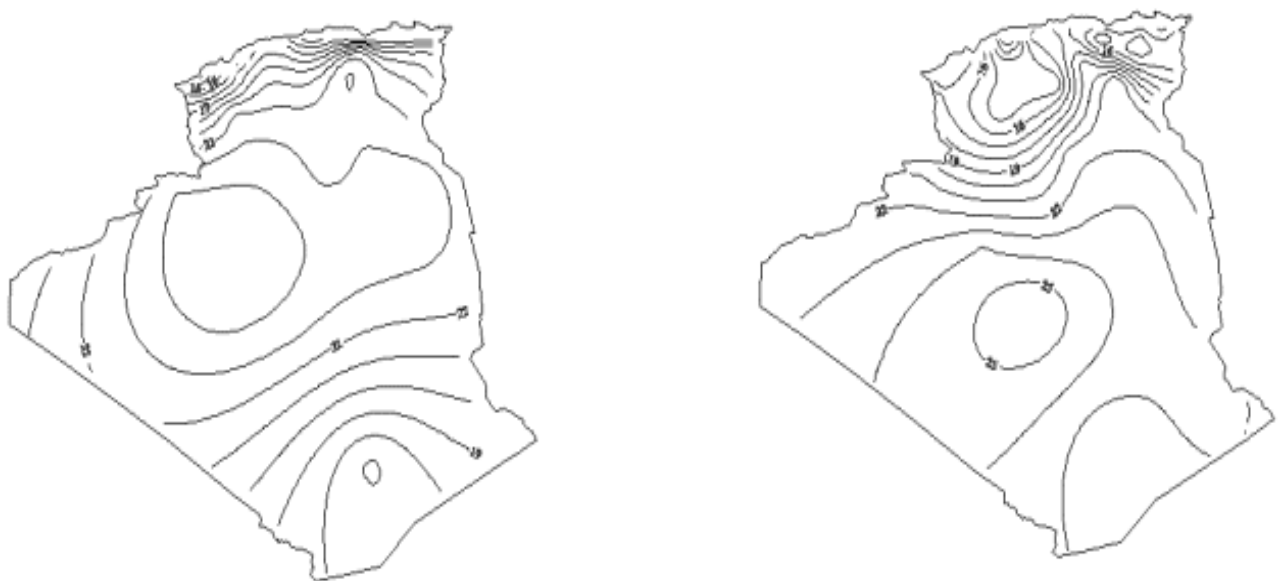


Fig. 3-5. Température moyenne annuelle et amplitude d'oscillation en fonction de la latitude.



(a) Amplitude de l'oscillation moyenne
moyenne.

(b) Amplitude de la température
moyenne.

Fig. 3-6. Distribution spatiale de la température et de son oscillation à l'échelle annuelle.

3.3 Analyse des séries chronologiques

Un examen de la représentation graphique des séries de données de température permet déjà de constater la vraisemblance de certaines composantes fondamentales, si la durée totale des observations est suffisamment longue. D'après la Fig. 3-7, on peut distinguer :

Un mouvement de tendance générale.

Un mouvement cyclique qui désigne pratiquement des oscillations de périodes et d'amplitudes plus ou moins irrégulières.

Un mouvement périodique qui se produit à des intervalles constants . La période qui sépare deux points homologues consécutifs peut être la journée (mouvement diurne), le mois ou l'année . Dans une période d'une année, se trouve le mouvement saisonnier.

Un élément aléatoire qui échappe à toute prévision et qui entraîne des variations accidentelles (variations résiduelles).

Le mouvement diurne est éliminé par le fait qu'on a effectué la moyenne quotidienne de la température dans un laps de temps allant de 6h à 18h. L'effet des saisons est éliminé, après calcul du rapport suivant :

$$\Theta(j) = \frac{T(j)}{\bar{T}(j)} \quad (3-2)$$

où $\Theta(j)$ est la température quotidienne et $\bar{T}(j)$, la température quotidienne normale.

La Fig. 3-8, indique que pour Bédjaia, la chronique des températures quotidiennes ainsi désaisonnalisées, est marquée par une tendance à la stabilité avec une valeur moyenne avoisinant l'unité. Plus généralement, nous avons trouvé que les moyennes et les écarts-type des données relatives à chacune des 43 stations du réseau, demeurent invariants au cours du temps, même quand on déplace l'origine des séries mensuelles de données. Ce résultat prouve la stabilité de ces séries.

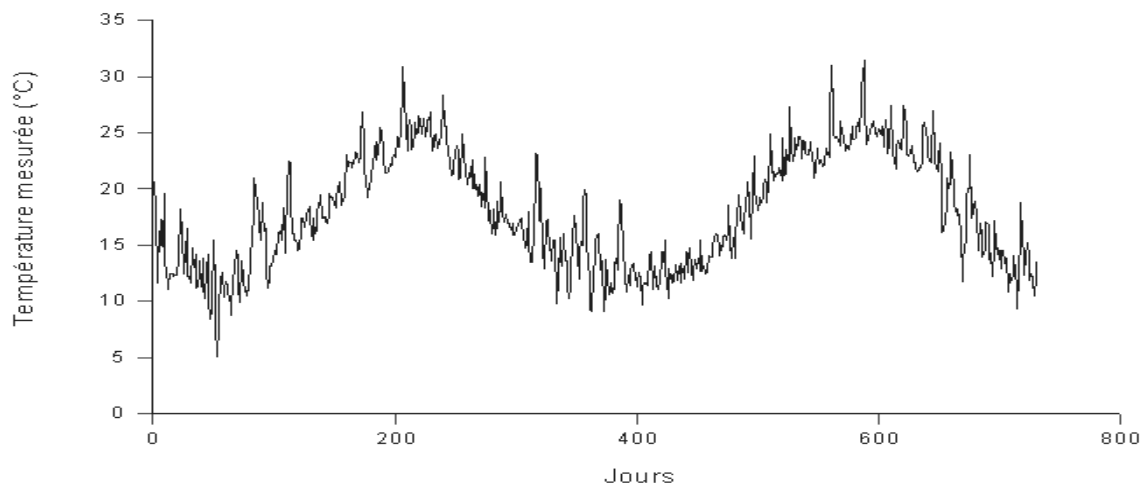


Fig. 3-7. Evolution de la température quotidienne mesurée à Bédjaia de 1996 à 1997.

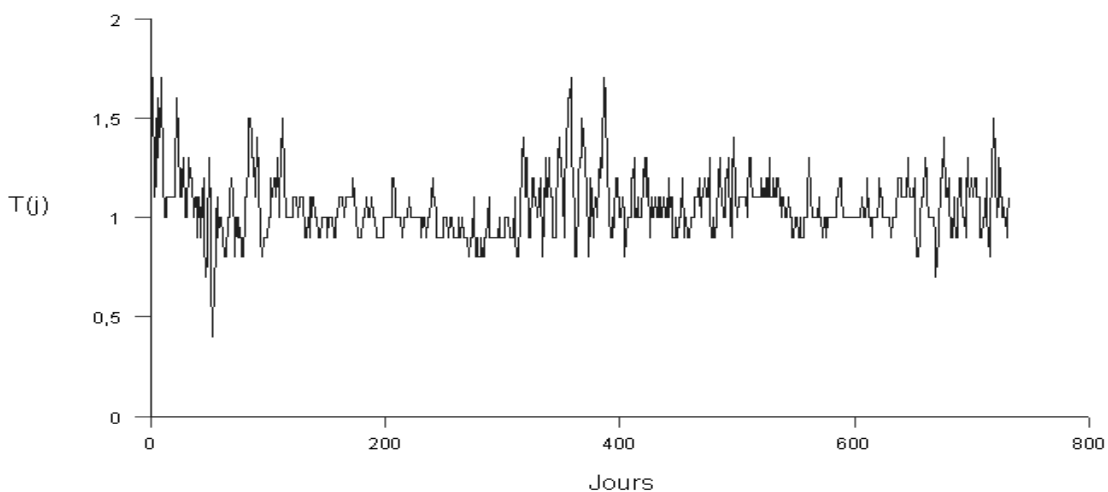


Fig. 3-8. Evolution de la température quotidienne désaisonnalisée à Bédjaia de 1996 à 1997.

3.4 Modélisation de la température par une distribution de Laplace-Gauss

3.4.1 Distribution de fréquences

Rappelons que la base de données quotidiennes de températures a été divisée en quatorze sous-ensembles mensuels pour chacun des 43 sites indiqués dans la Table 1 - 1, soit un sous-ensemble mensuel pour chacun des douze mois de l'année, pour les mois de saison chaude et pour ceux de saison froide. La classification que nous avons adoptée, est identique à celle effectuée au paragraphe 2.2 pour les données d'insolation. Pour chacun des sous-ensembles mensuels, le nombre N d'observations est toujours supérieur à 1000. L'histogramme des températures quotidiennes a été construit pour chaque site et pour chaque sous-ensemble mensuel, en calculant le nombre de classes N_c à l'aide de l'expression suivante :

$$N_c = 5 \times \log_{10}(N), \quad (3-3)$$

Le nombre de classes que l'on trouve, est alors de vingt. Comme la température varie entre -10°C et $+50^{\circ}\text{C}$ en Algérie, l'étendue de chaque classe vaut 3°C . A titre d'exemple, la Fig. 3-9 donne les histogrammes obtenus à Alger en Février, à Maghnia en Septembre, à Batna en Juillet, à Ghardaia en Mars, à In Amenas en Octobre, à Tamanrasset en Avril, en Août et en Décembre. Sur ces histogrammes, les fréquences relatives sont représentées par des points (\bullet). L'ensemble des histogrammes mensuels obtenus pour les 43 stations, présente les caractéristiques suivantes:

Un seul maximum dans tous les cas et deux points d'inflexion à proximité du maximum des distributions légèrement dissymétriques dans la plupart des cas
courbe tendant asymptotiquement vers zéro de part et d'autre du maximum.

Nous avons déduit de ces histogrammes, les paramètres caractéristiques des séries chronologiques de température. Ce sont la moyenne $\bar{x} = \langle T \rangle$, l'écart-type σ , le coefficient d'asymétrie β_1 et le coefficient d'aplatissement β_2 .

La moyenne $\langle T \rangle$ est proche du mode et de la médiane. Parfois, elle coïncide avec le mode.

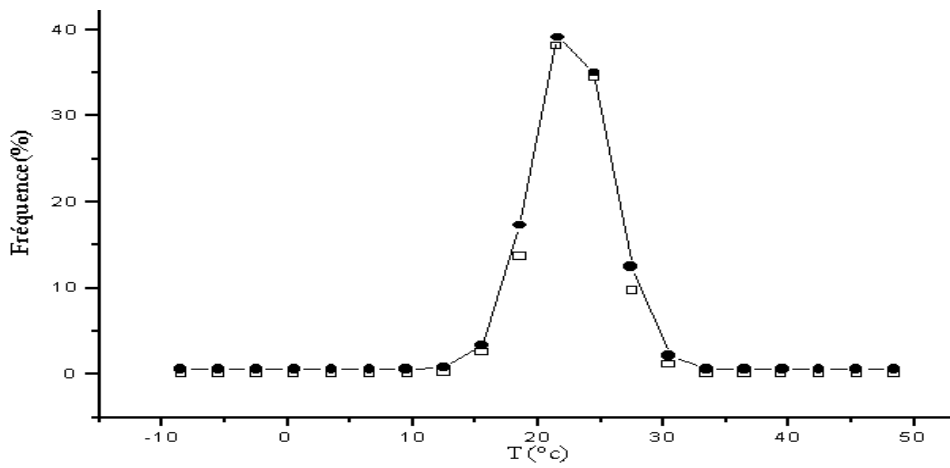
Le coefficient d'asymétrie β_1 est généralement compris entre -1 et $+1$. Il y a donc des dissymétries soit à gauche, soit à droite du maximum. Cependant, sa valeur est voisine de zéro, car les distributions sont peu dissymétriques. Notons que le signe de β_1 est celui de la différence (moyenne - mode).

Le coefficient d'aplatissement β_2 est généralement inférieur à trois. Donc, ces distributions sont un peu plus aplaties par rapport à la distribution de Gauss. Cependant, il existe beaucoup de cas où β_2 est supérieur à trois. On a alors affaire à des distributions plus effilées que celle de Gauss.

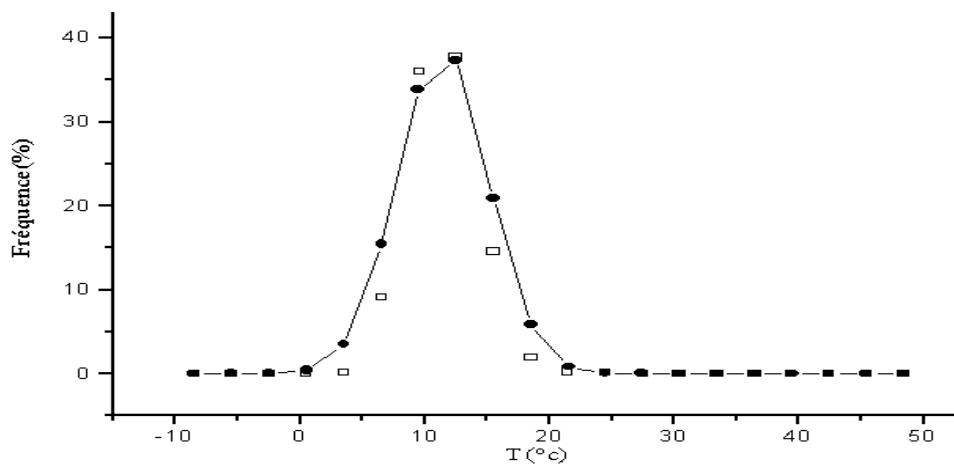
Les valeurs de σ sont très proches de l'unité.

La dissymétrie est négative (moyenne < Médiane < Mode). C'est le cas de l'hiver où les températures les plus basses sont fréquentes. Le cas contraire est observé en été où les températures sont les plus élevées.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

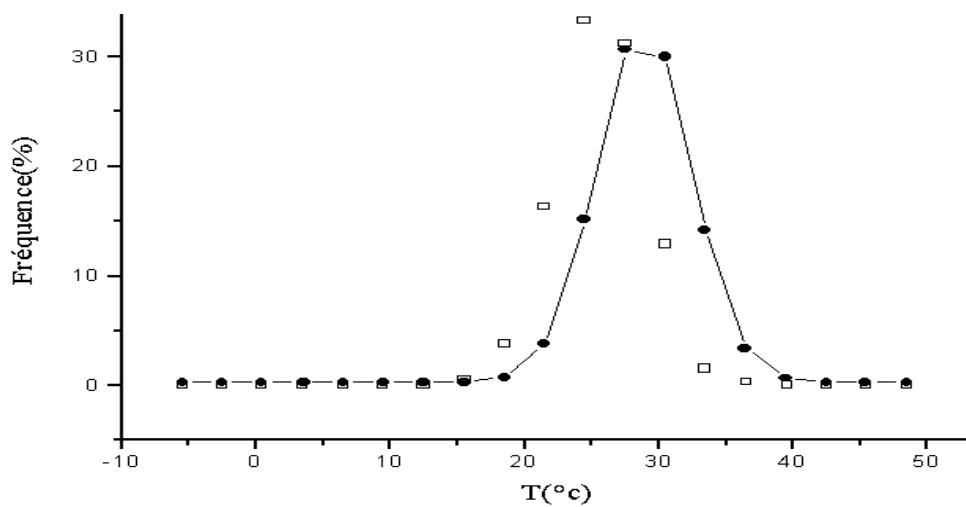


(a) Tamanrasset (mois d'Avril)

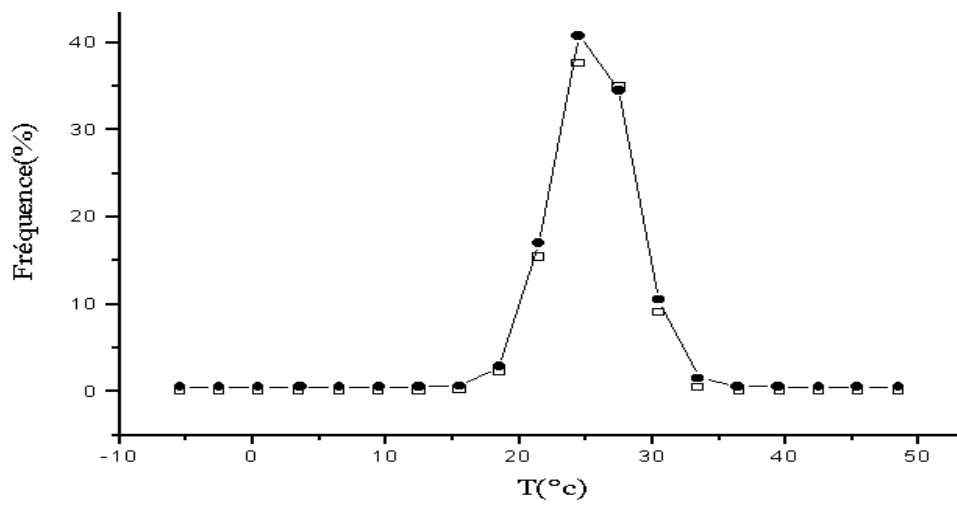


(b) Alger (Février)

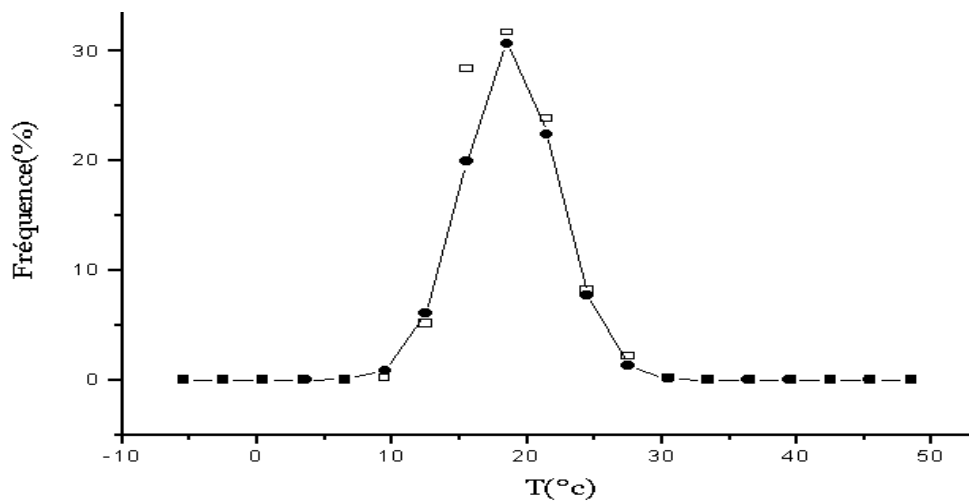
Fig. 3-9. Distribution de fréquences expérimentales de température quotidienne (●) et distribution de Laplace –Gauss (□) (suite).



(c) Batna (Juillet)

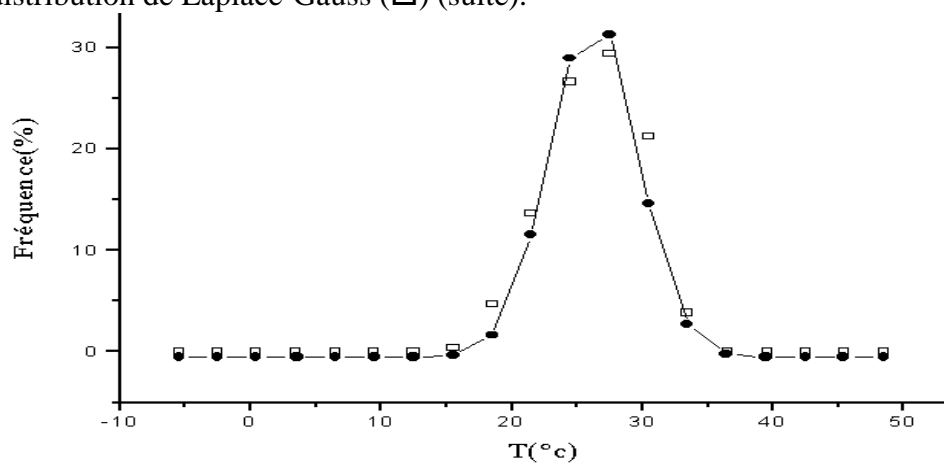


(d) Maghnia (Septembre)

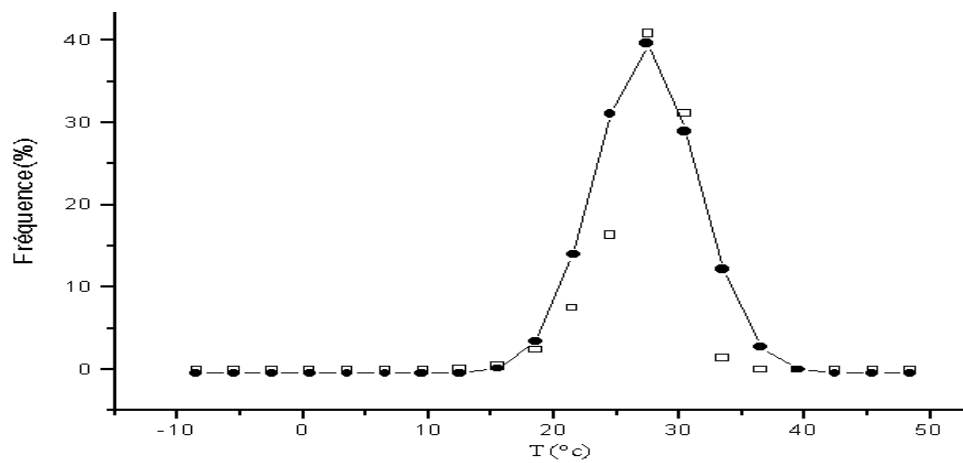


Ghardaia (Mars)

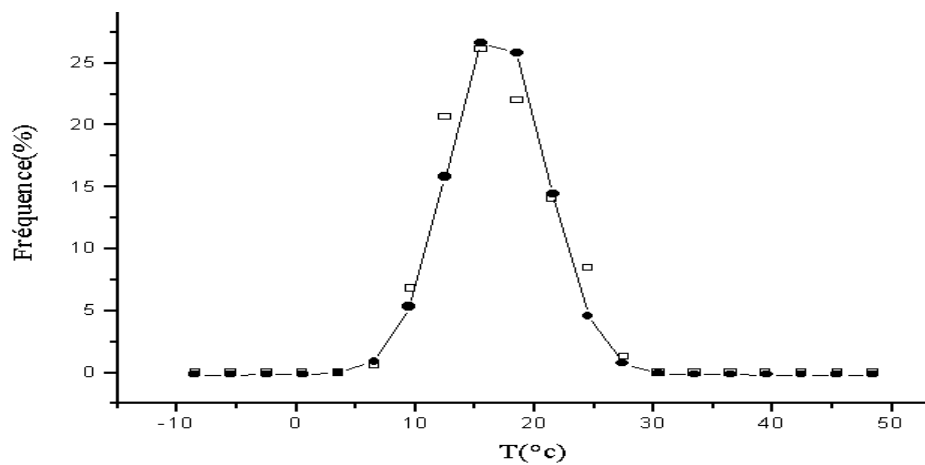
Fig. 3-9. Distribution de fréquences expérimentales de température quotidienne (●) et distribution de Laplace-Gauss (□) (suite).



(f) In Amenas (Octobre)



(g) Tamanrasset (saison chaude)



(h) Tamanrasset (saison froide)

Fig. 3-9. Distribution de fréquences expérimentales de température quotidienne (●) et distribution de Laplace-Gauss (□) .

3.4.2 Ajustement par la loi de Laplace-Gauss

La distribution Laplace-Gauss est représentée par une courbe unimodale et symétrique. Elle présente deux points d'inflexion, symétriques par rapport à l'axe d'abscisse. Brièvement, les caractéristiques de la distribution de Laplace-Gauss sont:

Moyenne = Mode = Médiane.

L'écart absolu moyen est:

$$e_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}| = \sigma \sqrt{\frac{2}{\pi}} \quad (3-4)$$

$$\beta_1=0 \text{ et } \beta_2=3.$$

En comparant avec l'analyse effectuée au paragraphe 3.4.1, on trouve que les caractéristiques de la distribution de Laplace-Gauss sont pratiquement analogues à celles des distributions expérimentales de fréquences des données de température. Par suite, chacune des distributions mensuelles de fréquences des données quotidiennes de température obtenues pour les quarante trois sites de l'Algérie, peut être modélisée par une distribution de Laplace-Gauss de moyenne \bar{x} et d'écart-type σ .

Supposons que la température quotidienne soit décrite par une variable aléatoire continue (x), normalement distribuée autour de la moyenne \bar{x} . La fonction de répartition associée à cette variable, est :

$$F(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - \bar{x})^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-5)$$

Dans cette expression, x_i désigne le centre de la classe i de l'histogramme considéré (avec $i = 1, \dots, 20$).

La procédure d'ajustement consiste à linéariser la fonction de répartition (3-5). A cet effet, posons :

$$t_i = (x_i - \bar{x})^2 \quad (3-6)$$

et

$$Y_i = -\text{Ln}(F(t_i)) \quad (3-7)$$

Il vient :

$$Y_i = -\text{Ln}(F(t_i)) = -\text{Ln}\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{t_i}{2\sigma^2}\right)\right) \quad (3-8)$$

ou

$$Y_i = \text{Ln}(\sigma\sqrt{2\pi}) + \frac{1}{2\sigma^2} t_i \quad (3-9)$$

Cette transformation revient à considérer une distribution Laplace-Gauss dont les paramètres sont:

$$a = \text{Ln}(\sigma\sqrt{2\pi}) \quad (3-10)$$

et

$$b = \frac{1}{2\sigma^2} \quad (3-11)$$

D'où, le modèle de régression linéaire :

$$Y_i = a + bt_i \quad (3-12)$$

Les coefficients a et b sont calculés par la méthode des moindres carrés, en utilisant t_i en abscisse et les logarithmes des fréquences expérimentales en ordonnée. En exprimant la fonction de répartition (3-5) en fonction des paramètres a et b, on obtient une nouvelle forme de la distribution de probabilité qui est :

$$F(x) = \exp(-a) \exp[-b(x - \bar{x})^2] \quad (3-13)$$

3.4.3 Résultats

Dans les paragraphes précédents, nous avons vu que la base de données considérée est celle des 43 stations météorologiques de la Table 1-1 et que pour chaque site, elle se compose des douze sous-ensembles mensuels auxquels on ajoute deux séries chronologiques caractérisant respectivement la saison chaude et la saison froide.

Les coefficients de régression (a) et (b) ont été calculés pour chaque histogramme extrait de cette base de donnée, en suivant la méthode exposée dans le paragraphe 3.4.2. La Fig.3-10 donne les valeurs des paramètres a et b obtenus avec les quatorze séries de données de température pour le site d'Alger.

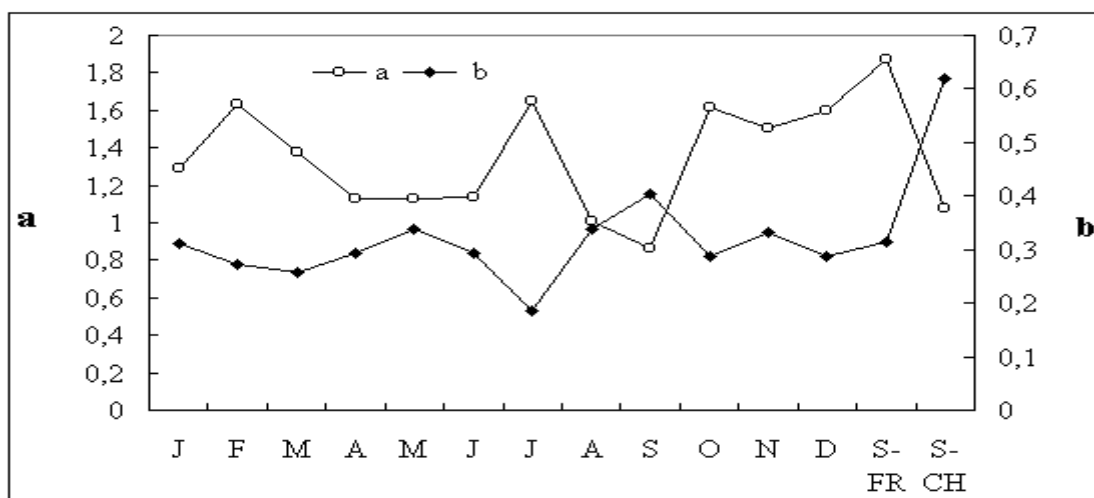


Fig. 3-10. Représentation des coefficients (a) et (b) de la loi Laplace-Gauss relatifs à la station d'Alger.

Dans les diagrammes de la Fig. 3-9, nous avons représenté les distributions Laplace-Gauss par un carré blanc (\square). On trouve que ces distributions se superposent pratiquement aux distributions expérimentales.

Plus généralement, nous avons constaté que les distributions expérimentales extraites de l'ensemble de la base de données, sont décrites de façon satisfaisante par des distributions de Laplace-Gauss. Pour apprécier la qualité de l'ajustement, nous avons effectué un test de Kolmogorov-Smirnov. Avec un risque de se tromper de 1%, ce test indique que les différences entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par le calcul sont inférieures à 0,35. Cela signifie que tous les échantillons extraits de notre base de données se trouvent dans un intervalle de confiance de 99%. Par conséquent, les fluctuations journalières de température sont régies par la loi de Laplace-Gauss.

Remarquons que la cartographie que nous avons réalisée avec deux paramètres peut être ramenée à une représentation équivalente à un seul paramètre. En effet, le paramètre a peut être exprimé en fonction du paramètre b, en combinant les expressions (3-10) et (3-11). Dans ce cas, la distribution de Laplace-Gauss devient :

$$F(x) = \frac{b}{\pi} \exp[-b(x - \bar{x})^2] \quad (3-14)$$

3.5 Cartographie des paramètres et simulation des distributions de Laplace-Gauss

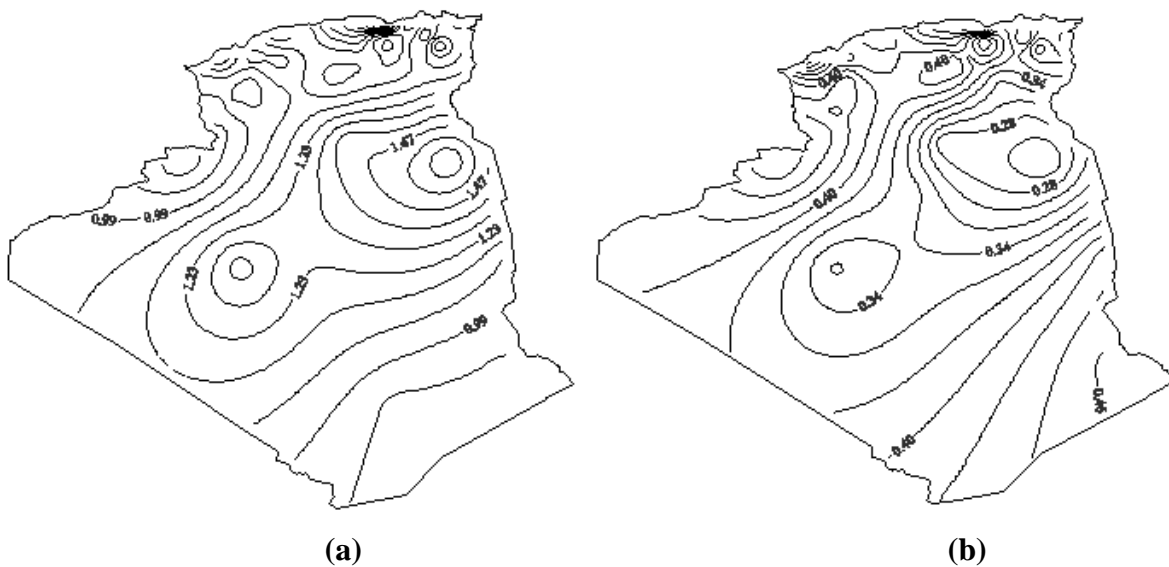
Les techniques développées au paragraphe 2.3 pour simuler l'insolation, ont été adaptées à la simulation de la distribution des fréquences relatives des données quotidiennes de température moyenne.

La Fig. 3-11 indiquent les cartes des paramètres de la distribution de Laplace-Gauss obtenues respectivement pour certains mois de l'année, pour la saison chaude et pour la saison froide en Algérie. Les courbes de la Fig. 3-11 ont été tracées à l'aide du logiciel Surfer. La procédure adoptée consiste à regrouper tous les points qui appartiennent à un même cercle, à opérer par interpolation de ces points et à relier tous les points de même valeur par une ligne d'iso-coefficient. On obtient alors des cartes dont les iso-lignes des paramètres(a) et (b) ont été tracées en fonction de la latitude et de la longitude. Ces cartes diffèrent d'un mois à l'autre en fonction des variations saisonnières de la température en Algérie. Cette cartographie

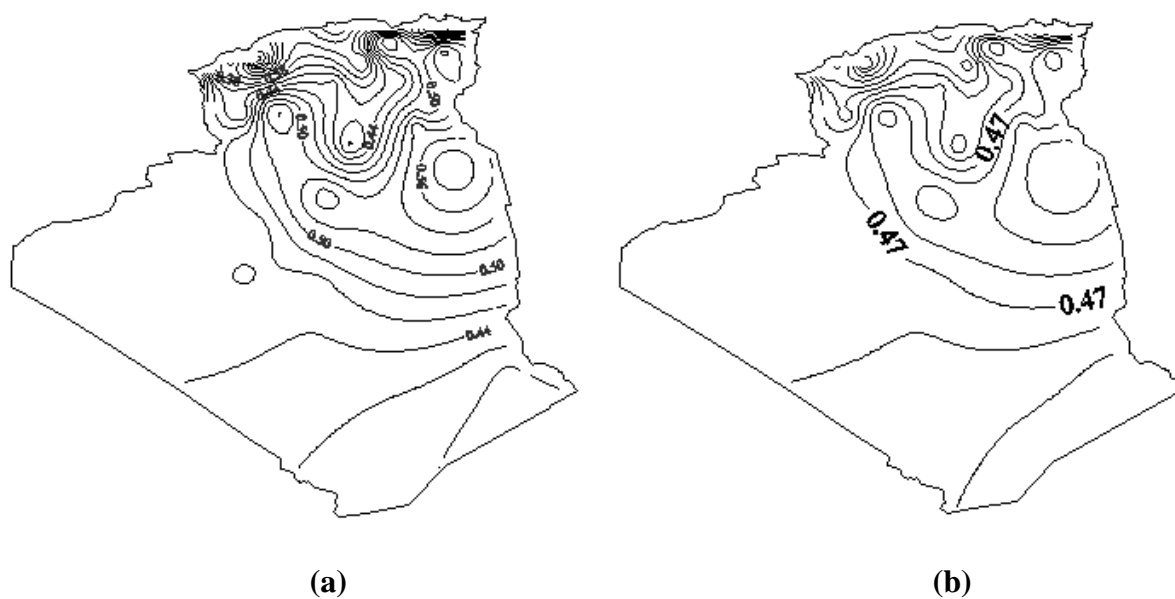
permet l'estimation des paramètres (a) et (b) pour un site donné, puis la simulation des distributions de Laplace-Gauss caractérisant ce site.

Dans le but d'apprécier la validité des résultats de la simulation, nous avons considéré des sites différents de ceux employés pour la modélisation par la distribution de Laplace-Gauss. Ces sites sont Dellys, Médéa, Ksar Chellala, Ghazaouet, Béni Abbès. Ensuite, nous avons calculé le coefficient de corrélation (R) existant entre les distributions simulées et celles obtenues expérimentalement. Pour la station de Dellys, ce coefficient vaut respectivement 0,9, 0,97 et 0,7 pour le mois de Janvier, le mois d'Août et la saison chaude. Pour Médéa, R est compris entre 0,6 et 0,8. Pour les stations de Ghazaouet et de Ksar Chellala, le coefficient de corrélation est, en moyenne, égal à 0,7. A la station de Béni Abbès, celui-ci atteint la valeur de 0,95 en Décembre.

Plus généralement, le coefficient de corrélation se situe entre 0,6 et 1 pour l'ensemble des 43 stations étudiées. Ce résultat montre que les données quotidiennes de température sont bien représentées par des distributions Laplace-Gauss et que ces distributions sont convenablement reproduites à partir des cartes de la Fig. 3-11 pour n'importe quel site de l'Algérie, même pour les endroits où il y a absence de données. Ce type de cartographie donne des informations cruciales pour la climatologie régionale de l'Algérie et permet d'estimer ou de simuler la température atmosphérique quel que soit le lieu considéré.

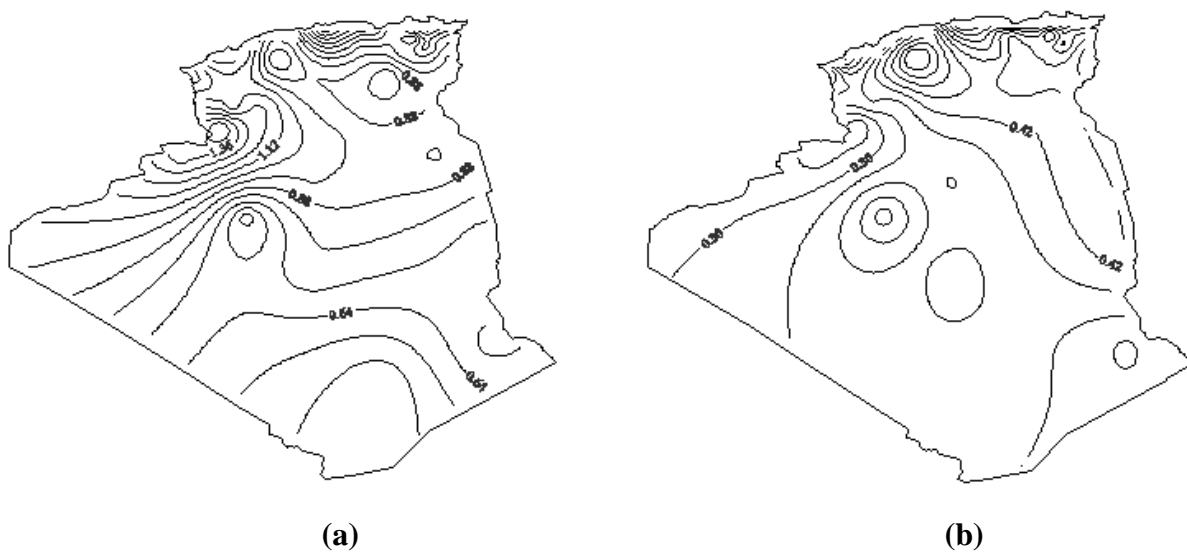


Janvier

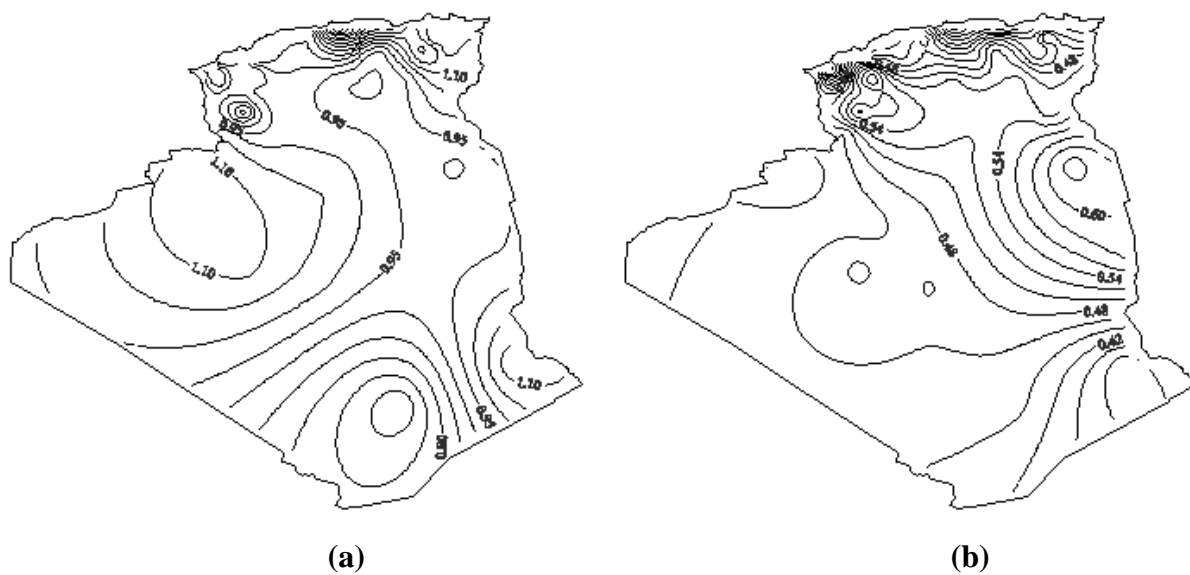


Avril

Fig. 3-11. Iso-valeurs des coefficients (a) et (b) de la distribution de Laplace-Gauss (suite).

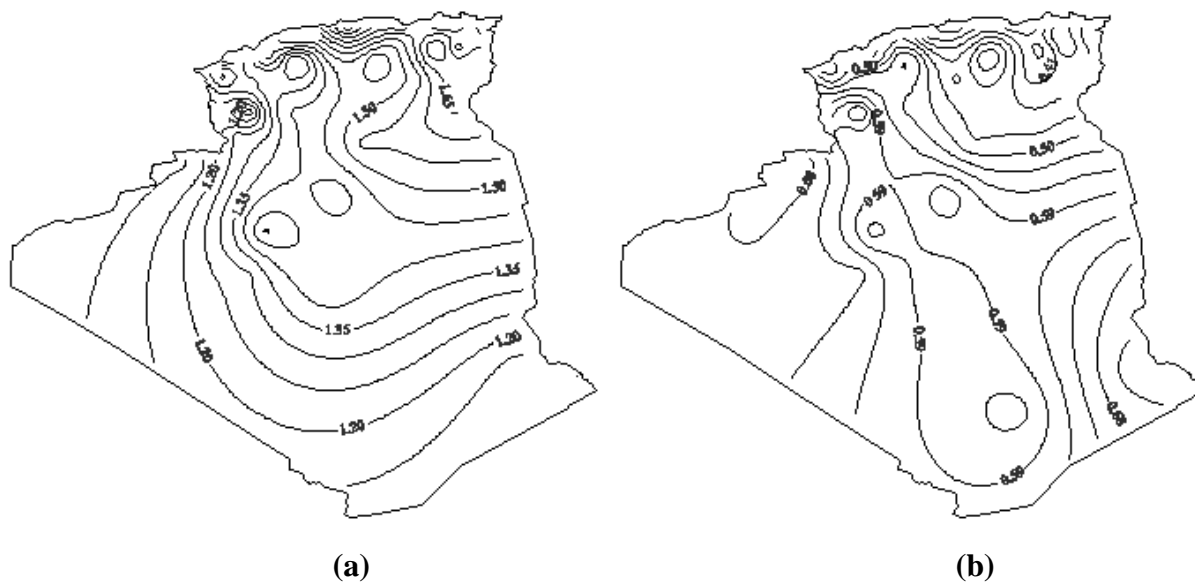


Juillet



Octobre

Fig. 3-11. Iso-valeurs des coefficients (a) et (b) de la distribution de Laplace-Gauss (suite).



saison chaude

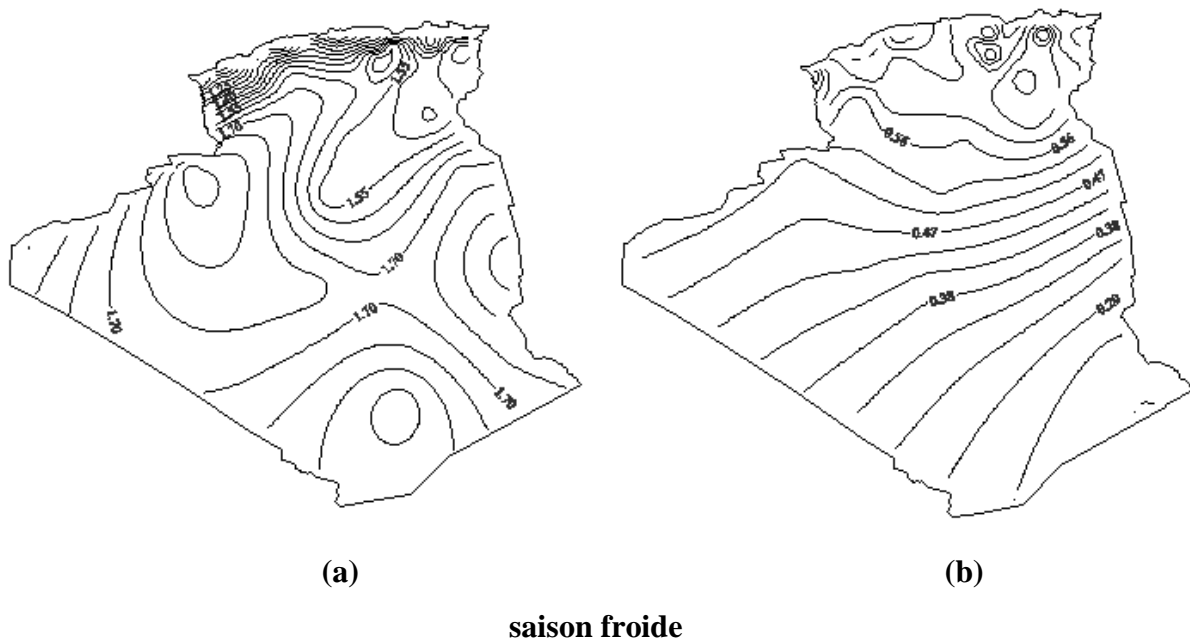


Fig. 3-11. Iso-valeurs des coefficients (a) et (b) de la distribution de Laplace-Gauss.

3.6 Discussion

L'étude des tendances saisonnière et cyclique associée à la cartographie des paramètres de la distribution de Laplace-Gauss que nous venons d'établir, constitue un résultat important dans la simulation des données de température atmosphérique en un endroit donné.

Cette cartographie est indispensable pour résoudre certains problèmes traitant des échanges thermiques dans l'environnement terrestre. En particulier, nos résultats sont applicables dans le domaine de la conversion d'énergie héliothermique. Ils peuvent, notamment, être utilement exploités pour évaluer les surfaces des capteurs plan.

Comme l'Algérie est actuellement confrontée à une situation contraignante relative à la remontée du désert, nous nous sommes intéressés tout particulièrement à l'évolution de la température dans une région semi-aride et à l'effet des vents de sable. Une telle préoccupation fera l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 4

4. Analyse des phénomènes météorologiques en zones semi-arides

Ce chapitre est une analyse des conditions météorologiques en zones semi-arides. Cette étude est faite dans le cadre de l'aménagement du territoire. Elle concerne les zones semi-arides, car ces régions sont appelées à se développer dans un avenir proche. De cette application, il ressort des possibilités d'une économie énergétique pour l'habitat de ces zones surtout en matière de climatisation. Un exemple d'un passage de vent de sable et son effet polluant sont également vus.

4.1 Données expérimentales

Au cours de ces dernières décennies, une montée du désert importante a été observée en Algérie, surtout dans les régions steppiques. Or, ces dernières connaissent, depuis quelques années, un essor socio-économique justifiant une étude systématique du climat et plus particulièrement, celle des vents de sable avec leurs conséquences sur l'ensemble des activités dans de telles régions.

Dans les zones semi-arides, la température varie considérablement. Par conséquent, ces zones sont le siège de grands écarts thermiques [Dubief, 1951, 1952; Bagnold, 1954; UNCOD, 1977; Sheridan, 1981; Baker, 1982; Hellden, 1988; Warren et Agnew, 1988; Legget, 1998; Sayigh, 1998].

Pour une meilleure connaissance du comportement thermique dans de telles régions, nous avons mené une étude statistique descriptive portant sur des mesures de température et celles de quelques paramètres météorologiques collectés dans des régions semi-arides. Comme ces écarts de température impliquent l'utilisation de la climatisation et du chauffage, une étude a été menée dans ce sens.

Une station automatique de collectes de données météorologiques destinée à la caractérisation des zones semi-arides, a été installée dans une zone steppique des Hauts Plateaux, limitée au Nord et au Sud par les chaînes montagneuses des deux Atlas. De façon plus précise, cette station se situe dans la localité de Benahar qui fait partie de la commune d'Ain Oussera (Wilaya de Djelfa) et qui se trouve à 8 km au sud de Birine, sur un terrain plat, très dégradé où la fraction sableuse du sol est dominante suite à l'existence du couloir venté. La région considérée est classée parmi les zones semi-arides car dans cette région, le taux de précipitations est compris entre 100 et 250mm [Douguedroit, 1987].

Cette station automatique est équipée de divers capteurs météorologiques. La mesure de température a été effectuée à l'aide d'une sonde de platine dont la résistance est de 100 ohms. Cette sonde a été placée dans un abri miniature. La gamme de mesure va de - 40 à + 60°C, avec une résolution de 0,1°C. La station automatique collecte toutes les dix minutes la valeur maximum de la température, sa valeur minimum et sa valeur moyenne. La moyenne de chaque mesure instantanée est effectuée toutes les 10 mn, et la donnée correspondante est archivée chaque heure.

Le même type de mesures a été effectué à la station météorologique d'Oued Tlilat. Cette localité est située dans une plaine, à l'est d'Oran, à environ 40 km. Le climat d'Oued Tlilat est

tempéré et humide car il subit l'influence de la mer Méditerranée. Elle est donc située dans une région non aride.

Pour les deux sites d'observation ainsi considérés, les mesures de température ont duré une année. Elles ont débuté le premier Avril 1999 et se sont achevées le premier Avril 2000.

4.2 Température en zone semi-aride

Dans ce paragraphe, nous effectuons une analyse statistique des données de température enregistrée à Benharar. Cette analyse consiste, d'une part, à étudier l'évolution des moyennes horaires de ces données et à établir leurs distributions de fréquences [Youcef Ettoumi et Messen, 2000 a].

Comme nous l'avons fait pour l'insolation et la température, notre base de données brutes a été répartie en douze sous-ensembles mensuels.

La température de l'air, mesurée en dixièmes de degré Celsius, apparaît comme une variable dont les valeurs forment une série de mesures discrètes se succédant de dixièmes en dixièmes de degré. Par exemple, une mesure égale à 10,3°C, comprend toutes les observations dont la température est comprise entre 10,25 et 10,35°C.

4.2.1 Moyenne horaire de température

Pour chacun des douze mois de l'année, nous avons calculé la moyenne des données de températures collectées à la même heure pour chacun des jours du mois considéré. Les moyennes horaires de température ainsi obtenues, permettent de suivre l'évolution de la température à l'échelle de la journée.

Les courbes de la Fig. 4-1 ont globalement la même allure. Elles montrent que les variations horaires de température sont maximum au cours de l'après-midi pour l'ensemble des saisons et elles sont minimum en été vers 4 h du matin, en hiver vers 5,30 h du matin, en automne vers 5 h du matin et au printemps vers 4 h du matin. Ces quatre réseaux de courbes illustrent très bien l'importance des écarts thermiques dans les zones semi-arides.

4.2.2 Distribution des fréquences relatives

En pratique, pour construire les distributions des fréquences de température, il est plus commode de répartir les données en classes de nombre inférieur à 25 et d'étendue judicieusement choisie.

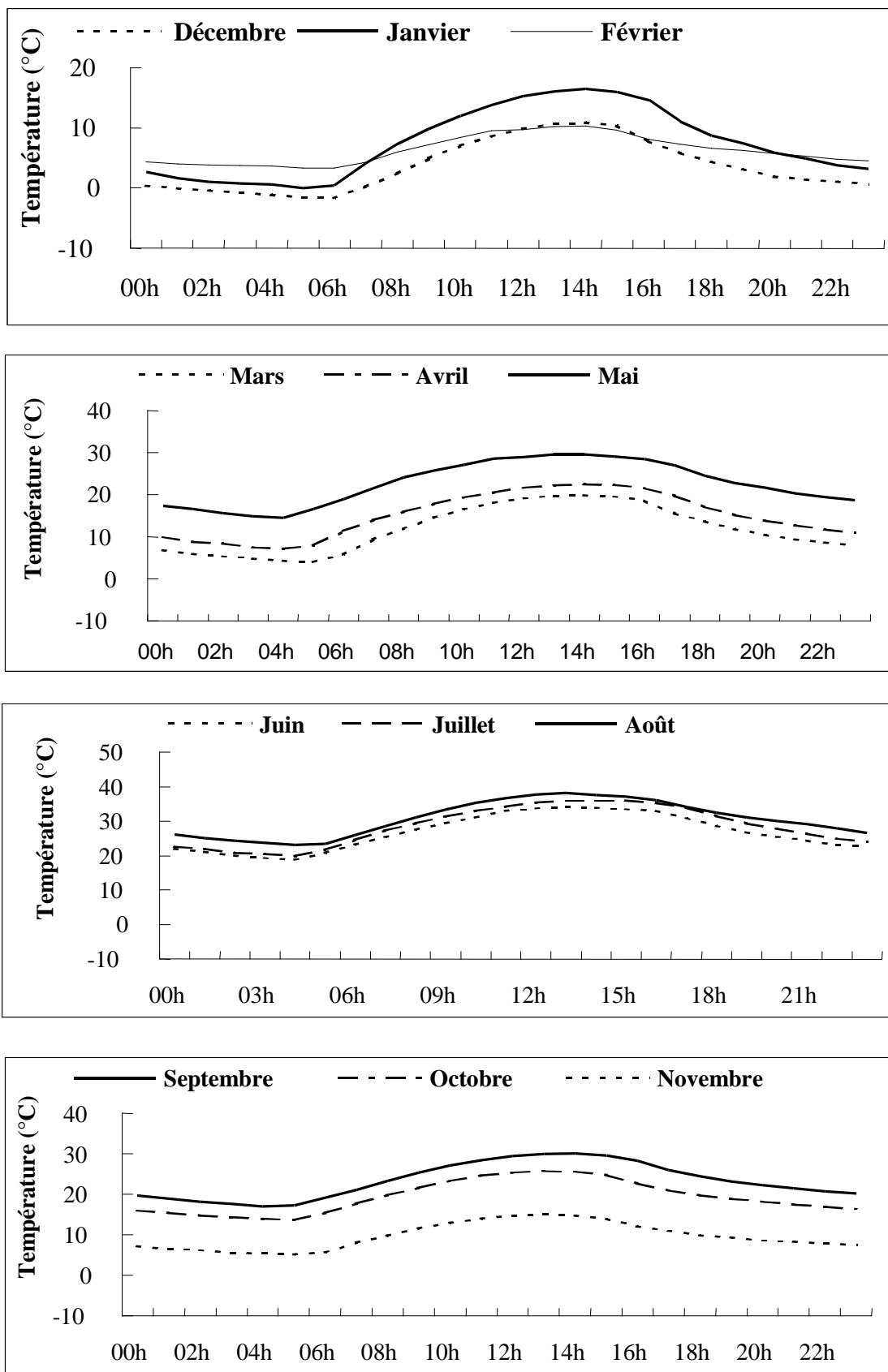


Fig. 4-1. Température moyenne horaire obtenue pour les différentes saisons à Benahar.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Au cours de l'année, la température dans la région de Djelfa varie entre -5°C et 44°C . Pour chaque sous-ensemble de données, nous avons divisé cet intervalle en onze classes d'étendue égale à 5°C . Puis, nous avons trié les relevés horaires en fonction de ces classes, pour en déduire la fréquence relative. La Fig. 4-2 donne les histogrammes de température obtenus pour Benahar et pour chacun des douze mois de l'année.

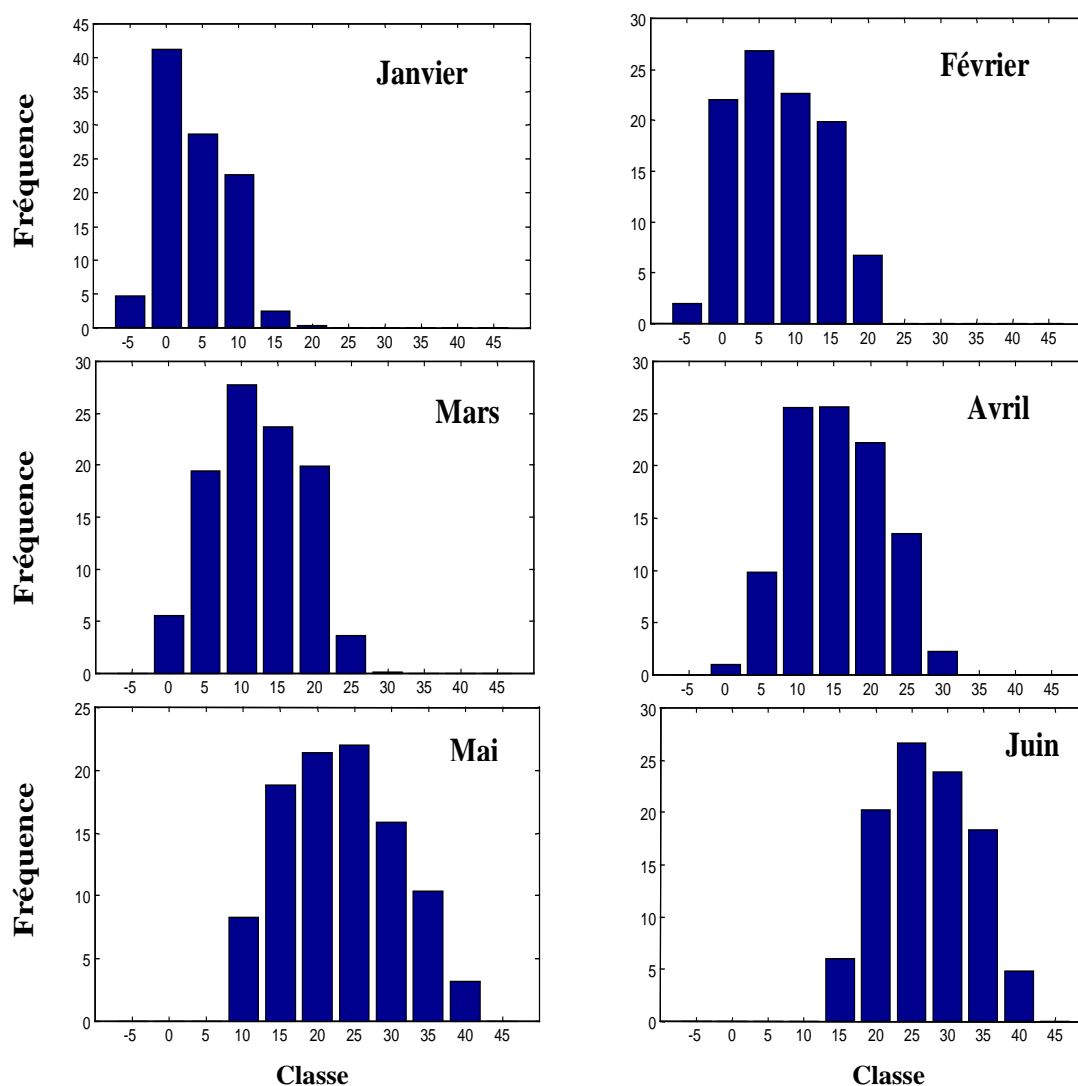


Fig 4-2. Fréquences relatives (%) de température obtenues à Benahar (suite).

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

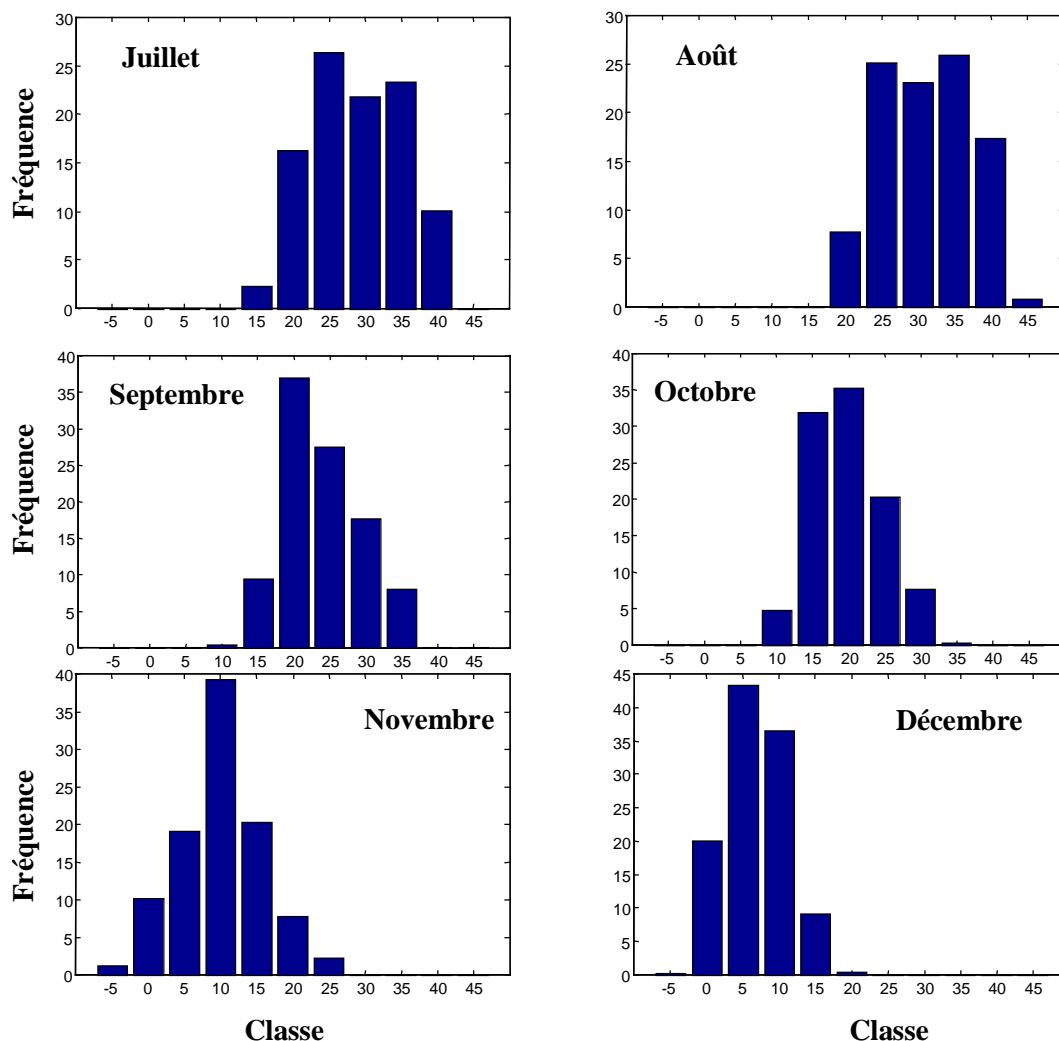


Fig 4-2. Fréquences relatives (%) de température obtenues à Benahar .

D'après ces histogrammes, les fréquences relatives obtenues aux basses températures, sont élevées, en hiver. Ainsi, la fréquence caractérisant la classe de 0°C, est de 45% pour le mois de Janvier. Pour le mois de Février, elle vaut 28% pour la classe de 5°C. En été, nous remarquons que les valeurs des fréquences relatives sont importantes aux températures allant de 20 à 30°C. Pour le printemps et l'automne, les plages de température les plus fréquentes se situent entre 10 et 25°C.

Les courbes de la Fig. 4-1 montrent que la température demeure inférieure à un certain seuil pendant un intervalle de temps déterminé. Ainsi, la température est inférieure à 15°C entre 0 et 11 heures, en moyenne par jour, pour le mois d'Avril. Par contre, quand on examine l'histogramme établi pour le mois d'Avril (voir Fig. 4-2), on trouve que les températures restent inférieures à 15°C dans 62 % des cas et que le temps mis pour observer ces températures, vaut 15 heures, au total. Cette différence de résultats s'explique par la

variabilité du processus thermique qui est masquée lorsque les températures sont représentées par des moyennes. Aussi, pour éviter les erreurs d'interprétation, nous préférons représenter les données de température caractérisant une région semi- aride, par des distributions de fréquences cumulées, plutôt que de calculer les moyennes habituelles. En effet, l'incertitude commise sur le temps d'observation, est de 4 h et cette erreur est loin d'être négligeable lorsque nous voulons développer des applications sur le chauffage.

4.2.3 Diagrammes des fréquences cumulées

Les Tables 4-1 et 4-2 donnent les valeurs des centres de classe, des fréquences cumulées dans le sens croissant et des fréquences cumulées dans le sens inverse. Toutes ces valeurs ont été employées pour tracer les courbes de la Fig. 4-3. Ces courbes permettent de mettre en évidence les phénomènes de seuils et de non-linéarité.

Centre des classes	Janvier		Février		Mars		Avril		Mai		Juin	
	cum	inv	Cum	Inv	cum	Inv	cum	Inv	cum	inv	cum	inv
-5	4,8	100	1,5	100	5,5	100	0	0	0	0	0	0
0	47,8	95,2	24	98,5	24,5	94,5	1	100	0	0	0	0
5	75,8	52,2	57	76	52,5	75,5	11	99	0	0	0	0
10	97,8	24,2	74	49	76,5	47,5	36,5	89	8	100	0	0
15	100	2,2	94	26	96,5	23,5	62	63,5	26	92	5,5	100
20			100	6	100	3,5	85	38	47,5	74	25,5	94,5
25							98	15	70	52,5	52,5	74,5
30							100	2	86	30	76,5	47,5
35									96	14	95,5	23,5
40									100	4	100	4,5
45												

Table 4-1. Fréquences cumulées relatives (en %) pour les six premiers mois de l'année (cum : fréquences dans le sens croissant, inv : fréquences dans le sens décroissant).

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Centre des classes	Juillet		Août		Sept		Oct		Nov		Dec	
	cum	inv	cum	Inv	cum	Inv	cum	Inv	cum	inv	cum	Inv
-5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	100	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	99	18	100
5	0	0	0	0	0	0	0	0	31	89	60	82
10	0	0	0	0	0,25	100	5	100	70	69	94	40
15	2	100	0	0	10,3	99,8	38,5	95	90,5	30	100	5
20	18	98	7	100	47,8	89,8	74	61,5	98	9,5		
25	44	82	32,5	93	75,6	52,3	94	26	100	2		
30	66,5	56	56,5	67,5	93,3	24,3	100	6				
35	90	33,5	83	43,5	100	63,8						
40	100	10	99,5	17								
45			100	0,5								

Table 4-2. Fréquences cumulées relatives (en %) pour les six derniers mois de l'année (cum : fréquences dans le sens croissant, inv : fréquences dans le sens décroissant).

D'après les courbes de la Fig. 4-3, les mois de Janvier, de Février, de Mars, de Novembre et de Décembre comportent des températures inférieures à 0°C, donnant lieu au dépôt glacé qu'est la gelée, par un processus de sublimation inverse de la vapeur d'eau. Pour les mois de Janvier, de Février et de Mars, la fréquence cumulée dans le sens croissant, est comprise entre 53 et 76%. Pour des températures supérieures à 25°C, la fréquence cumulée dans le sens décroissant, vaut respectivement 52,5 , 74,5 , 82 , 93 et 52,3 % pour les mois de Mai, de Juin, de Juillet, d'Août et de Septembre. Durant les mois de Juin, de Juillet et d'Août, la température moyenne dépasse 30°C pendant la journée. Ceci correspond à une forte évaporation dont le rôle est important dans le processus de désertification.

Ces résultats indiquent que la climatisation est de mise dans une telle région, pour la période allant de Mai à Septembre. D'après les courbes des fréquences cumulées, la température est toujours inférieure à 15°C en Décembre et en Janvier. Pour $T < 15^{\circ}\text{C}$, la fréquence relative cumulée dans le sens croissant, dépasse les 90% en Octobre, en Février et en Mars et elle est de 62% pour le mois d'Avril. Pour tous ces mois, l'emploi du chauffage est exigé. Les Tables 4-1 et 4-2 mettent en évidence une inversion totale du cycle climatique quand on passe du mois d'Octobre au mois de Novembre.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

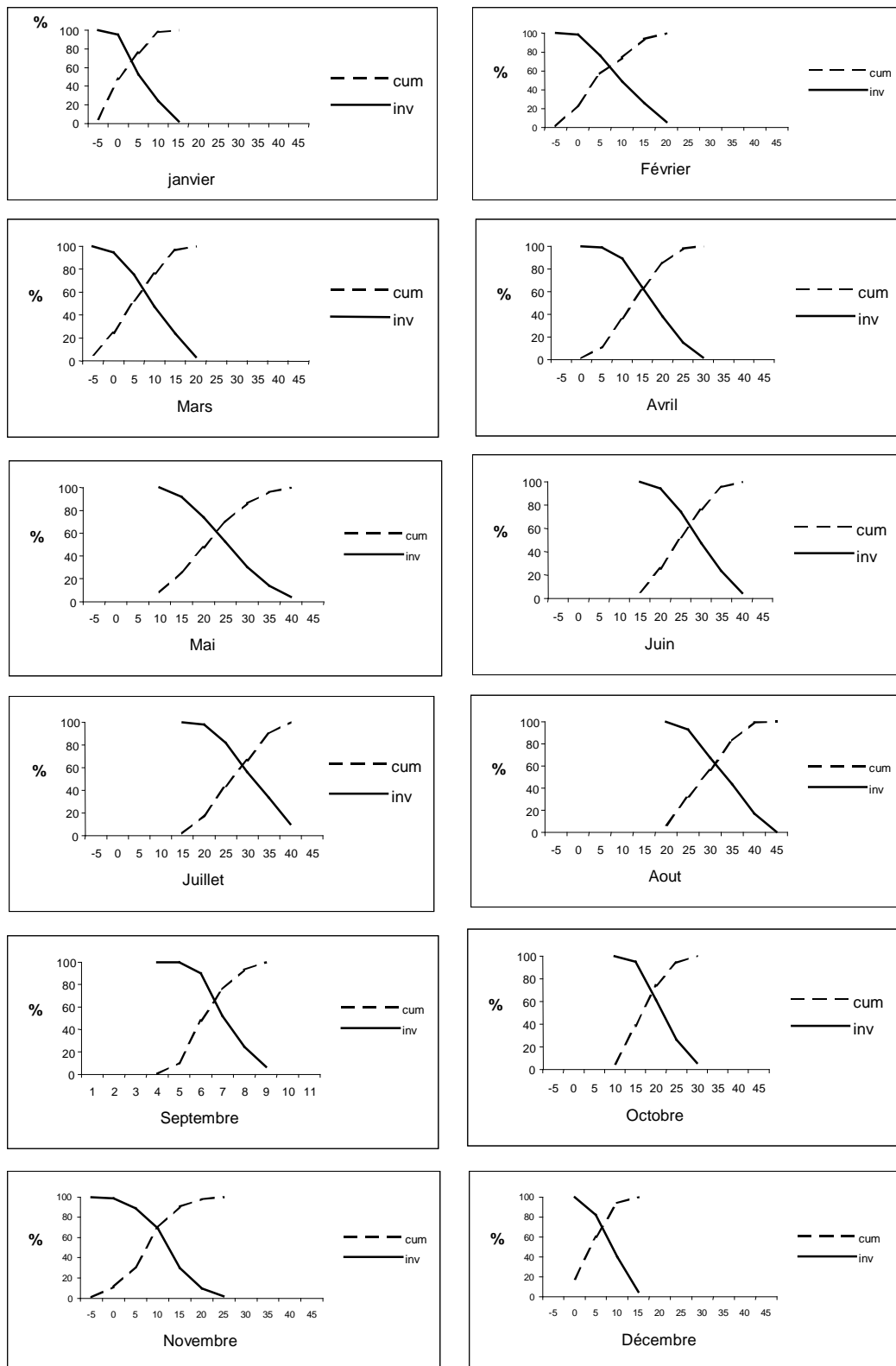


Fig. 4-3. Diagrammes des fréquences cumulées de température pour Benahar.

Tous les résultats que nous venons de présenter, montrent que les écarts thermiques jouent un rôle très important dans les zones semi-arides et nécessitent une analyse approfondie. Celle-ci sera effectuée dans le prochain paragraphe.

4.3 Analyse des écarts thermiques en zone semi-aride

Les zones semi-arides sont caractérisées par des hivers rudes et des étés très chauds. Entre autres, la température varie considérablement entre le jour et la nuit. Dans ces conditions, les habitations de ces régions sont, le plus souvent, soumises à d'importants écarts de température. Elles nécessitent alors une isolation thermique capable d'assurer un certain confort pour les personnes qui y vivent. La notion de confort dépend de plusieurs facteurs, dont la température, le degré hygrométrique et le vent [Sayigh et Marafia, 1998 a; Butera, 1998]. Elle est aussi tributaire de la température ambiante, de l'apport énergétique dû au rayonnement solaire, de l'environnement terrestre et de l'effet vestimentaire [Eckholm, 1976, Edinger et Kaul, 2000; Serra, 1998].

Dans la présente étude, nous nous intéressons uniquement à l'effet de la température de l'air sur l'habitat car ce paramètre est déterminant dans le calcul des systèmes de climatisation. Ceci revient à définir des températures de confort en fonction des saisons. Les écarts thermiques mesurés par rapport à de telles températures, jouent un rôle important dans la conception même des habitations. En effet, connaissant de tels écarts, il est possible de calculer la quantité d'énergie nécessaire au chauffage d'une construction pendant les périodes de mauvais temps et à la production d'air frais en période de chaleur. A partir des écarts thermiques ainsi définis, on peut aussi connaître les périodes de climatisation et de chauffage de l'habitat pour une région donnée [Youcef Ettoumi et Messen, 2000 b].

Dans les prochains paragraphes, nous procéderons au traitement de données horaires de température collectées par les deux stations d'acquisition de données météorologiques situées respectivement dans une zone semi-aride et une zone côtière, à savoir la région de Djelfa et l'Oranais. Ce traitement qui est basé sur une analyse des écarts thermiques à différentes échelles de temps, fera l'objet d'une application à l'isolation thermique d'une habitation.

En vue d'apprécier les différences climatiques entre une zone semi-aride et une région côtière, les variations de température observées dans les localités de Benahar (Djelfa) et Oued Tlilat (Oran), seront comparées.

4.3.1 Méthodologie

En général, la température de confort est la température à laquelle l'être humain se développe et vit de manière aussi harmonieuse que possible [Gallo, 1998; Awbi, 1998]. Le climat prévalant en zones semi-arides comporte deux saisons, à savoir l'hiver et l'été. Après enquête sur le bien-être des populations, nous avons fixé la température de confort à 18°C en hiver et 25°C en été. Sur la base de ces définitions empiriques, considérons l'ensemble des écarts instantanés de température obtenus relativement à l'une des deux température de confort, pour une localité et une période données. Puis, totalisons tous ces écarts heure par heure. La quantité DH qui résulte du cumul de ces écarts, est alors exprimée en degré heure (le degré heure est la somme des écarts instantanés de température effectuée sur un laps de temps d'une heure et valant un degré Celsius). Soit $T(i,j)$, la moyenne horaire de la température ambiante mesurée à l'heure (i) du jour (j) pour un mois donné composé de n jours (avec $j = 1 ; \dots ; n$). Si $T(i,j)$ est inférieure à 18°C, il faudrait chauffer les habitations de la région. Dans ce cas, on compte les heures de chauffage nécessaires par mois ($\sum_{\text{heat}} H$) chaque fois qu'on a $T(i,j) < 18^\circ\text{C}$. En période de chauffage la somme des écarts de température est :

$$\sum_{\text{heat}} DH = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{24} [18 - T(i, j)] K_{18}(T(i, j)) \quad (4-1)$$

Dans cette expression, le décompte des heures de chauffage est assuré par une fonction coût qui est, par définition :

$$K_{18}(T(i,j)) = 1 \text{ si } T(i,j) < 18^\circ\text{C}, \quad (4-2a)$$

$$K_{18}(T(i,j)) = 0 \text{ si } T(i,j) \geq 18^\circ\text{C}. \quad (4-2b)$$

$$\text{D'où : } \sum_{\text{heat}} H = \sum_{\text{heat}} K_{18}(T(i, j)). \quad (4-3)$$

La quantité DH_{ch} ainsi calculée en degré heures pour chaque mois de l'année, permet d'évaluer les besoins en chauffage pour une habitation située dans une région semi-aride. De façon similaire, lorsqu'il fait chaud, il faudrait rafraîchir les habitations en procédant à une climatisation de celles-ci. Dans ce cas, la somme des écarts de température caractérisant la quantité de chaleur qu'il faudrait évacuer d'une habitation au cours d'un mois, est :

$$\sum_{\text{cool}} DH = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^{24} [T(i, j) - 25] K_{25}(T(i, j)) \quad (4-4)$$

Nous procédons de manière similaire que précédemment, la fonction coût est définie comme étant :

$$K_{25}(T(i,j)) = 1 \text{ si } T(i,j) > 25^{\circ}\text{C}, \quad (4-5a)$$

$$K_{25}(T(i,j)) = 0 \text{ si } T(i,j) \leq 25^{\circ}\text{C}. \quad (4-5b)$$

Au cours d'un mois, le cumul des heures de climatisation, vaut:

$$\sum_{\text{cool}} H = \sum_{\text{cool}} K_{25}(T(i, j)). \quad (4-6)$$

Cette approche rapide de quantification des besoins énergétiques d'une habitation en zones semi-arides, devient possible grâce à des campagnes de mesures effectuées à cette usage dans de telles régions. En Algérie, les normes actuellement adoptées dans la construction, sont identiques que l'habitation soit au nord ou sur les hauts plateaux. Dans les régions du Sud de l'Algérie, les habitations sont empiriquement aménagées et comprennent deux centres de vie, l'un en été et l'autre en hiver. Cette façon d'organiser une maison a pour but d'atteindre une meilleure adaptation climatique et surtout de pallier les grandes chaleurs. Sinon dans le reste du pays, seuls des concepts tels que l'orientation pour l'ensoleillement, l'importance des ouvertures, l'organisation pour un meilleur cheminement de l'air sont pris en compte dans les constructions. Pour assurer une bonne isolation thermique, on fait appel à la notion d'inertie thermique. L'inertie thermique d'un local est un terme conventionnel permettant une approche simplifiée de phénomènes que les calculs usuels en régime discontinu, ne permettent pas d'aborder. Quatre classes d'inertie thermique peuvent alors être définies. Ce sont :

L'inertie très faible qui serait celle d'une "baraque" ou d'un abri léger.

L'inertie faible pour les locaux où ni les parois horizontales ni les parois verticales ne sont assez lourdes pour que leur masse thermique joue un rôle important.

L'inertie moyenne pour les locaux où des parois ou des planchers lourds existent.

L'inertie forte où l'on rencontre simultanément la présence de deux planchers lourds, de murs lourds et l'absence d'isolation thermique intérieure empêchant la mobilité des masses thermiques.

Dans le cas de la région de Djelfa, il faudrait construire selon une forte inertie pour faire face à un écart thermique important. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés à l'écart thermique journalier $\Delta T_{\text{Max}}(j)$, calculé au moyen des données relatives aux températures quotidiennes minimales $T_{\text{Min}}(j)$ et maximales $T_{\text{Max}}(j)$. Cet écart est défini comme étant :

$$\Delta T_{\text{Max}}(j) = T_{\text{Max}}(j) - T_{\text{Min}}(j) \quad (4-7)$$

avec $j = 1 ; \dots ; n$.

L'écart $\Delta T_{\text{Max}}(j)$ a été estimé pour chaque jour et pour tous les mois de l'année. Nous avons aussi considéré d'autres paramètres. Ce sont les extrêmes mensuels, les extrêmes annuels et l'écart maximum des extrêmes annuels. Les extrêmes mensuels $\Delta T_{\text{Max}}(m)$, $\Delta T_{\text{Min}}(m)$ sont respectivement, par définition, le maximum et le minimum de l'écart thermique obtenu pour le mois (m). Il s'écrit:

$$\Delta T_{\text{Max}}(m) = \text{Max}\{T_{\text{Max}}(j) - T_{\text{Min}}(j)\}, \Delta T_{\text{Min}}(m) = \text{Min}\{T_{\text{Max}}(j) - T_{\text{Min}}(j)\}. \quad (4-8)$$

avec $m = 1 ; \dots ; 12$.

Dans cette expression, (j) est le jour du mois (m) où l'écart thermique est maximum. Les extrêmes annuels sont ΔT_{Max} et ΔT_{Min} . Pour m variant de 1 à 12, ils s'écrivent respectivement:

$$\Delta T_{\text{Max}} = \text{Max}\{ \Delta T_{\text{Max}}(m) \} \quad (4-9)$$

et

$$\Delta T_{\text{Min}} = \text{Min}\{ \Delta T_{\text{Min}}(m) \} \quad (4-10)$$

L'écart maximum des extrêmes annuels est :

$$\Delta T = \Delta T_{\text{Max}} - \Delta T_{\text{Min}} \quad (4-11)$$

4.3.2 Résultats

Les diagrammes de la Fig 4-4 montrent que le chauffage est nécessaire pour la localité de Benahar (région de Djelfa) presque constamment pendant les mois de Janvier et de Décembre, avec un nombre de degré heures dépassant 10000 et 9000 respectivement. ils mettent en évidence également que, le nombre de degré heures de chauffage est quasiment négligeable pour les mois de Juin, Juillet, Août et Septembre. Pour les mois de Mai et d'Octobre, il demeure faible car il se situe autour de 840 degré heures. Par contre, comme l'indiquent les diagrammes de la Fig. 4-5, la climatisation est inutile pendant les mois de Janvier, de Février, de Mars, d'Octobre, de Novembre et de Décembre. En particulier, les mois de Septembre et de Mai nécessitent respectivement entre 1200 et 1700 degré heures de climatisation. Le coût de la climatisation ainsi que celui du chauffage est élevé. Aussi, pour les réduire, les résultats donnés par les Fig. 4-4 et 4-5, doivent être pris en compte en les faisant intervenir dans l'architecture même d'une habitation lors de sa construction dans la région de Djelfa. Tout ceci implique notamment un choix adapté des matériaux, une orientation convenable de l'habitation, une circulation de l'air. Le problème est d'autant plus difficile à résoudre, qu'il nécessite la recherche d'un bon compromis entre le chauffage et la climatisation à utiliser pour l'habitation considérée.

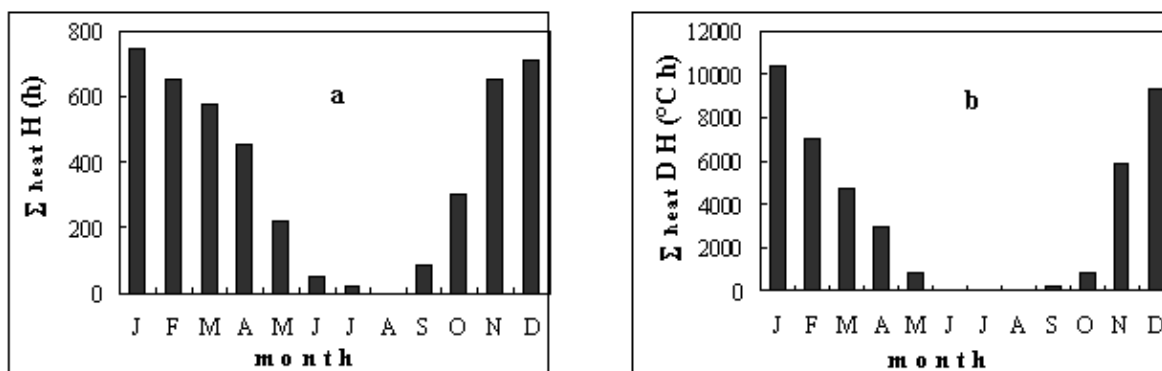


Fig. 4-4. (a) Nombre de degré de chauffage ($\Sigma_{\text{heat}} H$) et (b) Nombre de degré heure de chauffage par rapport à 18°C ($\Sigma_{\text{heat}} DH$) à Benahar (région de Djelfa).

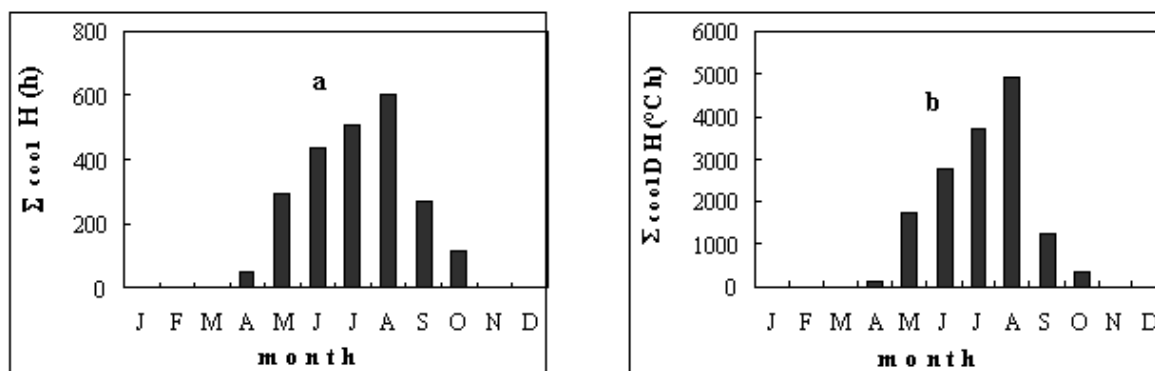


Fig. 4-5. (a) Nombre d'heures de climatisation ($\Sigma_{\text{cool}} H$) et (b) Nombre de degré heure de climatisation par rapport à 25°C ($\Sigma_{\text{cool}} DH$) à Benahar (région de Djelfa).

Afin de minimiser les besoins énergétiques en climatisation et en chauffage ainsi exprimés, ce calcul doit être complété par l'évaluation d'un indicateur de la construction pour une forte inertie, basé lui-même sur le calcul d'extrêmes thermiques annuels [Coch, 1998; Elkadi, 2000; Muneer *et al*, 2001].

A l'issue de cette analyse, une estimation des heures et des degré heures aussi bien de la climatisation que du chauffage a été faite mensuellement. Dans une telle région, on trouve qu'il faudrait un apport annuel de 42347 degré heures de chaleur pour réaliser 3688 heures de chauffage et une évacuation annuelle de 14833 degré heures pour obtenir 2283 heures de climatisation. L'ensemble des courbes des Fig. 4-6 montrent que l'écart thermique journalier obtenu pour chaque mois de l'année, varie notablement d'un mois à l'autre. A titre d'exemple, on peut noter que les minimums des écarts journaliers sont respectivement de 4 ; 6,6 ; 11,7 et 7,2 degré heures pour les mois de Décembre, d'Avril, de Juillet et d'Octobre.

Paradoxalement, la valeur la plus élevée de ces minimums a été enregistrée en été et la plus faible en hiver, les deux autres sont comparables.

L'isolation thermique occupe une cote part ne dépassant pas les 10% dans le coût de tout projet de construction. C'est pourquoi, ces aspects ne retiennent pas l'attention du promoteur immobilier et sont plutôt réservés aux constructions d'art. Or les soucis actuels, liés à la gestion de l'énergie tant sur le plan économique qu'environnemental, encourage la révision des modes de construction, avec la recherche d'une adaptation locale, en menant de concert une étude qui tienne compte des écarts thermiques et des caractéristiques des matériaux de construction. Pour une construction donnée, on s'intéresse donc à l'écart thermique maximum enregistré pour chaque mois, tel qu'indiqué par le diagramme de la Fig. 4-7. D'après ce diagramme, le maximum de l'extrême annuel est de 25,1°C et son minimum se situe à 18°C. L'écart ΔT qui, rappelons le, est la différence entre les deux extrêmes, est donc un bon indicateur de construction. Il est en effet très utile dans le calcul de l'architecture et de l'isolation thermique d'une habitation.

Pour la localité de Benahar, il vaut pratiquement 7,1°C. En guise de comparaison, nous avons également appliqué la méthodologie présentée dans la section 4.3.2, aux données de température collectées par la station de Oued Tlilat. Les principaux résultats sont présentés sous forme de diagrammes dans les Fig. 4-8, 4-9, 4-10 et 4-11. Ces résultats permettent de quantifier les besoins en climatisation et en chauffage de la région oranaise. Il nous a été permis de constater que le chauffage de l'habitat est nécessaire pendant la période allant du mois de Novembre au mois d'Avril, alors que pour les autres mois de l'année, la demande en degré heures de chauffage est très faible, voire inexistante.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

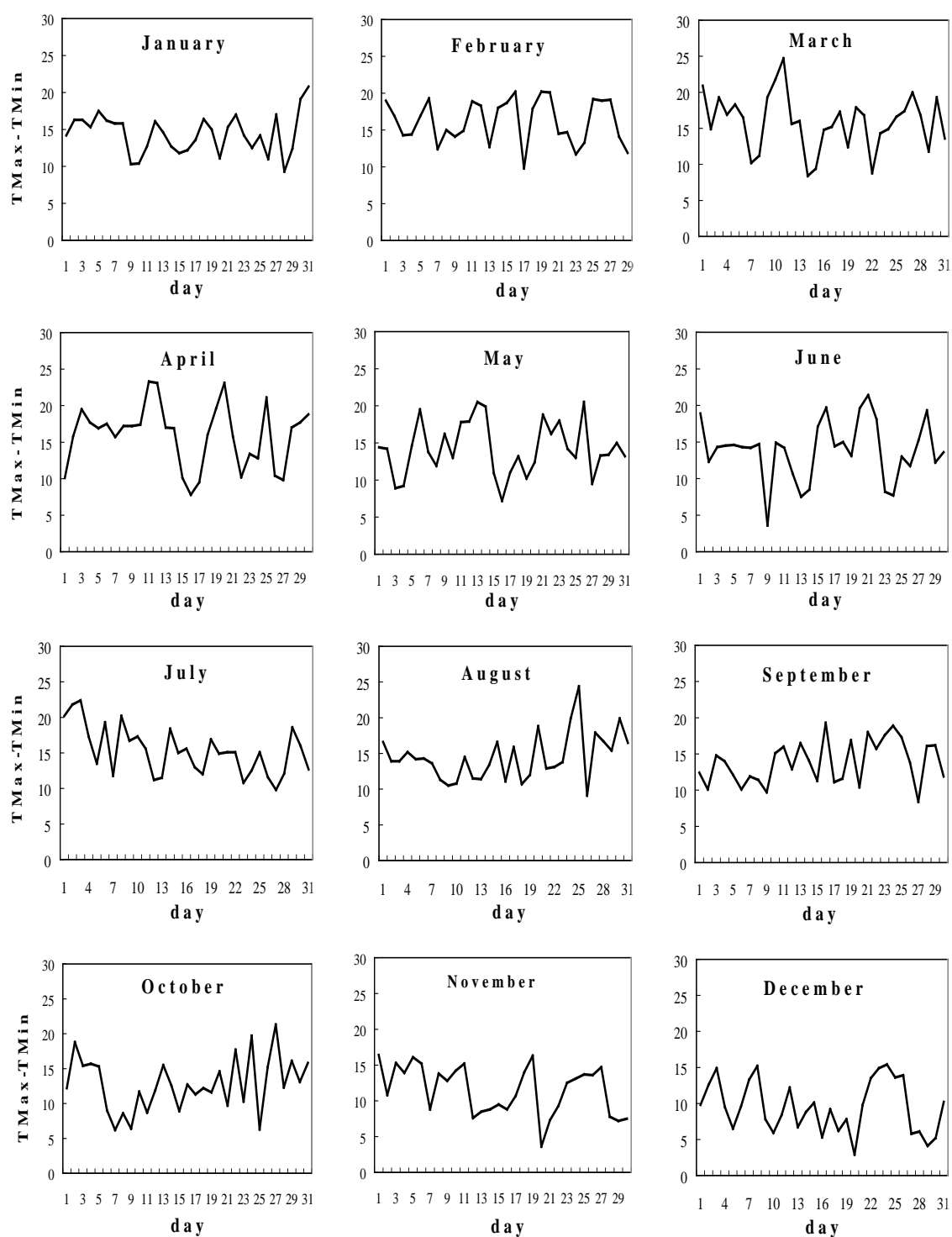


Fig. 4-6. Déviations journalières de température (°C) observées à Benahar (Djelfa) de Janvier à Décembre. (T_{Max} = température maximum et T_{Min} = température minimum).

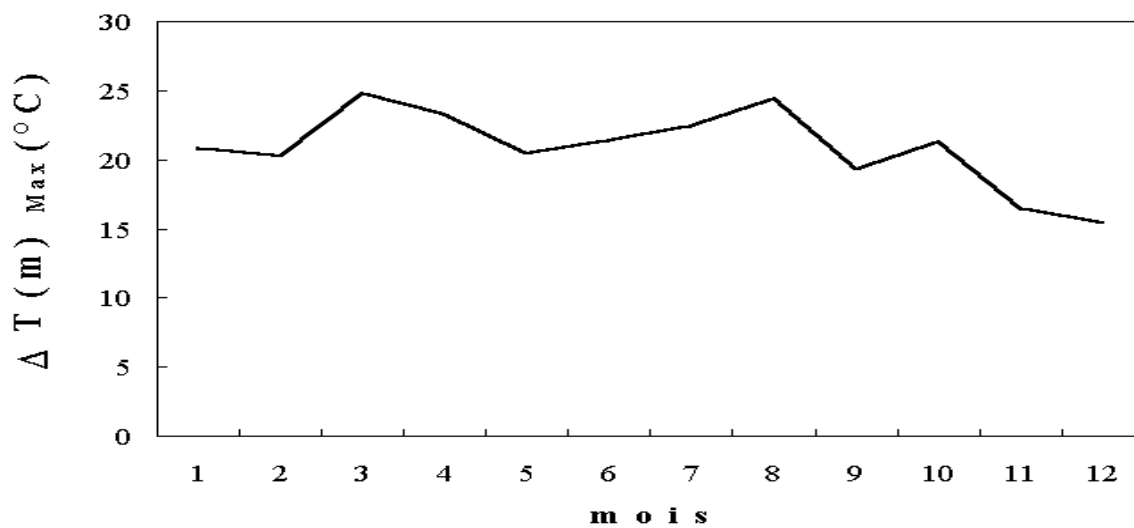


Fig 4-7. Amplitude maximum de la deviation mensuelle thermique observée à Benahar (Djelfa).

De la même manière, nous pouvons dire que du mois de Juin au mois de Septembre, l'emploi de la climatisation est, presque tout le temps, demandé pour refroidir les habitations. En effet, les besoins en chauffage pour la localité de Oued Tlilat représentent à 24378 degré heures au total repartis sur 3898 heures pendant l'année. Quant aux besoins en climatisation, ils reviennent à éliminer 9353 degré heures répartis sur 1978 heures au cours de l'année. Le comportement thermique de la plaine de Tlilat diffère complètement de celui de la région de Djelfa. Ainsi, la comparaison des écarts thermiques montre que l'écart maximum entre les extremums s'élève à 9,3°C pour Oued Tlilat alors qu'il est de seulement 7,1°C pour Benahar. Les besoins aussi bien en chauffage qu'en climatisation sont donc plus importants dans une région semi-aride. Ceci justifie l'approche adoptée dans cette analyse. En effet, la conception d'une isolation thermique basée uniquement sur l'écart extrême, peut conduire à des résultats erronés. Pour une construction en zone semi-aride, les écarts thermiques sont extrêmement importants à connaître car ils conditionnent le choix du type de matériau à utiliser. Du point de vue économique, un tel choix est réalisé en estimant le coût total de l'isolation thermique de cette construction tout en intégrant le coût de la facture énergétique.

Pour étayer cette étude, considérons cinq modes d'isolation thermique couramment utilisés dans la région de Djelfa et basés sur différents matériaux de construction, à savoir :

- Isolation 1 : Double paroi en briques creuses avec lame d'air
- Isolation 2 : Double paroi en briques creuses avec polystyrène
- Isolation 3 : Pierre bleue

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

- Isolation 4 : Pizzé&Taub (mélange de terre argileuse et de paille, séché au soleil)

- Isolation 5 : Double paroi en plâtre avec polystyrène

Ces types d'isolation ainsi présentée, ont été classés dans le sens croissant de leur résistance thermique. Puis, le coût total de chacun des modes d'isolation thermique et celui de la facture énergétique ont été calculés connaissant le type d'isolation thermique, le coût du m² bâti, la quantité d'énergie économisée par chacun des types d'isolation, les besoins en climatisation en zone semi-aride et le coût du kWh de climatisation et de chauffage. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur des résultats expérimentaux, des relevés de gradients de température et des coûts de construction qui nous ont été fournis par le Bureau d'Etudes Techniques (B.E.T.) de Médéa dont les activités ont lieu, le plus souvent, dans les régions semi-arides de l'Algérie.

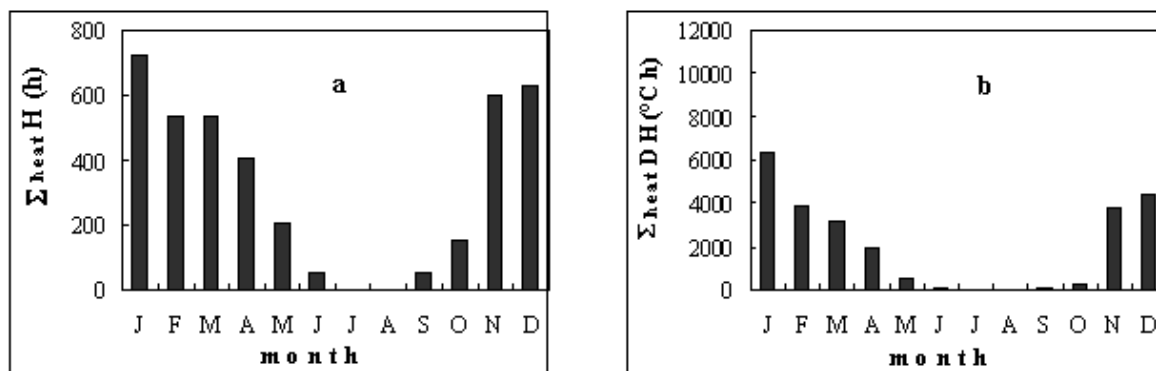


Fig. 4-8. (a) Nombre d'heures de chauffage ($\Sigma_{\text{heat}} H$) et (b) Nombre de degré heure de chauffage par rapport à 18°C ($\Sigma_{\text{heat}} DH$) à Oued Tlilat (Oran).

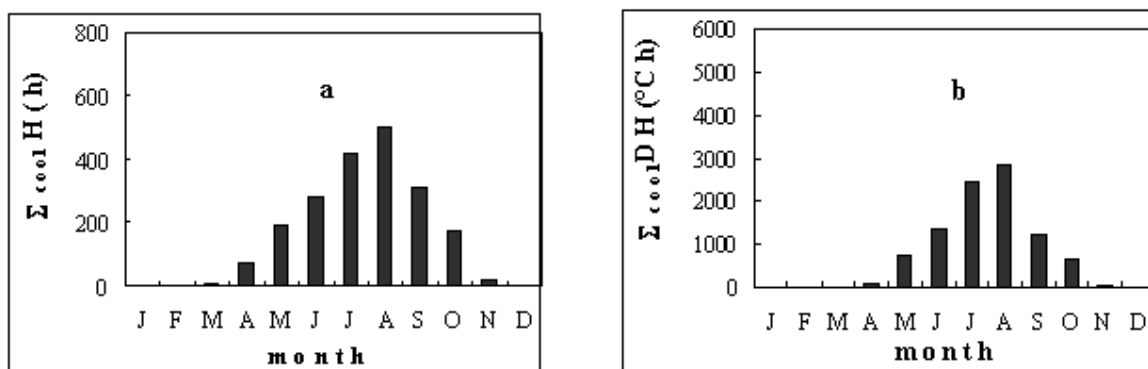


Fig. 4-9 (a) Nombre d'heures de climatisation ($\Sigma_{\text{cool}} H$) et (b) Nombre de degré heure de climatisation par rapport à 25°C ($\Sigma_{\text{cool}} DH$) à Oued Tlilat (Oran).

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

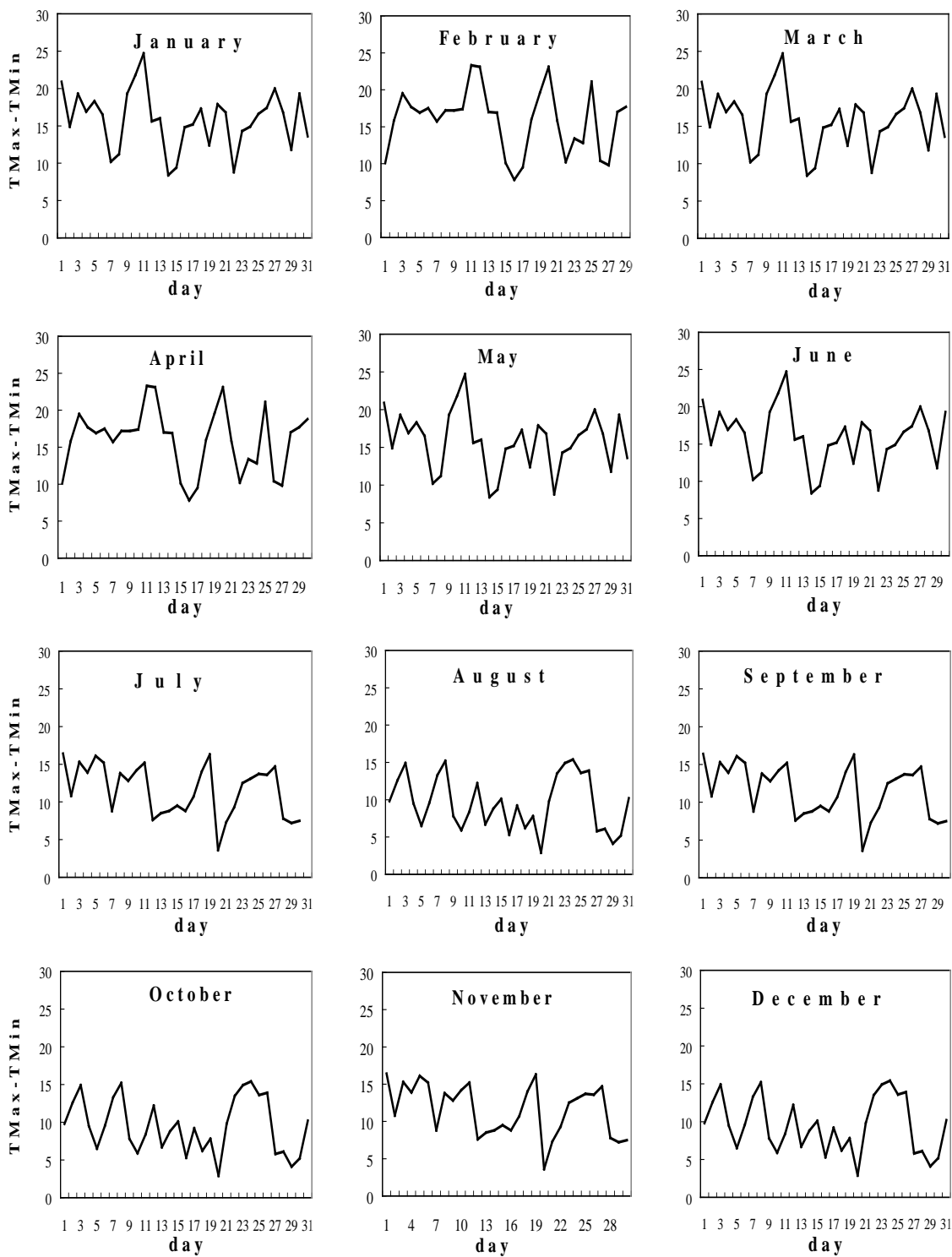


Fig. 4-10. Déviations journalière thermique (°C) observées à Oued Tlilat (Oran) de Janvier à Décembre. (T_{Max} = température maximum, T_{Min} = température minimum).

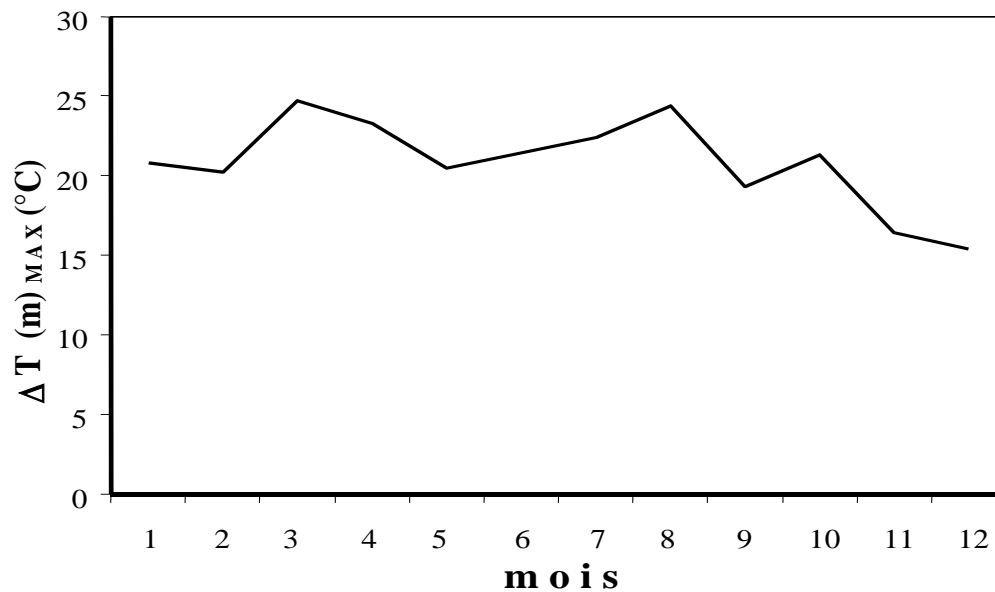


Fig. 4-11. Amplitude maximum de la deviation mensuelle thermique observée à Oued Tlilat (Oran).

L'essentiel des calculs est résumé par la Table 4-3. Par exemple, dans le cas de la climatisation, on peut admettre qu'un renouvellement d'air est suffisant lorsque son débit est de $10 \text{ m}^3/\text{heure}$ en moyenne. Comme la chaleur volumique de l'air vaut $0,34 \text{ W}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, la quantité de chaleur qu'il faut évacuer, est $d = 10 \times 0,34 \text{ W}/^\circ\text{C} \cdot \text{heure}$, soit $3,4 \text{ W}/^\circ\text{C}$ par heure. Pour une climatisation dans la région de Djelfa, la somme des écarts de température est $DH_{cl} = 14\ 833 \text{ degré heures}$ pendant une durée de 2283 heures. Par suite, les déperditions d'énergie seront de $d \times DH_{cl} = 50\ 432 \text{ W}$. Le diagramme de la Fig. 4-12 donne le coût de chacun des cinq types d'isolation considérés dans notre étude. Ce diagramme fait apparaître que l'isolation thermique réalisée avec du Pizzé&Taub est la moins chère alors que les propriétés d'isolation thermique de ce matériau sont très bonnes. Cependant, un sondage d'opinion effectué par le B.E.T. a fait ressortir une certaine réticence de la population à l'utilisation du Pizzé&Taub étant donné son caractère rudimentaire et son manque d'esthétique. Un autre matériau possède de bonnes propriétés d'isolation thermique. Il s'agit de la pierre. Cependant, la pierre nécessite des opérations de taille et de transport qui rendent ce matériau plus coûteux, donc peu utilisé. Par contre, le Pizzé&Taub a l'avantage d'être un produit local qui ne demande aucune armature pour la construction. Aussi, il serait très judicieux de chercher à l'embellir sans altérer ses qualités d'isolant, pour le rendre attrayant à l'utilisateur [Algifri *et al.*, 1992].

Type d'isolation	$\delta\tau$ (°C)	ΔW (Wh)	C_W (\$)	C_S (\$/m ²)	C_T (\$)
A. Double mur (brique + air)	0.1	48 103	1726	150	1876
B. Double mur (brique + polystyrène)	1	42 670	1500	200	1700
C. Pierre bleue	5	11 621	223	200	423
D. Pizze et Taub	7	0	0	125	125
E. Double mur (plâtre + polystyrène)	7	0	0	438	438

Table 4-3. Coût de l'isolation thermique en fonction du type de matériau de construction dans le cas d'une climatisation d'une habitation à Benahar ($\delta\tau$ = déviation thermique caractérisant l'isolation, ΔW = énergie évacuée par air conditionné = $50432 - 2283 \delta\tau$. C_W = coût de l'énergie, C_S = coût de la surface construite, C_T = coût total. C_W , C_S et C_T ont été calculés en sur la base de 1 \$ = 80 Dinars).

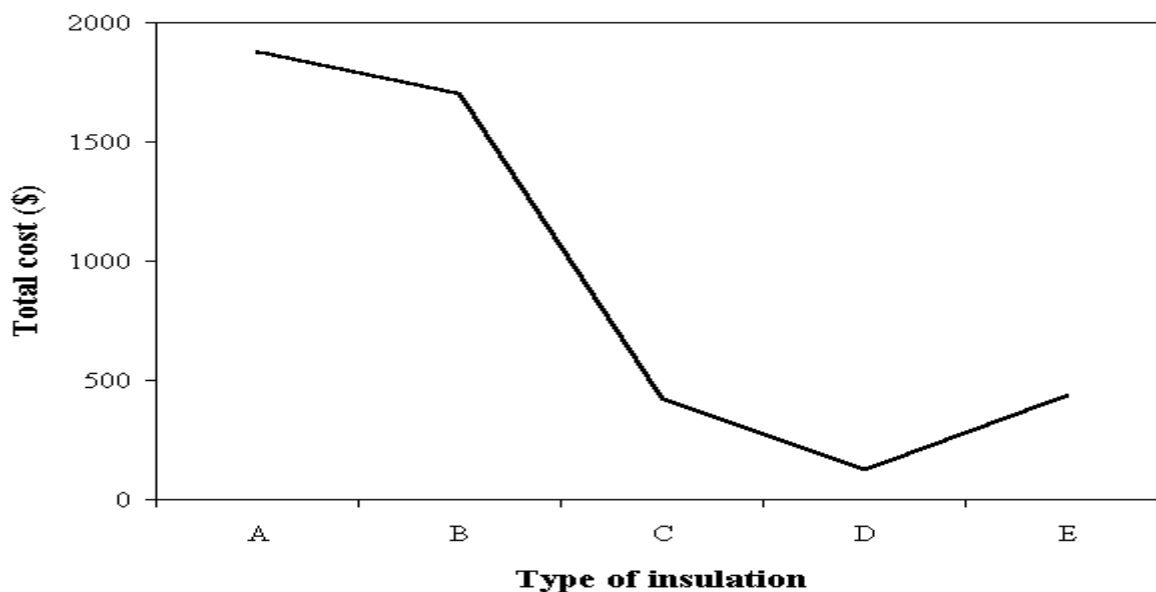


Fig. 4-12. Coût total de différents types d'isolation pris en considération (le coût a été calculé à partir du Dinar, en assimilant à la valeur 1 \$ = 80 Dinars Algérien).

L'étude que nous venons de faire, a montré qu'il est très important de prendre en considération l'effet des écarts thermiques sur la façon de construire une habitation en zone semi-aride. Cependant, les écarts thermiques ne sont pas les seuls paramètres influant sur les conditions de vie des populations dans ces régions. Les vents de sable contribuent régulièrement à la dégradation de ces conditions de vie. Par ailleurs, on assiste depuis quelques temps à une pollution des sols due à l'ensablement des réseaux d'assainissement, d'où, la nécessité d'étudier ces deux sortes de phénomènes

4.4 Passage d'un vent de sable dans une zone steppique algérienne

A travers un cas enregistré dans trois stations, à savoir Djelfa, Ain-Oussera et Ksar-Chellala, les variations climatiques ont été examinées dans une région steppique lors du passage d'un vent de sable. Les résultats obtenus, permettent de quantifier ces extrêmes météorologiques qui entravent diverses activités.

Dans les régions arides et semi-arides, les contrastes climatiques qu'entraînent les changements de direction et de force du vent sont très marqués, et les éléments, températures, humidité, pression, troubles atmosphériques demeurent sous sa dépendance immédiate.

La vitesse du vent agit encore sur l'évaporation, car l'air abandonne des quantités de chaleur d'autant plus grandes au contact de l'eau que sa vitesse est plus grande [Emsalem, 1970]. Les effets mécaniques du vent sont évidemment fonction de sa vitesse. Le vent chargé

de poussière siliceuse dure produit des effets abrasifs et d'érosion, le trouble atmosphérique qu'il génère, entrave diverses activités (circulation terrestre, navigation aérienne) et forme notamment dans les centres urbains, un aérosol plus ou moins toxique et un vecteur de certaines maladies pour l'homme et les végétaux. Ainsi, il existe inévitablement, entre les vents de sable et les activités humaines, des interactions nombreuses et complexes dont les effets sont susceptibles de se répercuter sur sa santé et sur plusieurs secteurs de son économie [Arlery *et al.*, 1973].

4.4.1 Base de données enregistrées

Au cours d'études portant sur l'érosion éolienne dans les zones arides, des données expérimentales ont été mesurées par la station d'observation localisée à Benahar (Ain Oussera, Wilaya de Djelfa), ainsi que par les stations météorologiques de Djelfa et de Ksar Chellala. Ces stations sont situées dans une zone steppique des Hauts Plateaux.

Au cours du passage d'un vent de sable dans cette région, la vitesse et la direction du vent, la température, la pression atmosphérique et l'humidité ont été enregistrées par des stations automatiques qui comportent :

Une sonde de température équipée d'un élément en platine de 100 Ohms, monté dans un abri miniature.

Un hygromètre à sonde capacitive, monté dans le même abri, au-dessus de la température.

Un anémomètre monté sur l'un des bras de la lyre en haut du mât de 10 mètres pour les stations de Benharar et Ksar-Chellala, aux niveaux de 2 mètres et 10 mètres pour la station de Djelfa.

Une girouette montée sur l'autre bras de la lyre.

Les paramètres enregistrés par ces stations sont représentés dans la Table 4-4 .

4.4.2 Résultats

Pour la période allant du 1^{er} Avril à 12 h au 2 Avril 2000 à 18 h , on déduit les courbes de la Fig.4-13 des mesures de pression faites à Ain Oussera, Ksar Chellala et Djelfa. Nous constatons que la pression diminue régulièrement de 14,5 millibars à la station de Ain Oussera, de 11,2 millibars à la station de Ksar Chellala et de 11,1 millibars à la station de Djelfa . Ces résultats signifient qu'au passage du vent de sable, le centre de la dépression est plus proche de Ain Oussera que des deux autres stations.

Symbole	Paramètre	Etendue de mesure	Résolution	Unité
---------	-----------	-------------------	------------	-------

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

T	Température sous abri	-40,0 +60,0	0,1	°C
U	Humidité	0,0 100	0,1	%
VT	Vent total sur Heure	0 999	0,1	Km
VT	Vent total sur 1mn	0 999	0,1	M
V	Force vent moyenne (10 mn)	0 100	1	M/s
DV	Direction Vent moyenne (10 mn)	0 360	10	Degré
VX	Force Vent maximum	0 100	1	M/s
VN	Force Vent minimum	0 100	1	M/s
GIX	Direction associée à VX	0 360	10	Degré
GIN	Direction associée à VN	0 360	10	Degré
P	Pression atmosphérique	/	0,1	Millibar

Table 4-4. Paramètres météorologiques enregistrés à Ain Oussera.

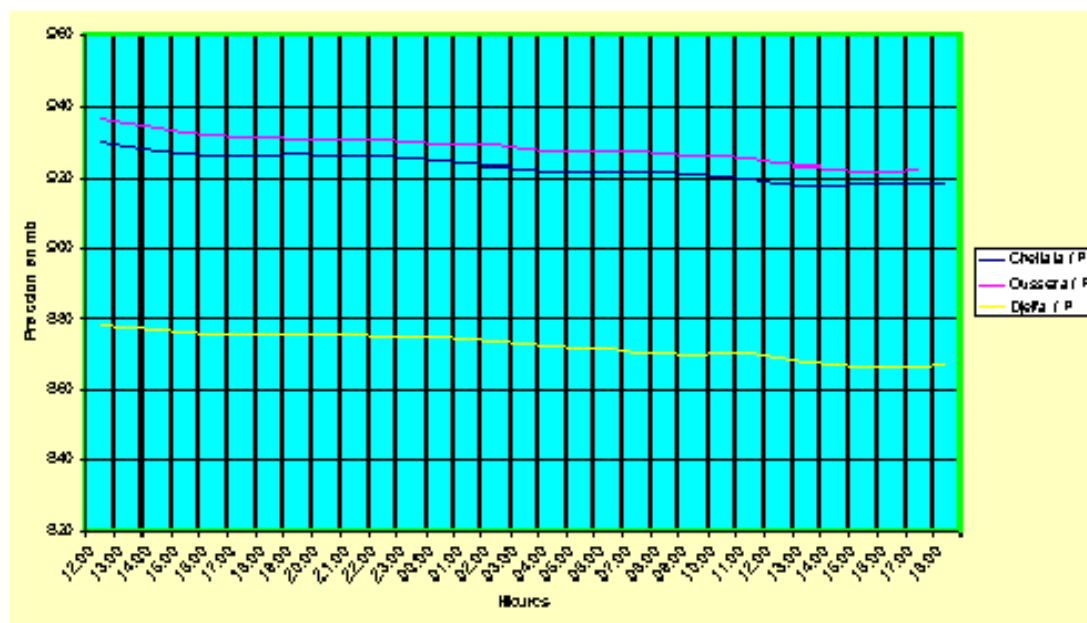


Fig. 4-13. Variations de pression du 1^{er} avril à 12 h au 2 avril 2000 à 18 h dans les stations de Djelfa, de Ksar Chellala et d'Ain Oussera.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

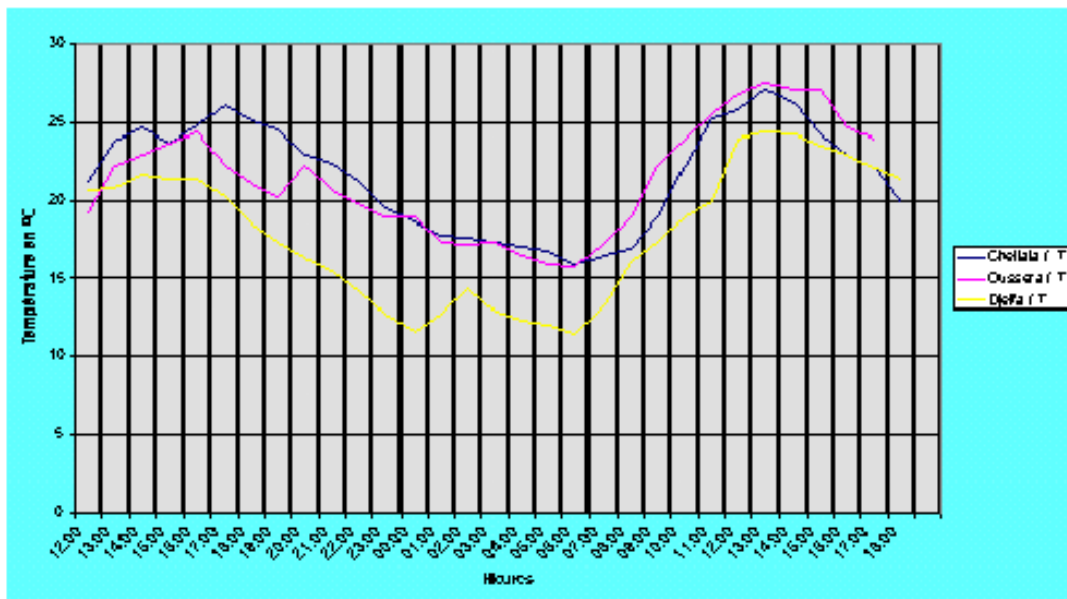


Fig. 4-14. Variations de température du 1^{er} avril à 12 h au 2 avril 2000 à 18 h dans les stations de Djelfa, de Ksar Chellala et d'Ain Oussera.

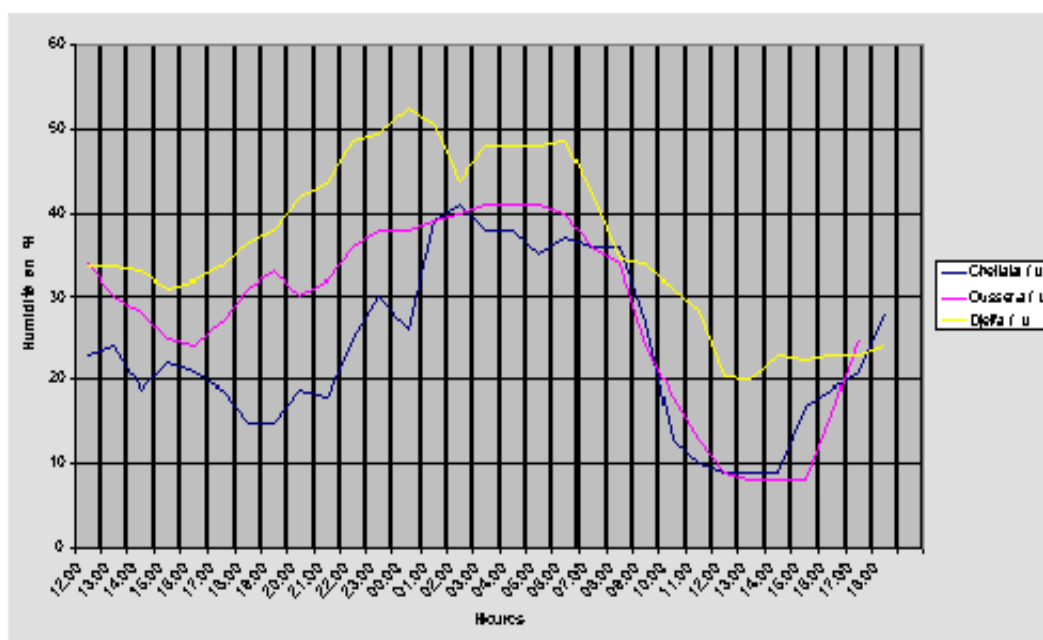


Fig. 4-15. Variations d'humidité du 1^{er} avril à 12 h au 2 avril 2000 à 18 h dans les stations de Djelfa, de Ksar Chellala et d'Ain Oussera.

Les courbes de la Fig. 4-14 présentent une variation journalière normale des températures pour la région. Celles-ci passent par un minimum vers 6h et un maximum entre 15 h et 16 h. Toutes ces courbes sont marquées par un crochet en hausse de +3 à +5°C, entre 15 h et 18 h,

le 1^{er} avril 2000 pour Ksar Chellala, entre 19 h et 20 h, le 1^{er} avril 2000 pour Ain Oussera et entre 01 h et 02 h, le 2 avril 2000 pour Djelfa. Ceci signifie que le déplacement de la masse d'air qui accompagne la perturbation s'effectue d'Ouest en Est.

Les courbes de la Fig. 4-15 représentent les variations d'humidité. Ces dernières sont surtout marquées par une forte baisse le 2 Avril 2000 pour l'ensemble des stations. La diminution est de - 28,5% à Djelfa entre 6h et 13h, - 27% à Ksar-Chellala entre 9h et 14h et - 26% à Ain Oussera entre 09h et 16h. Cette baisse d'humidité étant due à un vent du sud de type sirocco, il est tout à fait normal qu'il marque son passage à Djelfa avant Ksar-Chellala et Ain-Oussera.

Les mesures de la vitesse du vent et de sa direction ont été réalisées au cours des journées du 1^{er} et 2 Avril 2000

Pour la station de Ain Oussera, la direction du vent passe successivement par les secteurs suivants : Sud-Est, Sud, Sud-Ouest, Ouest, puis Nord.

Pour la station de Ksar-Chellala, les secteurs de la direction du vent sont : Sud-Ouest, Sud, Sud-Ouest, puis Ouest.

Pour la station de Djelfa, les directions successives du vent sont : Nord-Ouest, Sud-Est, puis Sud-Ouest.

Une étude plus fine de la variation de la direction et de la force du vent chargé par des particules de sables, a été effectuée en utilisant les données de la station de Djelfa.. Celle-ci dispose d'une installation anémométrique à deux niveaux, soit 2 mètres et 10 mètres d'altitude. Les capteurs sont reliés à une centrale d'acquisition qui permet l'enregistrement des mesures chaque minute. Les Fig 4-16, 4-17 et 4-18 représente les vitesses du vent et les directions mesurées à ces deux niveaux .

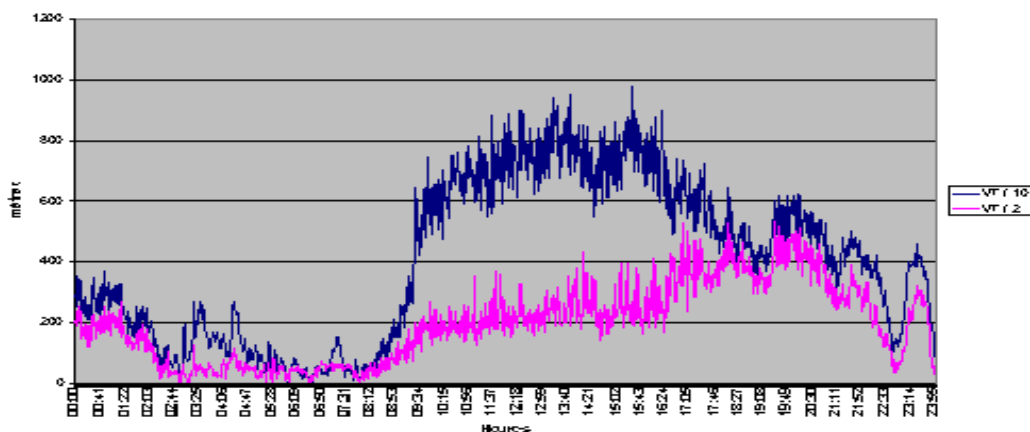


Fig. 4-16. Vent total mesuré à la station de Djelfa le 1^{er} avril 2000.

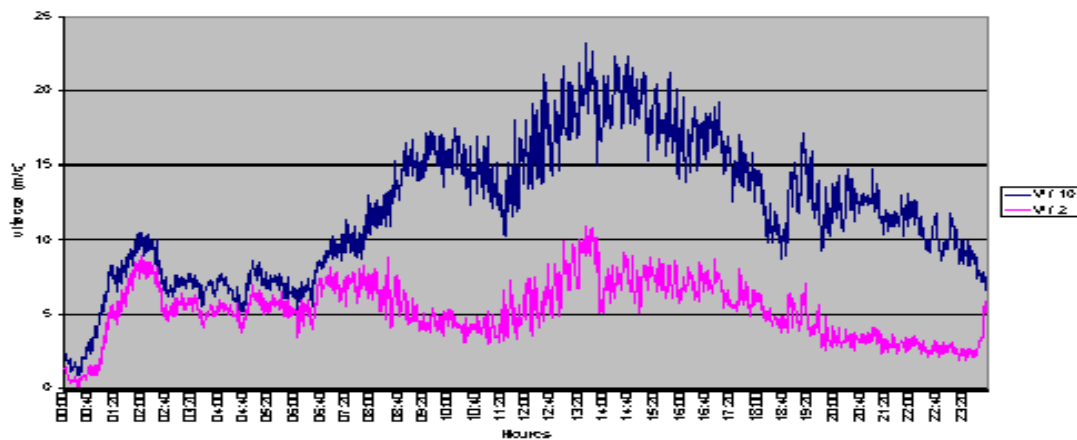


Fig. 4-17. Vent moyen mesuré à la station de Djelfa le 2 avril 2000.

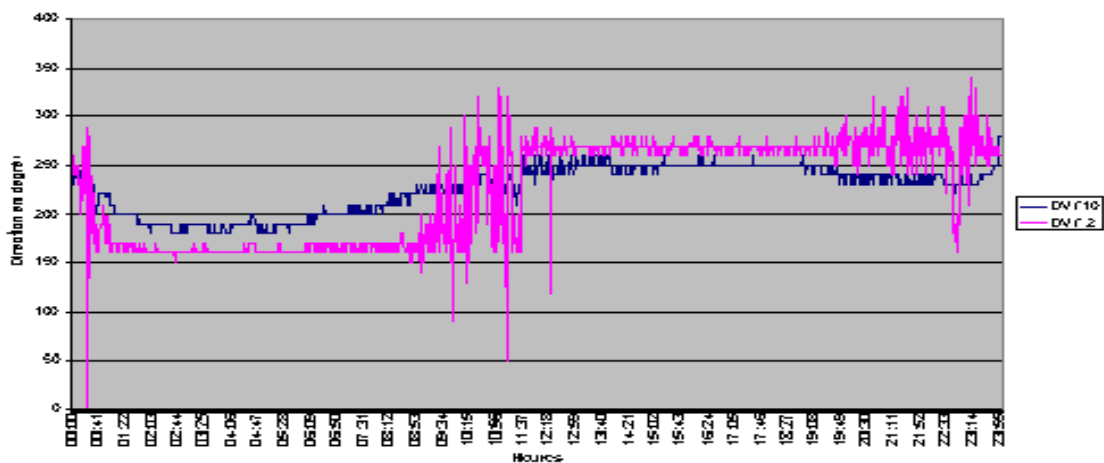


Fig. 4-18. Direction du vent mesurée à la station de Djelfa le 2 avril 2000.

L'analyse de ces figures montre que :

La vitesse du vent est plus forte l'après-midi après développement de la couche de mélange. Ceci est une caractéristique de la région . Lorsque le vent est assez fort, sa vitesse au niveau 2 mètres, est retardée par frottement sous l'effet du sol. D'où, une différence importante dans la force du vent observée entre les deux niveaux à 10 mètres et 2 mètres.

La direction des vents varie beaucoup plus lorsque la vitesse est faible que lorsqu'elle est élevée. Elle est très variable surtout au niveau 2 mètres, lorsque le vecteur vent passe d'un secteur à un autre. Ces fluctuations sont à l'origine des déplacements des particules de sable sous l'effet de la turbulence et de la rugosité du sol [Fleagle et Businger, 1976].

Finalement, on remarque que pour la direction sud du vent de sable, aussi bien sa force que sa direction restent constantes.

4.5 Pollution par les vents de sable en zone semi-aride

Le but de ce paragraphe est de quantifier les dépôts des vents de sable pour voir leur impact sur la qualité des eaux de ruissellement dans une zone semi-aride. En zone semi-aride, les eaux de ruissellement subissent une forte pollution causée par diverses particules apportées par les vents de sable. Cette pollution est accentuée par l'envasement des conduites d'eaux usées, provoqué par les dépôts de sable. Quand un orage éclate, les premiers flots entraînent, avec force, des débris collectés dans les chaussées, les caniveaux, les trottoirs ainsi que les places publiques, vers les réseaux d'assainissement.

Le principe de l'assainissement d'une agglomération est d'évacuer le plus rapidement possible les déchets d'origine humaine, animale, voire industrielle [Christian et Maurice, 1991]. A ces nuisances, s'ajoutent dans les régions semi-arides, les sables déposés par accumulation éolienne.

En l'absence de précipitations, l'environnement est pollué par des dépôts de substances diverses. Selon sa vitesse et sa force, le vent se charge de particules de tailles variées résultant de l'érosion, c'est à dire les sables fins, les sables moyens, les limons, les argiles. Il les entraîne loin du lieu de destruction vers le lieu de dépôt [Fleagle et Businger, 1980].

Les zones semi-arides ont la particularité de contenir dans ces dépôts, le sable transporté par les vents lors de tempêtes de sable [Mainguet et Callot, 1978 ; Kibboua et Boutahraoui, 1987 ; Phillips, 1999]. Dans la région de Djelfa, les réseaux d'évacuation des eaux de pluie ne répondent plus aux normes. De ce fait, ils sont loin d'assurer l'évacuation des polluants.

Le caractère quantitatif des dépôts des vents de sable est sans doute celui qui est le plus délicat à cerner. En effet, il résulte de l'analyse des phénomènes essentiellement aléatoires, dont les caractéristiques varient dans le temps, dans l'espace, mais aussi tout au long de la manifestation de tempêtes de sable [Saadaoui, 1994]. Ce phénomène météorologique doit être caractérisé suivant son étendue, son intensité et la fréquence probable du retour des vents de sable [Emsalem, 1970].

Une étude des dépôts des vents de sable basée sur une analyse physico-chimique, a été conduite dans la région de Ain Oussera pour étudier la pollution des eaux de ruissellement.

4.5.1 Données de vents de sable

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Cette étude est une analyse statistique des lithométéores observés à la station d'Ain Oussera. Elle est réalisée à partir des documents climatologiques TCM (Temps Climatologique Mensuel) relatifs à la période du 1^{er} Janvier 1990 au 31 Décembre 1995.

Au cours de cette étude, nous avons utilisé des relevés statistiques de la fréquence des vents dans seize directions possibles. Ces données ont été collectées par la station automatique d'Ain Oussera et traitées pour chacun des douze mois de l'année [Messen, 1994]. Les courbes des Fig. 4-19, 4-20 et 4-21 regroupent les résultats obtenus et permettent de classer les distributions statistiques en fonction de leur intensité. Deux classes ont alors été identifiées : les vents forts ou efficaces et les vents faibles ou non efficace.

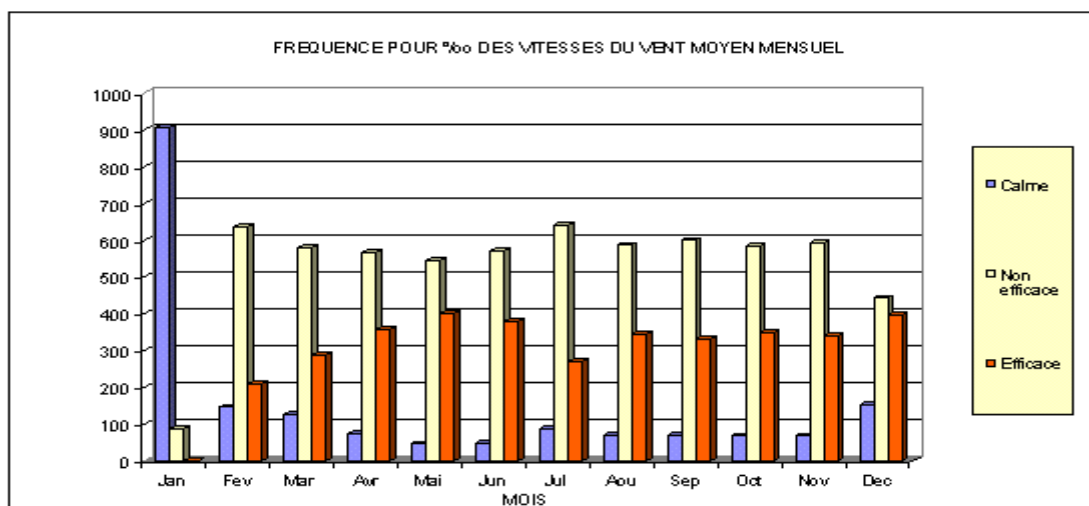


Fig. 4-19. Fréquence mensuelle des vitesses de vent moyen à Benahar.

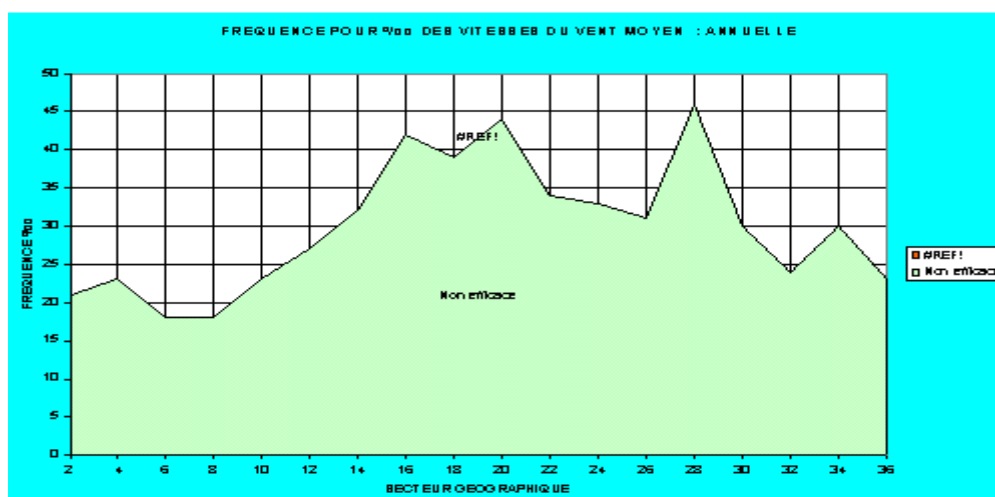


Fig. 4-20. Fréquence annuelle des vitesses de vent moyen (non-efficace) à Benahar en fonction des secteurs.

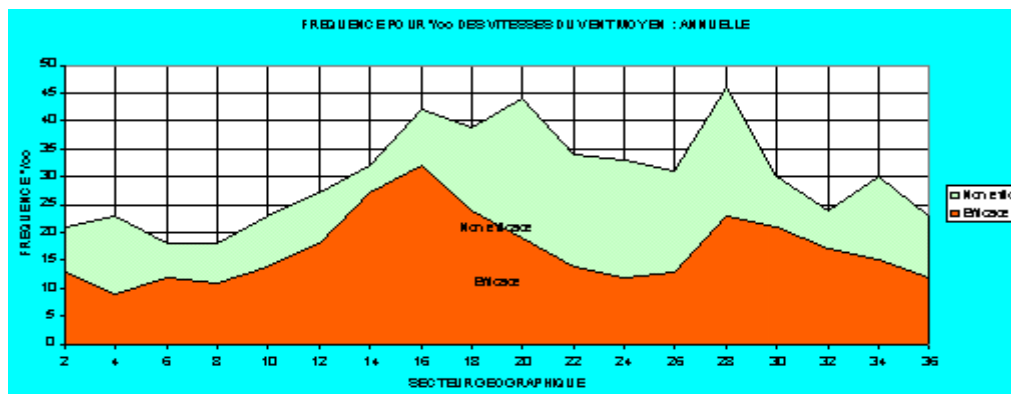


Fig. 4-21. Fréquence annuelle des vitesses de vent moyen (non-efficace et non efficace) à Benahar en fonction des secteurs.

4.5.2 Expérimentation

L'expérience de quantification des dépôts des vents de sable à Benahar, a duré une année. Elle a débuté le 1^{er} Mai 1999 et s'est achevée le 30 Avril 2000. Le sable a été collecté grâce à un dispositif spécialement conçu pour piéger le sable selon les différents secteurs de la direction du vent. Ce dispositif comporte très sommairement une pièce tournante munie d'un orifice, destinée à capter les particules apportées par le vent et de huit bacs disposés selon les principales directions du vent, jouant le rôle de collecteurs de sable (voir Fig. 4-22 et 4-23). La quantité de sable est déposée dans chacun des godets en fonction de la direction et de l'intensité du vent. Avec ce dispositif, l'effet des vents de sable dans une agglomération est parfaitement reproduit.

Un second dispositif jouant le rôle de quantificateur, est basé sur le même principe que le précédent, mais ne collecte que la quantité de sable provenant d'une direction donnée.

Le diagramme de la Fig. 4-24 donne la quantité de lithométéores collectée chaque mois à Benahar. On observe alors un régime saisonnier avec un régime de vent de sable estival de forte intensité au mois d'Août et un régime de vent de sable printanier étalé sur trois mois et de moyenne intensité.

Par ailleurs, la charge polluante apportée au mois de Septembre par les vents de sable et passant dans un égout lorsqu'il a plu pendant une heure, est trois fois plus importante que la charge polluante passant dans les mêmes conditions au mois de Janvier.

Le diagramme de la Fig. 4-25 donne la répartition des quantités de lithométéores recueillies à Benahar pour chaque secteur. On trouve que les quantités de lithométéores collectées dans les secteurs Sud (S) et Ouest (O), sont beaucoup plus importantes que pour les

autres secteurs. Pour le secteur Est (E), les quantités de lithométéores piégées par le premier dispositif sont très faibles malgré l'effet de sillage de l'installation.



Fig. 4-22. Piège à sable.



Fig. 4-23. Godets de collecte du grain de sable.

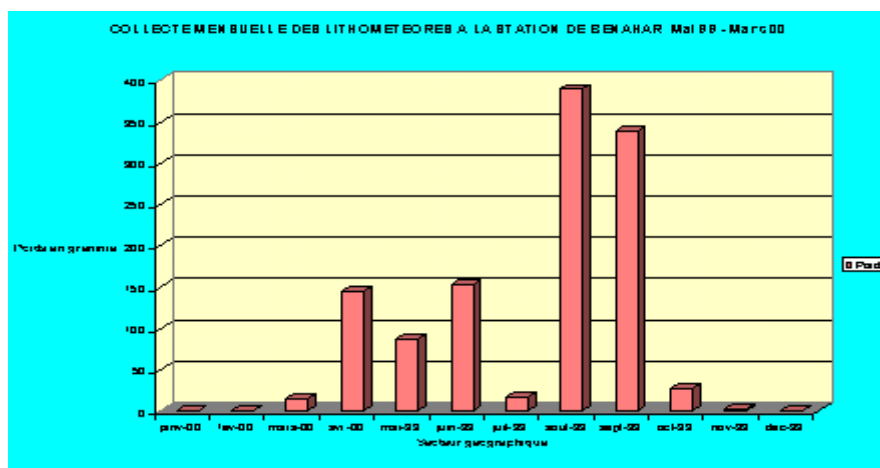


Fig. 4-24. Quantité de lithométéores collectée mensuellement à Benahar de 1999 à 2000.

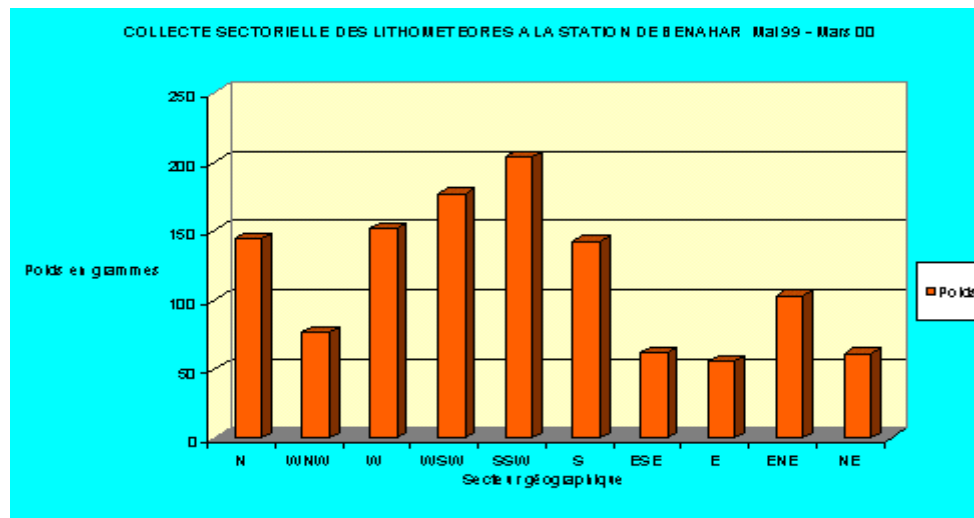


Fig. 4-25. Quantité de lithométéores collectée par secteur à Benahar de 1999 à 2000.

4.5.3 Résultats

Le prélèvement de douze échantillons a été effectué dans des conditions identiques et aux emplacements suivants :

Station Birine : échantillon de sable sec prélevé à la surface du sol d'une nebka (petite dune) à flèche de sable

Benahar 25 : échantillon de sable sec à 25 cm du sol prélevé à la station de Benahar

Benahar 75 : échantillon de sable sec à 75 cm du sol prélevé à la station de Benahar

Benahar 110 : échantillon de sable sec à 110 cm du sol prélevé à la station de Benahar

Khachem sol : échantillon de sable sec prélevé à la surface du sol d'une nebka à flèche de sable sur les hauteurs d' El Khachem

Khachem sédiment : échantillon de sable sec prélevé à la surface du sol d'une nebka buissonnante dans la zone inondable d' El Khachem

Piège à sable : échantillon de sable prélevé par le piège à sable de la station de Benahar

Ksar Chellala institut : échantillon de sable sec prélevé à l'institut hydraulique de Ksar Chellala à la surface du sol d'une nebka à flèche de sable.

Sidi Ladjel sédiment : échantillon de sable humide prélevé des sédiments d'un cours d'eau à 5 km de la sortie Ouest de Sidi Ladjel.

Ain Oussera Ouest : échantillon de sable sec prélevé à la surface du sol d'une nebka à flèche de sable à 2 km de la sortie Ouest de Ain Oussera.

Ain Oussera Sud : échantillon de sable sec prélevé à la surface du sol d'un voile éolien à 12 km de la sortie Sud d'Ain Oussera.

Zone témoin : échantillon de sable sec prélevé à la surface du sol d'un voile éolien au Sud de Laghouat (région aride).

Les résultats des analyses de ces échantillons sont reportés dans les Tables 4-5 et 4-6.

4.5.4 Analyse des résultats

Les principales caractéristiques des accumulations éoliennes et du régime annuel des vents dans la région d'Ain Oussera (Wilaya de Djelfa) sont représentées par les Fig. 4-19 à 4-25 et les Tables 4-5 à 4-6. Ces résultats indiquent que la fréquence des vents inactifs et calmes qui est de 62 % l'emporte sur celle des vents actifs qui vaut 38 %. Toutefois, les vents actifs sont relativement plus fréquents que dans les autres régions semi-arides.

Dd	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Tot.
.S.	1.8	.	.	2.1	4.3	1.4	.	05.7	04.6	1.4	0.3	1.8	06.8	1.4	0.7	0.7	33
C.S.	3.6	0.3	0.7	1.8	1.4	0.7	.	04.2	10.0	3.2	6.4	2.8	15.4	2.8	0.7	5.0	59
T.S.	.	0.3	.	.	.	.	.	00.7	01.8	1.0	1.4	.	02.8	.	.	.	8
Tot.	5.4	0.6	0.7	3.9	5.7	2.1	.	10.6	16.4	5.6	8.1	4.6	5.0	4.2	1.4	5.7	100

Table 4-5 Fréquences d'apparition des différents lithométéores en fonction de la direction du vent (Dd = Direction, B.S. = Brume de sable, C.S. = Chasse sable, T.S. = Tempête de sable).

Référence Eléments	Station	Benhar	Benhar	Benhar	Khachem	Khachem
	CRNB	25	75	110	Sol	Sédiment
Granulométries en %						
ARGILE	04	06	10	11	(*)	(*)
Limon fin	04	04	03	06		
Limon grossier	04	01	02	02		
Sable fin	55	62	62	57		
Sable grossier	32	26	26	27		
Total	99	99	103	103		
Bilan ionique (méq/l)						
HCO₃⁻		0.03	0.13	0.12	0.22	0.32
SO₄⁻		1.28	0.97	0.56	0.47	3.36
Cl⁻	(**)	0.00	0.10	0.63	0.33	17.57
Ca⁺⁺		1.26	0.89	0.68	0.73	5.65
Mg⁺⁺		0.02	0.15	0.14	0.07	1.67

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Na ⁺		0.07	0.07	0.55	0.11	13.88
K ⁺		0.03	0.02	0.01	0.04	0.10
Calcaire total en %	6.34	2.10	4.83	13.44	15.54	8.40
Calcaire actif en %	(***)	(***)	(***)	9.63	6.50	5.38
PH	7.85	7.90	7.57	7.63	7.48	7.27
Conductivité (mm ohms)	1.16	5.44	2.02	5.31	2.49	30.31
Fer total ‰	25.03	46.48	32.24	32.18	44.70	59.00
Fer libre ‰	1.14	1.43	1.14	0.57	0.85	0.85

Table 4-6. Résultats des prélèvements : (*) Echantillon floculé avec présence probable de gypse, (**) Conductivité inférieure à 2 mm ohms et (***) Calcaire total à 7 (suite).

Références	Ech	Ksar	Sidi	Ain	Ain	Zone
Eléments	Vent de	Chellala	Ladjal	Oussera	Oussera	Témoin
	Sable	Institut	Sédiment	St . W	St . 5	
Granulométrie en %						
Argile	06	07	09	07	03	06
Limon fin	04	04	05	01	03	05
Limon grossier	03	02	03	01	01	03
Sable fin	65	70	80	68	55	69
Sable grossier	25	20	03	26	41	20
Total	103	103	100	103	103	103
Bilan ionique (méq/l)	0.09	0.21				
HCO ₃ ⁻	0.18	0.23				
SO ₄ ⁻²	0.18	0.76	(**)	(**)	(**)	(**)
Cl ⁻	0.23	0.37				
Ca ⁺⁺	0.05	0.02				
Mg ⁺⁺	0.12	0.78				
Na ⁺	0.02	0.02				
K ⁺						
Calcaire total en %	4.62	5.88	9.03	4.20	5.25	5.58
Calcaire actif en %	(***)	(***)	4.50	(***)	(***)	(***)
PH	7.74	7.81	7.74	7.69	7.79	7.75
Conductivité mm ohms	2.90	3.77	1.19	1.21	0.85	0.94
Fer total en ‰	37.54	39.33	39.33	33.97	41.12	78.67
Fer libre en ‰	0.28	Traces	0.57	Traces	Traces	3.43

Table 4-6. Résultats des prélèvements : (*) Echantillon flocculé avec présence probable de gypse, (**) Conductivité inférieure à 2 mm ohms et (***) Calcaire total à 7.

Les résultats de la Table 4-6 montrent que les vents de sable sont généralement liés aux vents du secteur Ouest. La chasse sable est plus fréquente que les autres lithométéores. Elle est liée aux vents de différents secteurs. La brume de sable qui accompagne généralement les vents des secteurs S, SSE et SO, indique que ce phénomène est d'origine saharienne.

En conséquence les eaux de ruissellement seront chargées de matières en suspension auxquelles il faut ajouter les accumulations éoliennes qui sont très importantes aux mois d'Août et de Septembre. Or, c'est pendant cette saison qu'on observe des précipitations de forte intensité, accompagnant les orages fréquents en cette période

4.6 Discussion

L'étude de la température en zones semi-arides a permis de distinguer des classes de température caractérisant le climat semi-aride. Les méthodes statistiques élaborées au cours de cette étude, ont permis de caractériser les écarts thermiques dans une région semi-aride. Les résultats ainsi obtenus semblent intéressants car ils peuvent être intégrés dans les calculs des isolations thermiques et même dans l'architecture de la construction. L'information qu'on peut tirer sur les grandes variations du processus d'échanges thermiques, trouve son application directe aux prévisions en matière de chauffage ou de climatisation.

Nous trouvons que les besoins en chauffage et en climatisation sont beaucoup plus importants dans une région semi-aride que dans une zone tempérée. Aussi, une étude économique de l'isolation thermique a été associée au calcul des écarts de température. Elle montre l'existence de matériaux peu coûteux, possédant une grande inertie thermique et pouvant être avantageusement utilisés dans les constructions en zone semi-aride.

A l'issue de ces résultats, l'optimisation des dimensions des systèmes de chauffage et de climatisation des habitations en zone semi-aride, devient possible. Aussi, une approche devrait être prise en compte dans les programmes d'aménagement aussi bien agricoles qu'industriels. La méthode de calcul précédemment exposée est susceptible d'être affinée et souligne à ce propos l'intérêt que peuvent présenter des études englobant d'autres paramètres comme par exemple, la teneur en vapeur d'eau dans l'atmosphère, la vitesse du vent et sa direction.

Une analyse préliminaire fait ressortir que les faibles degrés hygrométriques ne sont pas très recommandés dans la construction d'un habitat car le confort de qualité requiert une

humidification adéquate de l'espace vital. Pour satisfaire cette exigence, il faudrait équiper d'humidificateurs les maisons se trouvant dans les zones semi-arides. Dans les projets d'architecture et d'urbanisme, il serait également opportun d'y associer la vitesse du vent et sa direction afin de voir l'éventuelle existence de courants d'air pouvant avoir un effet direct sur la température et de définir, en conséquence, l'orientation des habitations [Bajwa, 1992 ; Li, 1996 ; Sayigh et Marafia, 1998 b ; Sala, 1998].

L'étude que nous avons menée sur les vents de sable, a mis en évidence l'influence de ce phénomène météorologique sur l'environnement et les conditions de vie des populations des zones semi-arides. Cette influence est quantifiée par la charge polluante apportée par les vents de sable. La quantification des charges polluantes peut contribuer, de façon appréciable, à la résolution des problèmes de l'évacuation et le traitement des eaux usées [P.N.R, 2001].

CHAPITRE 5

5. Étude statistique des mesures du vent

Dans ce chapitre, les propriétés statistiques de la vitesse et de la direction du vent sont analysées pour l'ensemble de l'Algérie. Une classification est effectuée pour identifier les régions les plus ventées. Une combinaison de modèles statistiques basées sur la distribution de Weibull et les chaînes de Markov a permis d'obtenir une simulation bivariée des séries chronologiques représentatives de la vitesse du vent et de sa direction.

5.1 Position du problème

L'Algérie de par l'importance de sa superficie, est le deuxième pays d'Afrique. Son relief est très diversifié. Au Nord, le long de la côte méditerranéenne, s'étend l'étroite plaine du Tell algérien. Deux importantes chaînes de montagnes orientées d'Est en Ouest, encadrent une région de Hauts Plateaux. Ce sont l'Atlas tellien au Nord, l'Atlas saharien et le massif des Aurès au Sud. Le relief de l'Algérie comporte aussi des vallées attenantes aux plaines du Nord et les chotts de l'Atlas saharien. Au Sud de l'Atlas saharien, s'étend l'immense désert du Sahara qui représente 80% de la superficie de l'Algérie. Enfin, au Sud du Sahara, se trouve le massif du Hoggar. Celui-ci est une succession de hauts plateaux désertiques qui s'élèvent en gradins. Ces hauts plateaux sont dominés dans la partie centrale du Hoggar par d'imposants reliefs au Nord de Tamanrasset. Le sommet du Hoggar est l'Atakor qui culmine à 2918 m.

L'existence de vents en provenance du Sud et l'influence de la zone intertropicale donnent lieu à une variété climatique du point de vue éolien dans ce pays. Le relief constitue des obstacles pour l'air qui doit le contourner ou le dépasser.

Dans les basses couches de l'atmosphère, le vent joue un rôle crucial car il contribue énormément aux échanges thermiques entre l'atmosphère et la surface terrestre. Il participe au mécanisme d'évaporation des nappes d'eau et véhicule diverses particules en suspension dans l'air d'un endroit à un autre de la Terre. Il est responsable de l'érosion éolienne à laquelle est soumis le relief terrestre. En plus de l'apport dans la connaissance climatique d'une région, il représente aussi une source appréciable d'énergie. En effet, la conversion d'énergie éolienne est l'une des plus anciennes mais la plus attractive dans la génération d'énergie. Actuellement, la recherche dans ce domaine est largement menée à travers le monde [Hennesey, 1977 ; Tackle et Brown, 1977 ; Nassir *et al*, 1992]. Cependant, l'énergie éolienne n'a pratiquement pas été exploitée en Algérie jusqu'à aujourd'hui, bien que la vitesse du vent et sa direction soient régulièrement mesurées dans l'ensemble des stations d'observations du réseau météorologique algérien, depuis de nombreuses années.

Le vent est un processus aléatoire, non-stationnaire, qui dure peu de temps. Pour caractériser un tel phénomène et connaître son évolution au cours du temps, il faudrait évaluer ses propriétés climato-statistiques, puis analyser celles-ci dans l'espace et dans le temps. Ce type d'analyse implique alors le traitement des mesures de la vitesse du vent et de sa direction

réalisées au dessus du sol ou de données extraites d'images satellitaires ou bien d'images radar.

Parmi les études menées dans la recherche des propriétés statistiques du vent, peuvent être citées celles qui montrent l'adaptabilité de la loi de Weibull à la description des distributions de la vitesse du vent [Darwish et Sayigh, 1988 ; Afgan *et al*,1998]. Dans ce contexte, nous avons effectué une étude basée uniquement sur des données tri-horaires de vitesse et de direction du vent, enregistrées, durant dix ans à 10m au-dessus du sol, dans trente sept stations météorologiques de l'Algérie (voir Table 1-1). L'étude présentée dans les prochains paragraphes, comprend essentiellement une modélisation spatio-temporelle du vent en Algérie, une classification portant sur les résultats de la modélisation et une modélisation bivariée des séries chronologiques représentatives de la vitesse du vent et de sa direction.

5.2 Etude spatio-temporelle

5.2.1 Données

Comme le montre la Table 1-1, trente sept stations de l'Algérie sont considérées. La vitesse du vent est mesurée au moyen d'anémomètres placés à 10m du sol. L'angle qui donne la direction du vent est repéré par rapport à la direction du Nord, prise comme référence. Cette grandeur est mesurée à l'aide d'une girouette associée à chaque anémomètre. Les directions du vent que nous avons considérées, sont au nombre de huit, soit le Nord (N), le Nord Est (NE), l'Est (E), le Sud Est (SE), le Sud (S), le Sud Ouest (SO), l'Ouest (O) et le Nord Ouest (NO). La précision de mesure de la vitesse du vent est de 0,5m/s et la résolution de mesure de l'angle de direction vaut 0,1°. Les données du vent ont été collectées dans les trente sept stations météorologiques, toutes les trois heures pendant la période allant de 1977 à 1988. Pour une station donnée, ces données ont été regroupées à l'échelle annuelle suivant les huit principales directions du vent qui sont :N, NE, E, SE, S, SO, O et NO.

Dans ce qui suit, les distributions de fréquences de la vitesse du vent sont modélisées par une distribution de Weibull pour chaque station et pour chacun des huit secteurs. Les paramètres de la distribution de Weibull sont ensuite représentés sous forme de cartes.

5.2.2 Distribution de Weibull.

De nos jours, la distribution de Weibull est couramment utilisée pour ajuster les données expérimentales du vent avec une très bonne précision. [Weibull, 1951 ; Tackle et Brown, 1977 ; Justus, 1978 ; Morgan, 1995 ; Youcef Ettoumi *et al*, 1995 a, b ; Garcia , 1998].

Supposons que pour un site donné et pour un secteur de direction donné, les mesures de la vitesse du vent, soient représentées par une variable aléatoire continu (v) dont les valeurs possibles sont celles de la vitesse du vent et dont la densité de probabilité est une distribution de Weibull $f(v)$. Cette distribution, s'écrit :

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \quad (5-1)$$

où, v , k et A sont respectivement la vitesse du vent, le facteur de forme (qui est sans dimension) et le facteur d'échelle, en m/s.

La probabilité d'avoir une mesure (V) de la vitesse du vent, est :

$$F(V) = \int_0^V f(v)dv = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right] \quad (5-2)$$

On en déduit que le moment d'ordre n de cette distribution est :

$$\mu_n = A^n \Gamma\left(1 + \frac{n}{k}\right) \quad (5-3)$$

La fonction gamma qui intervient dans cette expression, est de la forme:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} \left(\frac{v}{A}\right)^{x-1} \exp\left(-\frac{v}{A}\right) d\left(\frac{v}{A}\right) \quad (5-4)$$

En calculant les moments du premier ordre et du second ordre à l'aide de l'équation (5-3), on trouve que la moyenne \bar{v} et l'écart-type σ de la distribution de Weibull sont respectivement:

$$\bar{v} = A \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5-5)$$

$$\sigma = A \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right]^{1/2} \quad (5-6)$$

5.2.3 Méthodologie

Deux sortes de méthode permettent d'évaluer le facteur de forme (k) et le facteur d'échelle (A) [Justus, 1978] :

La première méthode consiste à linéariser les distributions cumulées (5-2) et à ajuster les distributions de fréquences des vitesses du vent au moyen de la méthode des moindres carrés.

La seconde méthode est basée sur le calcul des moments du premier ordre et second ordre de la distribution de Weibull.

La première méthode est mise en œuvre en prenant des échelles logarithmiques. Après transformation, l'équation (5-2) s'écrit sous une forme linéaire qui est:

$$\ln[-\ln(1-F(V))] = k \ln(V) - k \ln(A). \quad (5-7)$$

Pour une station donnée et pour une direction donnée, les mesures tri-horaires de la vitesse du vent collectées au cours de la période 1977/88, ont été regroupées en quatorze classes distinctes d'étendue égale à 1 m/s. Ces classes sont :

$0 < V \leq 1$ m/s ; 1 m/s $< V \leq 2$ m/s ; 2 m/s $< V \leq 3$ m/s ; 3 m/s $< V \leq 4$ m/s ;
 5 m/s $< V \leq 6$ m/s ; 7 m/s $< V \leq 8$ m/s ; 8 m/s $< V \leq 9$ m/s ; 9 m/s $< V \leq 10$ m/s ;
 10 m/s $< V \leq 11$ m/s ; 11 m/s $< V \leq 12$ m/s ; 12 m/s $< V \leq 13$ m/s ; 13 m/s $< V \leq 14$ m/s ;
 14 m/s $< V$.

Le premier membre de l'équation (5-7) est ensuite calculé en considérant les valeurs de chacune de ces classes. En portant en abscisse (x) le second membre de l'équation (5-7) et en ordonnée (y) le premier membre de celle-ci, on obtient un nuage de points représentatifs des mesures effectuées.

L'étape suivante est l'application de la technique des moindres carrés pour ajuster ce nuage de points à une droite de régression de la forme $y = a x + b$. On en déduit alors que :

$$A = \exp(-b/a) \quad \text{et} \quad k = a.$$

La Fig. 5-1 donne les valeurs du facteur d'échelle (A) et du facteur de forme (k) de la distribution de Weibull estimés par cette méthode, pour Adrar et Hassi Messaoud suivant les huit directions. Remarquons que des résultats similaires ont été obtenus pour les autres stations.

La seconde méthode repose sur la résolution de l'équation (5-3). En effet, les paramètres de Weibull (A) et (k) sont estimés connaissant le moment du premier ordre (μ_1) et le moment du second ordre (μ_2). Dans ce cas, on peut écrire que :

$$A = \frac{\mu_2}{\mu_1} M(k), \quad (5-8)$$

et

$$\frac{\mu_2}{\mu_1^2} = N(k), \quad (5-9)$$

avec

$$M(k) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)} \quad (5-10)$$

et

$$N(k) = \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (5-11)$$

Les équations (5-8) et (5-9) sont alors résolues numériquement en considérant les tables des fonctions Gamma et en procédant par récurrence.

Comme le montre la Fig. 5-2, les valeurs des paramètres A et k obtenues par la méthode des moments sont identiques à ceux trouvés au moyen de la méthode de régression linéaire. Le même type de résultat a été obtenu pour les trente sept stations météorologiques. La méthode de régression linéaire est plutôt facile à mettre en œuvre, mais nécessite la connaissance de toutes les distributions de fréquences des vitesses de vent. En dépit de sa complexité, la seconde méthode utilise seulement les valeurs moyennes expérimentales des moments du premier ordre et du second ordre.

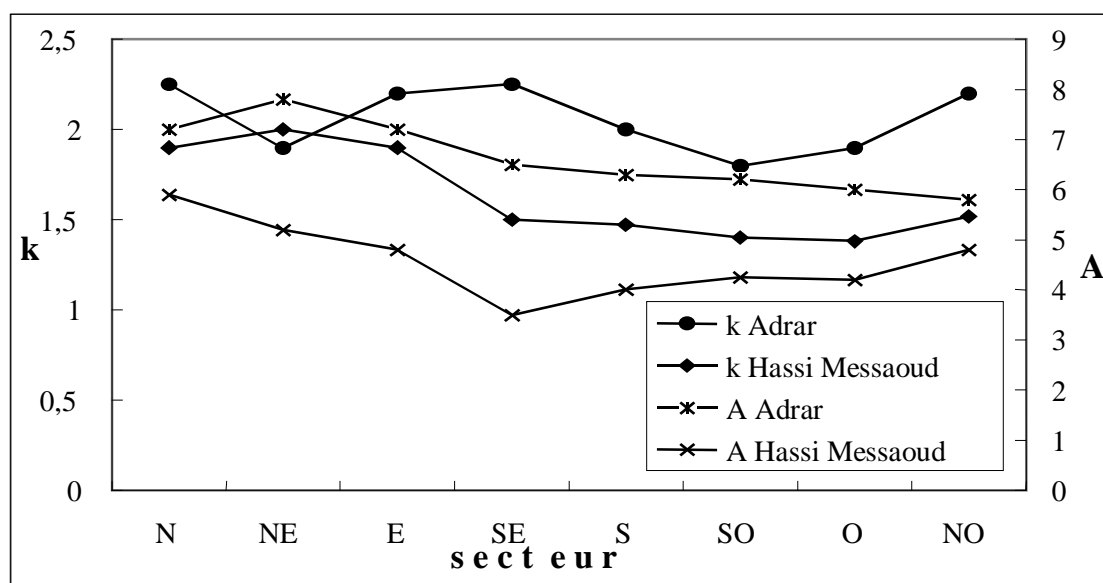


Fig. 5-1. Valeurs de k et de A estimées par la méthode de régression linéaire.

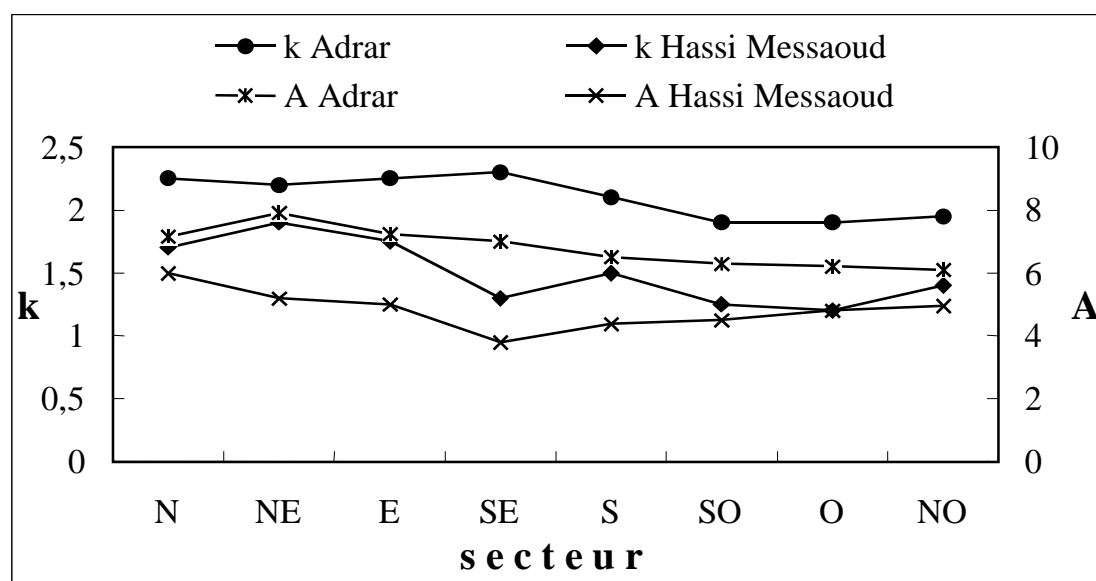


Fig. 5-2. Valeurs de k et de A estimées par les moments du premier et second ordre.

5.2.4 Cartographie du vent

Dans les sites où les mesures de la vitesse du vent et de sa direction n'est pas disponible, il est possible d'estimer les paramètres k et A de la loi de Weibull au moyen de l'interpolation spatiale [Saporta, 1978].

Dans ce but, les valeurs de k et A calculés dans les trente sept stations ont été considérées pour chacune des huit directions. Ensuite la méthode de Kriging a été appliquée pour interpoler les valeurs de k et A pour les points qui se trouvent entre deux stations voisines. Rappelons que la méthode de Kriging est une technique d'interpolation basée sur l'approximation polynomiale [Dixon, 1985]. Pour cela, le logiciel Surfer (Surfer access system version 4.15), a été utilisé pour obtenir l'interpolation géographique des deux paramètres des distributions de Weibull. Il permet de dessiner les contours des iso-valeurs des deux paramètres de Weibull. Les courbes de la Fig. 5-3 montrent les cartes obtenues pour les valeurs moyennes annuelles de k et A .

Compte tenu de la base de données composée de l'ensemble des valeurs k et A estimées précédemment, nous avons réalisé un programme pour simuler la vitesse du vent en un lieu donné et pour une direction donnée.

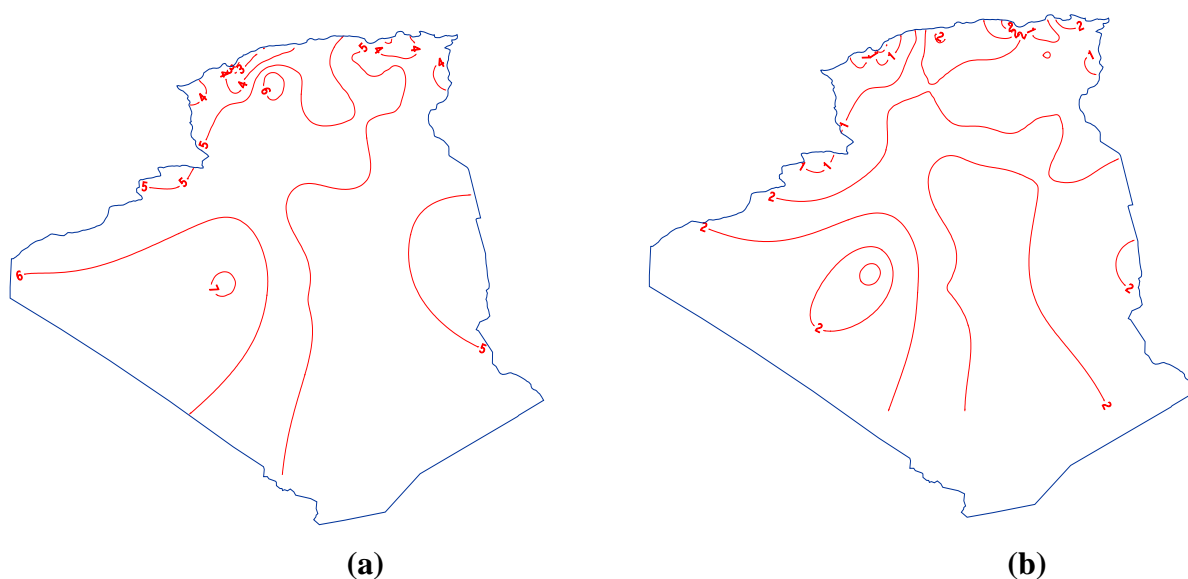


Fig. 5-3. Iso-valeurs de A (a) et de k (b).

Pour ce faire, un nombre aléatoire uniformément réparti est généré et la fonction de distribution de Weibull est simulée connaissant les valeurs de k et de A. Les données simulées ont été reconstituées avec un pas tri-horaire, à partir des valeurs de k et A estimées précédemment. Ces données ont été comparées aux données observées. La Fig. 5-4 donne les distributions de vitesses de vent cumulées observées et simulées pour les stations de Hassi Messaoud et Adrar.

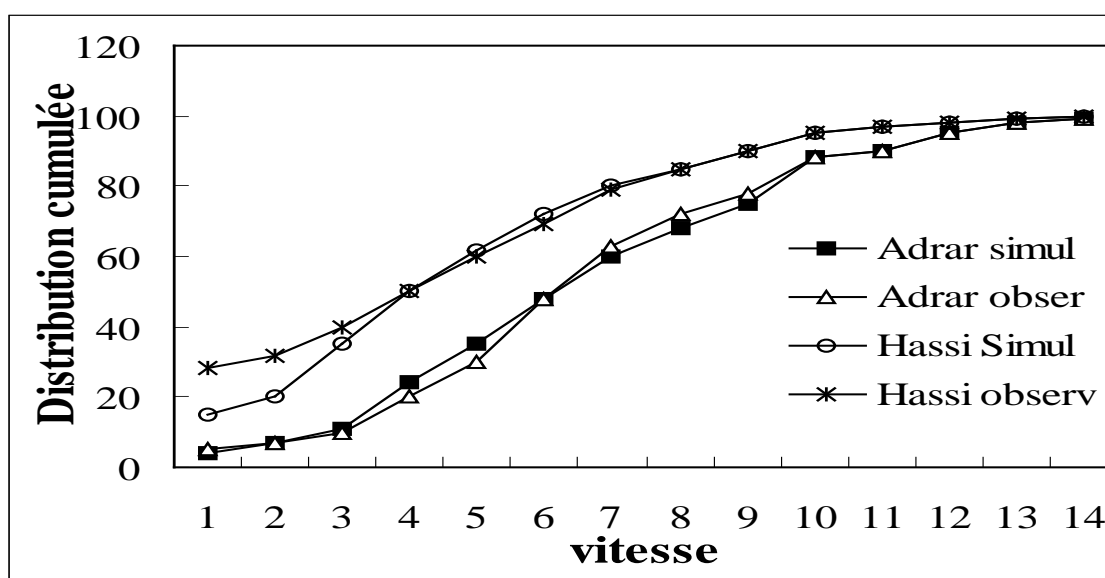


Fig.5-4. Distributions cumulées de la vitesse du vent pour Adrar et Hassi Messaoud.

On voit que les résultats de la simulation sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement. Cette identité des résultats a été constatée pour les autres sites.

En résumé, nous avons montré que la vitesse du vent observée dans trente sept sites de l'Algérie pour les huit directions du vent, c'est à dire N, NE, E, SE, S, SO, O et NO, suivent la loi de Weibull. Pour chacune des stations, l'approche présentée précédemment permet le remplacement d'une base de données volumineuse par uniquement neuf paires de paramètres associées aux huit secteurs et à l'ensemble de tous les secteurs confondus. Grâce aux cartes des paramètres de Weibull, on peut alors reproduire les données tri-horaires de vent en n'importe quel endroit de l'Algérie. De plus, ces résultats vont nous permettre d'identifier les classes de vent prévalant sur le territoire algérien..

5.3 Classification du vent

Nous avons procédé à une classification optimale du vent en Algérie en employant successivement la méthode de Ward et l'algorithme des K-means [Youcef Ettoumi et Adane, 1996 b]. Ces deux méthodes sont basées sur la classification par les nuées dynamiques. Les données de vent à classer sont déduites des paramètres de Weibull caractérisant les mesures de la vitesse du vent dans les trente sept stations de l'Algérie.

5.3.1 Méthode de Ward

Considérons une série de N données à classer en groupes homogènes. Soit G, le nombre de groupes obtenus à partir d'une telle classification. Selon l'approche de Ward, le passage de G + 1 groupes à G groupes dans une classification donnée, est obtenu par minimisation de la variance entre les classes ou variance inter-classes (W) [Ward, 1963]. Celle-ci s'écrit:

$$W = \frac{1}{N} \left[\sum_{g=1}^G \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{N_g} (X_{ijg} - X_{\bullet jg})^2 \right] \quad (5-12)$$

où X_{ijg} est la valeur prise par la variable (j) associée à chaque donnée (i) du groupe g, $X_{\bullet jg}$ est la moyenne de la variable (j) dans le groupe (g) et J est le nombre de variables (j).

Dans le cas de la classification du vent, le nombre (J) inclut le facteur de forme (k) et le facteur d'échelle (A) correspondant aux directions de vent les plus probables. Ceci reste valable dans des applications environnementales. La méthode de Ward est objective et suffisamment représentative des phénomènes étudiés.

5.3.2 L'algorithme K-means

L'algorithme K-means est une procédure non ascendante de classification de données [Dixon, 1985; Kalkstein, 1987]. Il consiste à déplacer les données à partir d'un groupe à un autre jusqu'à ce que la classification déjà établie soit améliorée. Cet algorithme qui est itératif, a la capacité de converger rapidement. Il est basé sur la minimisation de l'inertie intra classes, c'est à dire la variance entre les données du même groupe. Les principales étapes de calcul que comprend l'algorithme, sont les suivantes:

Une classification initiale est considérée.

Le centre de gravité de chacun des groupes constituant cette classification est calculé.

Les groupes sont modifiés de façon que l'inertie intra classes soit minimisée.

Les centres de gravité sont changés éventuellement.

Cette procédure est répétée jusqu'à ce que le transfert des données d'un groupe à un autre ne devienne plus nécessaire.

5.3.3 Sélection des données

Les données à regrouper sont celles enregistrées dans les trente sept stations météorologiques de l'Algérie, mais exprimées en terme de facteurs d'échelle et de forme de la distribution de Weibull pour les huit secteurs de direction. Dans cette approche, seules les deux directions de vent les plus probables sont considérées. En plus, les deux stations météorologiques, Mostaganem et Jijel, sont omises car ce sont deux sites à vents calmes.. En effet, une analyse des propriétés statistiques de l'ensemble des distributions de Weibull a montré que les paramètres de forme et d'échelle de des stations de Mostaganem et de Jijel, sont beaucoup moins importants que les paramètres de Weibull caractérisant les autres stations. Remarquons que leur prise en compte dans l'étude introduirait une trop forte dispersion dans la classification.. La Fig. 5-5 représente l'ensemble des courbes correspondant aux deux principales directions du vent obtenues pour les 35 stations restantes, considérées dans cette étude.

5.3.4 Classification de l'énergie éolienne

La recherche de similarités entre les mesures faites dans les différents sites revient à sélectionner les groupes de données pour lesquels les facteurs de forme et d'échelle de la distribution de Weibull, sont différents. Pour cela, la méthode de Ward a, d'abord, été utilisée pour classer les données expérimentales des différents groupes.

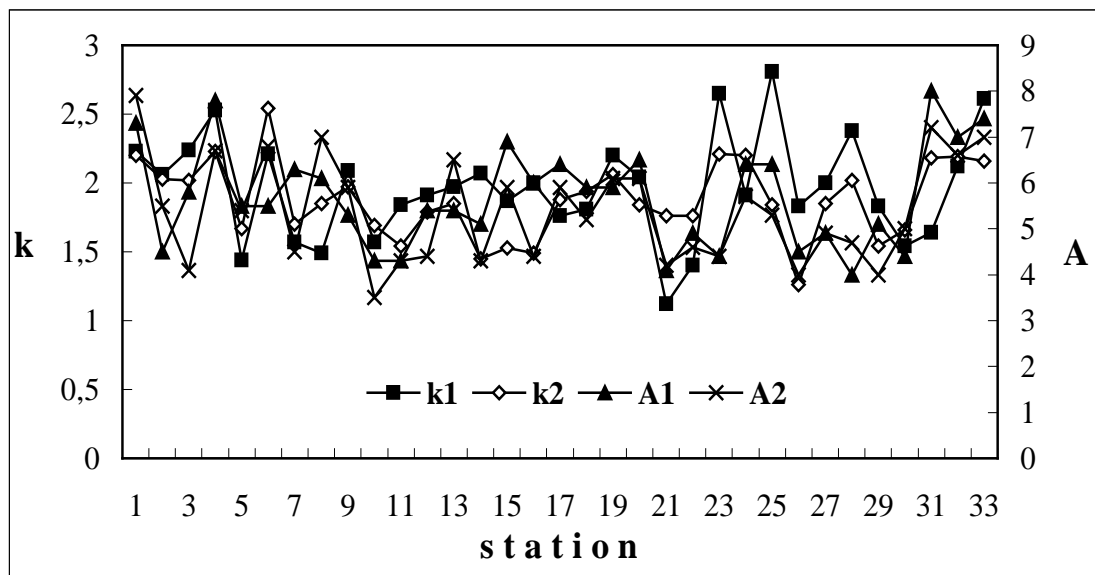


Fig.5-5.Facteurs de forme et d'échelle (k_1 , k_2) et (A_1 , A_2) des distributions annuelles de Weibull obtenues pour les trente cinq sites et relatives aux directions de vent les plus probables.

Ces données sont k_1 , k_2 , A_1 et A_2 qui sont les facteurs de forme et d'échelle correspondant aux deux directions de vent les plus probables des 35 sites d'observations sélectionnés. La classification ainsi obtenue est constituée de trois différents groupes. Ensuite, l'algorithme des K-means a été appliqué afin d'améliorer la classification initialement obtenue. Cette seconde classification n'affecte pas le nombre de groupes car celui-ci reste inchangé. Elle donne une nouvelle répartition des éléments dans les différentes classes. Par conséquent, ceci implique la modification des caractéristiques statistiques de chacune des classes.

La Table 5-1 donne le nombre de données, la moyenne et l'écart type estimés dans chacun des groupes sur la base des données brutes de la première classification et des deux classifications successives respectivement. A travers ces résultats, l'effet de l'algorithme de K-means apparaît clairement. En effet, les données convergent vers leur centre de gravité et l'écart type est minimisé pour chacun des groupes.

La Fig. 5-6 donne la distance intra-classes obtenue à chaque étape de calcul. Comme le montre la Table 5-1, cette distance diminue de façon significative quand le calcul démarre de l'étape initiale, c'est à dire à partir des données expérimentales, et se termine à la classification finale donnant trois groupes homogènes. En effet, l'application de l'algorithme

K-means réduit la distance intra-classes de 1,02 à 0,708. Une telle diminution des distances intra-classes signifie que les groupes obtenus, sont les plus compacts.

Facteurs	Données		1 ^{ère} Classification Méthode de Ward						2 ^{ème} Classification Ward&K-Means					
	N = 35		g ₁ N _g = 12		g ₂ N _g = 13		g ₃ N _g = 10		g ₁ N _g = 18		g ₂ N _g = 12		g ₃ N _g = 5	
	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ	m	σ
K ₁	1,96	0,37	1,85	0,4	1,95	0,32	2,11	0,33	1,89	0,36	1,97	0,35	2,22	0,34
K ₂	1,86	0,29	1,77	0,26	1,75	0,24	2,13	0,2	1,72	0,26	1,93	0,25	2,2	0,03
A ₁	5,67	1,1	4,54	0,36	5,96	0,57	6,63	1,05	4,89	0,5	6,02	0,49	7,62	0,37
A ₂	5,36	1,08	4,52	0,5	4,98	0,76	6,71	0,43	4,42	0,45	5,98	0,54	6,96	0,27

Table 5-1. Paramètres des différents modes de classification des trente cinq stations, pour les directions les plus probables.

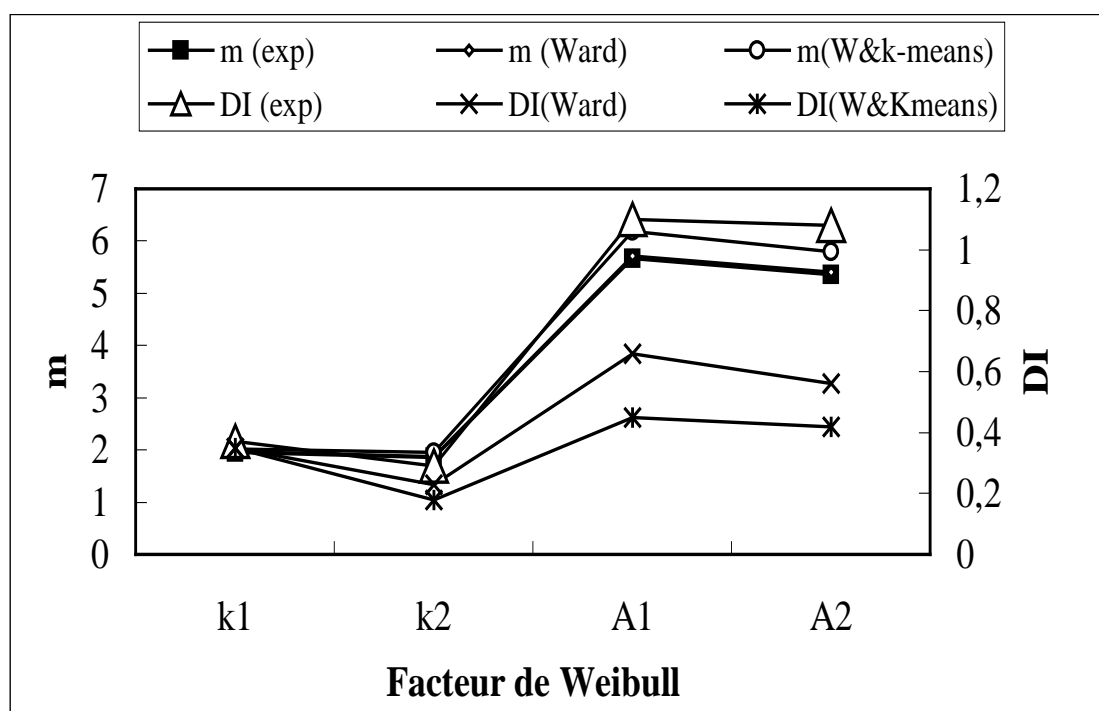


Fig.5-6. Moyennes (m) et écarts type inter-classes (DI) obtenus expérimentalement et estimés par application des algorithmes de Ward ou des K-means (cas des directions les plus probables).

La Fig. 5-7 donne la valeur moyenne de la vitesse du vent relative à chacun des trois groupes pour les deux directions du vent les plus probables. Les trois groupes homogènes ainsi obtenus, correspondent respectivement aux puissances éoliennes faibles, moyennes et élevées respectivement.

Le groupe de puissance faible réunit 52% des stations météorologiques de l'Algérie. Dans ces stations, les moyennes des puissances éoliennes valent respectivement 80 et 96 W/m² pour les directions de vent les plus probables. Le groupe des puissances moyennes comprend 34% des stations et, la puissance éolienne moyenne qui lui correspond, est très proche de 170 W/m². Le groupe des puissances éoliennes élevées n'est composé que de seulement 14% des stations considérées. La majorité de ces stations sont situées dans le Nord de l'Atlas saharien. Dans ces régions, des puissances de 234 et 306 W/m² sont produites, en moyenne, pour les deux directions de vent considérées. Notons que El Goléa, In Aménas et Adrar, sont des stations étalon car elles sont voisines du centre de gravité de leur classe respective. Elles correspondent respectivement au groupe de faible, moyenne et forte puissances.

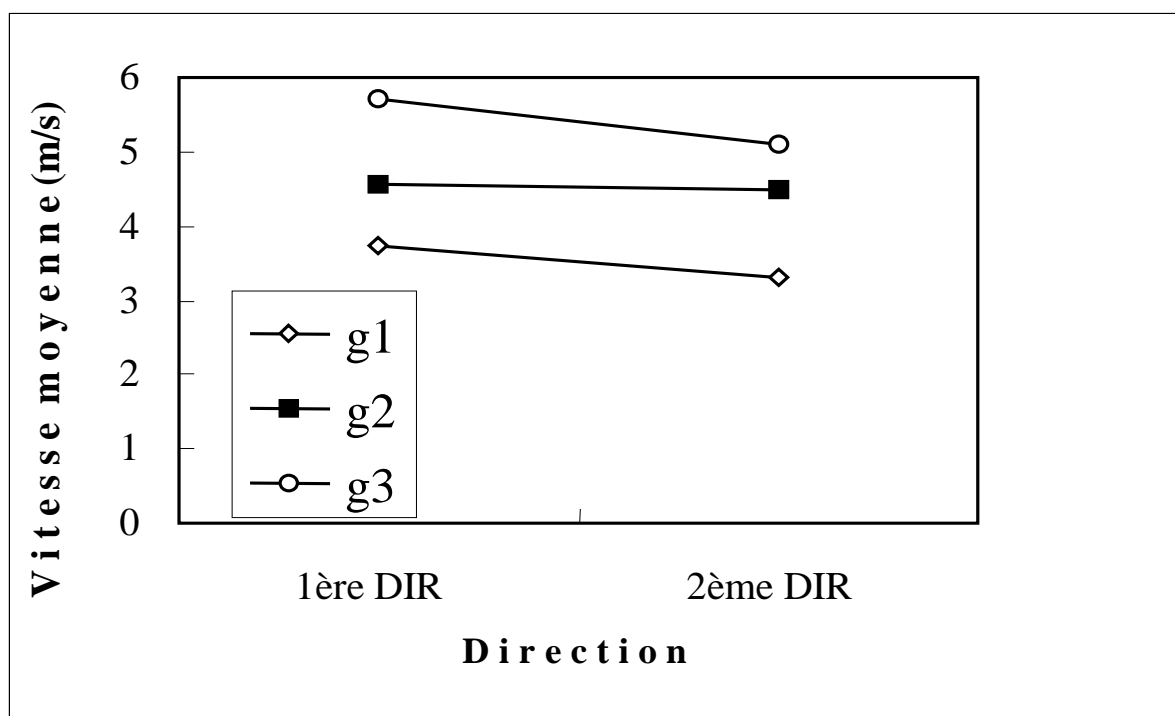


Fig.5-7.Valeur moyenne de la vitesse du vent pour chacun des trois groupes et pour les directions du vent les plus probables.

5.4 Modélisation bivariée du vent pour Es Sénia (Oran)

5.4.1 Distribution de Weibull pour la vitesse du vent

Dans ce paragraphe, nous cherchons à élaborer des modèles appropriés du vent en vue de résoudre des préoccupations spécifiques, telles que la diffusion des polluants dans l'atmosphère. En effet, cette diffusion dépend conjointement de la vitesse du vent et de sa direction. Pour mettre au point de tels modèles, des données tri-horaires de vitesse du vent et de sa direction collectées à Es Sénia (Oran) de 1982 à 1992 ont été considérées. Pour chacun des douze mois de l'année, pour chacun des huit secteurs pris séparément et pour les secteurs confondus, les distributions de Weibull caractérisant les séries chronologiques qui décrivent ces données, ont été déterminées en utilisant la méthodologie présentée au paragraphe 5.2.

Les courbes des Fig. 5-8 et 5-9 donnent respectivement les paramètres de Weibull obtenus pour les différentes directions considérées. Le calcul du coefficient de corrélation liant les données expérimentales et les données issues de la distribution de Weibull, montre que ce coefficient avoisine l'unité. Un test d'adéquation basé sur le test de Kolmogorov-Smirnov a ensuite été effectué confirmant que les données expérimentales sont bien ajustées par des distributions de Weibull. Notons que les séries temporelles issues des données de la vitesse du vent et de sa direction sont marquées par une tendance à la stabilité, suivie de changements brusques. Ce caractère est celui de processus formés d'états successifs dépendant les uns des autres. Compte tenu de cette caractéristique, certaines études ont montré que les processus autorégressifs ou la combinaison de ces derniers avec des chaînes de Markov pouvaient décrire de telles séries [Daniel et Chen, 1991; Albar et Yousif, 1991; Hasan, 1992; Rehman S, Halawani, 1994; Nfaoui *et al*, 1996; Tsekos et Anastasiou, 1996; Garcia, 1998; Castini *et al*, 1998; Youcef Ettoumi et Adane, 1999; Sen, 2000]. Aussi, nous avons élaboré une approche qui consiste à combiner la représentation des données de vent par des distributions de Weibull avec celle reposant sur des chaînes de Markov. Cette approche est présentée ci-après.

5.4.2 Modèle basé sur les chaînes de Markov du premier ordre

Considérons une série de données du vent collectées toutes les trois heures. Soit n , le nombre d'intervalles de trois heures observé à l'instant t et soit X_n une variable aléatoire qui peut prendre les valeurs suivantes $0, 1, \dots, n, \dots, k - 1$ à l'instant t [Ross, 1982; Stewart, 1994]. Ces valeurs représentent k états possibles du phénomène étudié. Ces états étant corrélés, ils

forment un processus de Markov du premier ordre à k états pour lequel une transition d'un état (i) vers un état (j) se fait avec la probabilité de transition P_{ij} . Cette probabilité s'écrit :

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = j / X_n = i) \quad (i=1,k) \text{ et } j=1,k \quad (5-13)$$

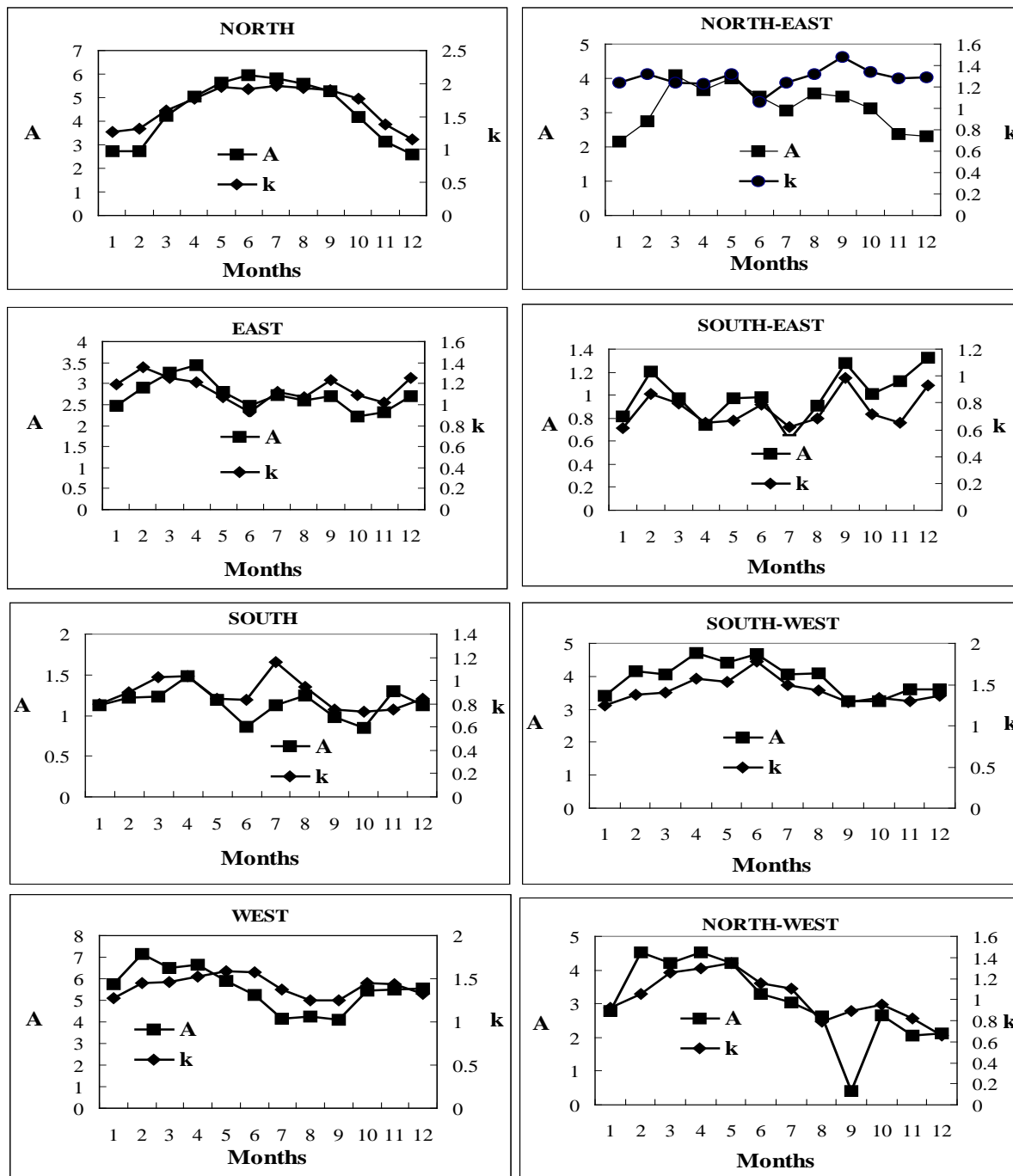


Fig. 5-8. Paramètre d'échelle (A) et du facteur de forme (k), pour chacun des huit secteurs: N

NE, E, SE, S, SO, O et NO.

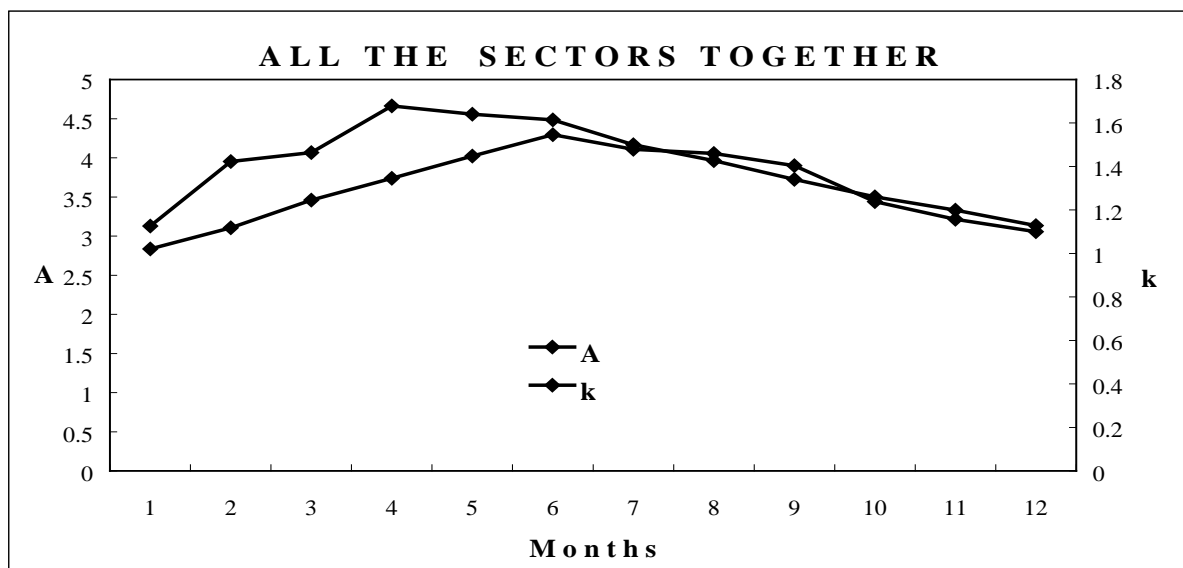


Fig. 5-9. Paramètre d'échelle (A) et facteur de forme (k) pour tous les secteurs réunis.

L'ensemble des transitions possibles est décrit par la matrice de transition de Markov (M) de dimensions (k x k) :

$$M = [P_{ij}] \quad (5-14)$$

Les probabilités P_{ij} sont déterminées par maximum de vraisemblance. Soit :

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i} \quad (5-15)$$

n_{ij} est le nombre d'occurrences de la succession « $i \rightarrow j$ », n_i est le nombre d'occurrences de l'état i dans l'échantillon de données considéré.

En se basant sur les propriétés ergodiques des chaînes de Markov, il faudrait tester leur aptitude à décrire des situations réelles à long terme. En régime stationnaire, deux types de probabilité sont calculés pour les différents états, puis comparés entre elles. En effet, les probabilités à long terme sont évaluées à partir des probabilités de transition. Parallèlement les probabilités à priori se déduisent de l'observation. En régime stationnaire, l'égalité de ces deux types de probabilités permet de valider les modèles basés sur les chaînes de Markov. Les probabilités markovienne obtenues à long terme, sont:

$$P(X_t = i) \quad (5-16)$$

Ces dernières dépendent des probabilités de transition. En pratique, elles s'obtiennent en déterminant le vecteur propre S du système matriciel suivant :

$$SM = S \quad (5-17)$$

La résolution de ce problème revient à dire qu'au bout d'un temps suffisamment long, la probabilité d'avoir l'état (i) ne dépend plus de l'état initial.

Les probabilités à priori pour que X_t se trouve à l'état i, sont estimées, en faisant:

$$P_i = \frac{n_i}{N} \quad (i = 0, 1, \dots, k) \quad (5-18)$$

N est l'effectif du mois considéré.

Le degré de liaison de deux observations séparées par un intervalle de trois heures, est mesuré par le coefficient d'autocorrélation qui est :

$$C_n = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{k=1}^k i.k.P(X_j = i)P_{ik}^{(n)} - \left(\sum_{i=1}^k i.P(X_j = i) \right)^2}{\sum_{i=1}^k i^2.P(X_j = i) - \left(\sum_{i=1}^k i.P(X_j = i) \right)^2} \quad (5-19)$$

C_n , $(P_{ik})^{(n)}$ et $P(X_j = i)$ sont respectivement le coefficient d'autocorrélation d'ordre n, l'élément (ik) de la matrice M^n et la probabilité markovienne à long terme.

Pour apprécier la qualité d'une telle modélisation, les chaînes de Markov du premier ordre à k états ont été assimilées à un système de codage de l'information. Le calcul de l'entropie nous renseigne sur la quantité d'information transmise par les chaînes de Markov. L'entropie relative est définie par :

$$H_n = \frac{\sum_{i=1}^k P_i \cdot \text{Log}_2 P_i}{\text{Log}_2(1/k)} \quad (5-20)$$

5.4.3 Modélisation temporelle de la vitesse du vent par des chaînes de Markov

De par sa nature, la vitesse du vent peut être caractérisée convenablement par des processus stochastiques. Des études antérieures montrent que la vitesse du vent se prête bien à une discrétisation en plusieurs états [Youcef Ettoumi et Adane, 1999]. On définit un état, par l'ensemble des valeurs de la vitesse $V(i)$, qui réapparaît fréquemment et se traduit par des effets climatiques semblables. L'identification des états météorologiques peut se faire en construisant les histogrammes des fréquences de la vitesse du vent à l'aide des données de vitesse du vent, pour un mois et un secteur de direction donné. Ceci revient à ordonner

l'ensemble des valeurs prises par la variable météorologique dans le sens croissant, avec un pas de 1m/s. L'analyse des histogrammes issus de ce calcul, montre d'une part, l'abondance des valeurs faibles et des valeurs moyennes de la vitesse du vent et, d'autre part, une faible concentration vers les fortes valeurs et ce pour tous les mois. Les données $V(i)$ de la vitesse du vent peuvent être classées en trois catégories correspondant respectivement à des vitesses faibles, moyennes et fortes. Elles s'identifient dans l'ordre aux trois états météorologiques suivants: vent faible, vent moyen et vent fort. D'où, une discrétisation de la vitesse du vent en trois états, réalisée en considérant deux seuils $Sg1$ et $Sg2$. Dans le cas du site d'Oran (Es Sénia), on a $Sg1 = 3\text{m/s}$ (10,8 km/h) et $Sg2 = 8\text{m/s}$ (28,8 km/h) et les trois états sont :

$$\text{état '1'} \quad 0 < V(i) \leq Sg1$$

$$\text{état '2'} \quad Sg1 < V(i) \leq Sg2$$

$$\text{état '3'} \quad V(i) > Sg2$$

Les diagrammes de la Fig. 5-10 illustrent les variations annuelles des diverses probabilités de transition caractérisant la vitesse du vent assimilée à un processus de Markov du premier ordre à trois états. D'après ce réseau de courbes, nous constatons que l'état 1, correspondant aux vents faibles, est prédominant et que les moins fréquents sont les vents de grande vitesse. La validation du modèle est effectuée sur la base des probabilités markoviennes à long terme et des probabilités à priori issues de l'observation. Les diagrammes de Fig. 5-11 montrent que ces deux types de probabilité sont identiques, pour chacun des trois états et tout au long de l'année. Les valeurs des coefficients d'autocorrélation et de l'entropie confirment la validité du modèle markovien ainsi obtenu. La Fig. 5-12 montre l'évolution des coefficients C_1 , C_2 et C_3 au cours de l'année. Ces courbes mettent en évidence la forte corrélation qui existe entre les états successifs et donc, la persistance du phénomène. C_1 vaut en moyenne 0,5 et décroît lorsque l'ordre du coefficient d'autocorrélation augmente. Nous nous sommes également intéressés à la quantité d'information transmise par une chaîne de Markov du premier ordre à trois états. La courbe de la Fig. 5-13 montre que l'entropie est presque constante au cours de l'année. Elle est minimale au mois de Janvier (75 %) et maximale au mois de Mai (89 %). D'après les résultats obtenus, les chaînes de Markov du premier ordre à trois états décrivent convenablement les variations de la vitesse du vent et le phénomène est très persistant, car on observe un effet de mémoire évalué à 9 h pour certains mois .

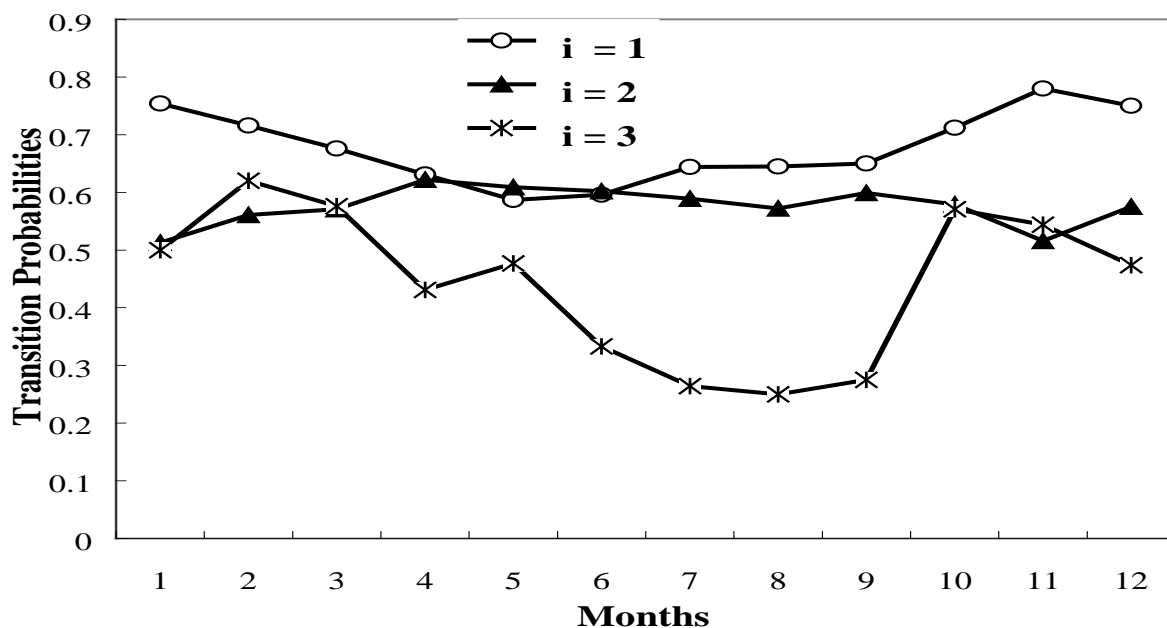


Fig. 5-10. Probabilité de transition (P_{ii}) des données mensuelles de la vitesse du vent (avec $i = 1, 2$ ou 3 et $i =$ secteur i).

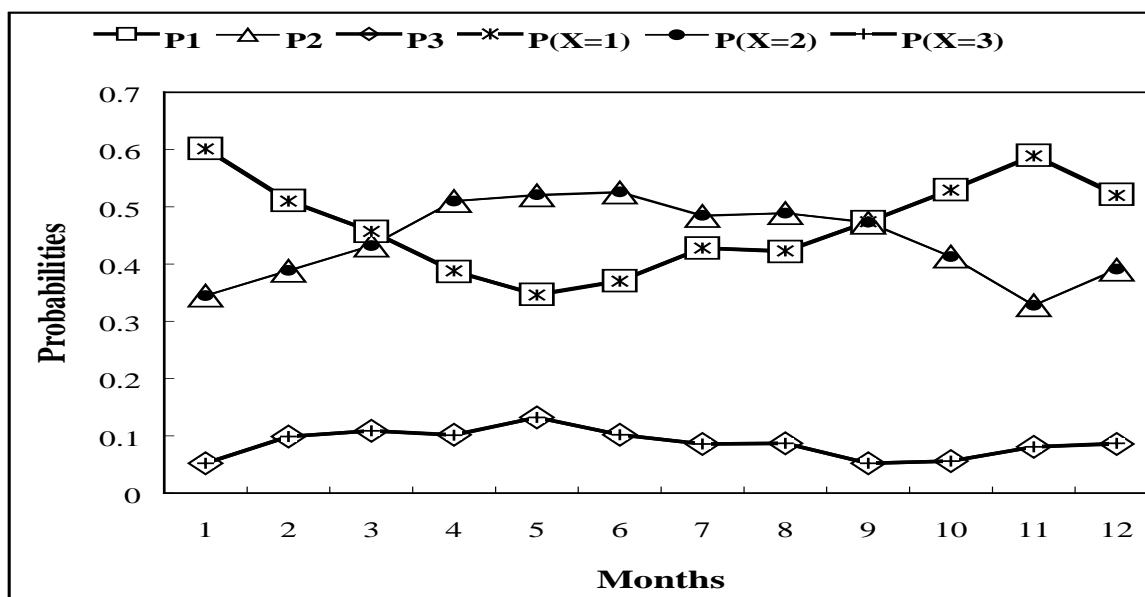


Fig. 5-11. Probabilités à priori P_i et probabilités markoviennes à long-terme $P(X=i)$ pour les données mensuelles du vent (avec $i=1, 2$ et 3 . i représente le secteur i).

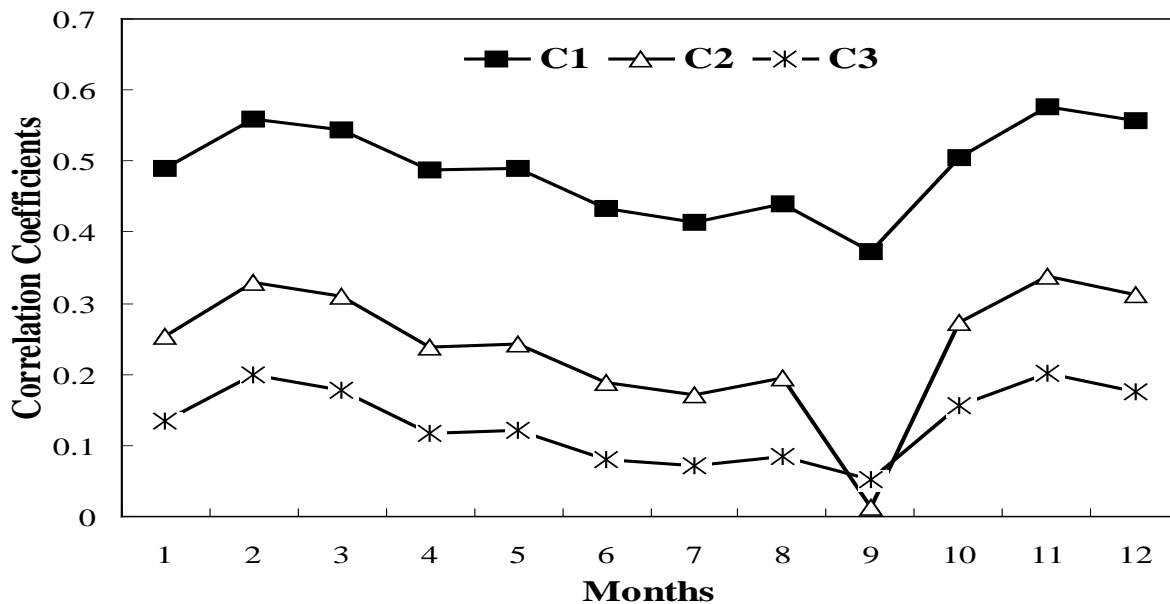


Fig. 5-12. Coefficients de Corrélation pour les données mensuelles de vitesse du vent. C_1 , C_2 et C_3 sont les coefficients de corrélation, quand deux observations sont séparées de trois, six et neuf heures respectivement.

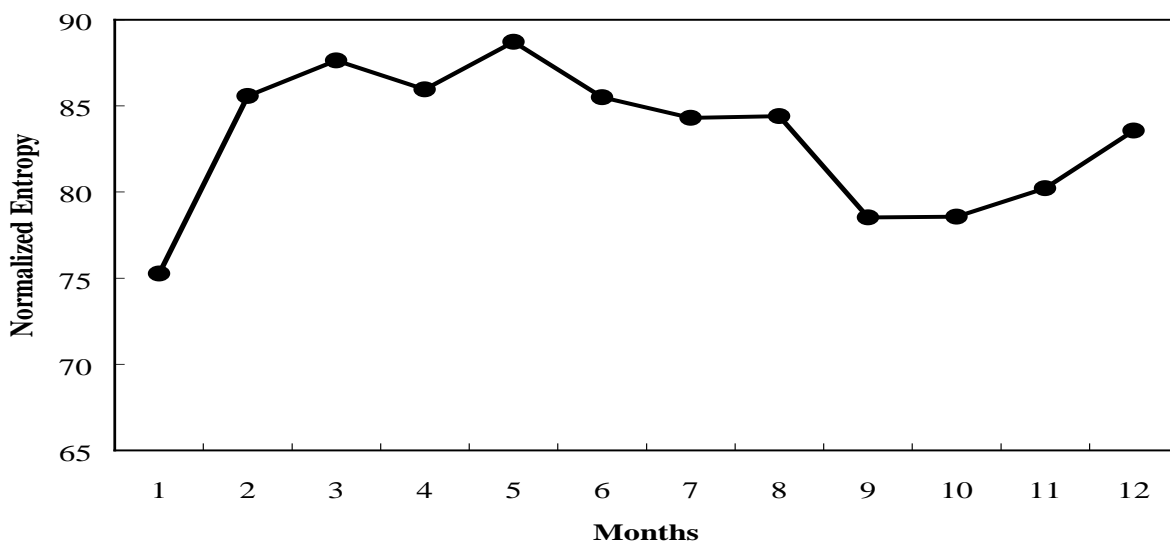


Fig.5-13. Entropie relative des données mensuelles de vitesse du vent.

5.4.4 Description de la direction du vent par les chaînes de Markov

Compte tenu de ses variations brusques et de sa persistance, la direction du vent peut être représentée par des chaînes de Markov du premier ordre à plusieurs états [Youcef Ettoumi et Adane, 2000 b]. En fait, dans une station météorologique, l'instrumentation de mesure procède à l'acquisition de la direction du vent en degrés. Seulement, on parle couramment d'un vent en provenance du Nord ou d'une autre direction. Donc, la direction se prête aisément à la discrétisation en états. La répartition de la direction du vent la plus usitée se fait selon huit secteurs de direction auxquels on peut ajouter un cas représentant l'absence de vent. Aussi, la représentation de la direction du vent se fera par des chaînes de Markov du premier ordre à neuf états. Des relations simples, utilisées par les météorologues, permettent le passage de la direction du vent, exprimée en degrés, à l'un des états 0, 1, 2, ..., 8 correspondant respectivement aux vents calmes, aux vents du Nord (N), aux vents du Nord-Est (NE), aux vents de l'Est (E), aux vents du Sud-Est (SE), aux vents du Sud (S), aux vents du Sud-Ouest (SO), aux vents de l'Ouest (O) et aux vents du Nord-Ouest (NO).

5.4.4.1 Regroupement en une classe

L'échantillon pris en compte dans l'identification du modèle de Markov est constitué par l'ensemble des données tri-horaires des mois de même nom, cumulées sur la totalité de la période d'étude. Dans ce cas, les chaînes de Markov qui décrivent les variations de la direction du vent, forment un processus homogène et les paramètres du modèle mensuel sont invariants en fonction du temps. Avec cette représentation, les observations sont confondues en un seul sous-ensemble et la variabilité tri-horaire se produisant au cours de la journée ne peut pas être mise en évidence.

5.4.4.2 Regroupement en quatre classes

Les observations d'un mois donné, cumulées sur la période d'étude, ont été réparties en quatre échantillons relatifs aux intervalles de temps suivants : 0 h à 6 h, 6 h à 12 h, 12 h à 18 h et 18 h à 24 h. Puis, les matrices de transition M1, M2, M3 et M4 associées respectivement à chacune des quatre classes d'échantillon, ont été estimées par maximum de vraisemblance. Pour chacun des douze mois de l'année, la direction du vent est décrite par un processus de Markov inhomogène. En effet, cette représentation introduit une variabilité des paramètres des chaînes de Markov au cours de la journée.

5.4.4.3 Résultats

La Fig. 5-14 donne les valeurs des probabilités de transition p_{ij} formant respectivement les différentes matrices M1, M2, M3 et M4. De même, la Fig. 5-15 indique les valeurs des paramètres P_{ii} de la matrice M pour certains mois de l'année pris comme exemple, lorsque les données tri-horaires sont regroupées en une seule classe mensuelle. Pour cette représentation, on trouve que les probabilités markoviennes à long terme sont très proches des probabilités à priori (voir Fig. 5-16). Donc, les chaînes de Markov du premier ordre à neuf états décrivent bien les variations de la direction du vent. Nous avons également comparé les matrices $(M1 \times M2 \times M3 \times M4)$ et M^8 , correspondant toutes les deux au passage de la direction du vent de l'état i à l'état j en 24 heures, mais lorsqu'on tient compte de la variabilité journalière du processus ou lorsqu'on ignore celle-ci. L'application d'un test χ^2 à huit degrés de liberté à ces deux matrices, a montré que celles-ci sont identiques à 0,01 près. Ce résultat signifie qu'à long terme, le processus étudié devient homogène et peut être décrit par des chaînes de Markov. Le coefficient d'autocorrélation a été calculé dans le cas où deux observations successives sont séparées l'une de l'autre d'un intervalle de temps égal à 3 h, 6 h ou 9 h. La Fig. 5-17 représente les variations du coefficient d'autocorrélation au cours du temps. Ce coefficient est non nul mais décroît en fonction du temps. Un tel résultat met en évidence l'effet de persistance du vent. L'entropie relative a également été calculée. D'après la courbe de la Fig. 5-18, la perte d'information introduite par le modèle de Markov est, en moyenne, de 11% pour l'ensemble des mois de l'année. Ce résultat confirme que les variations de la direction du vent à Oran, sont décrites avec une précision acceptable.

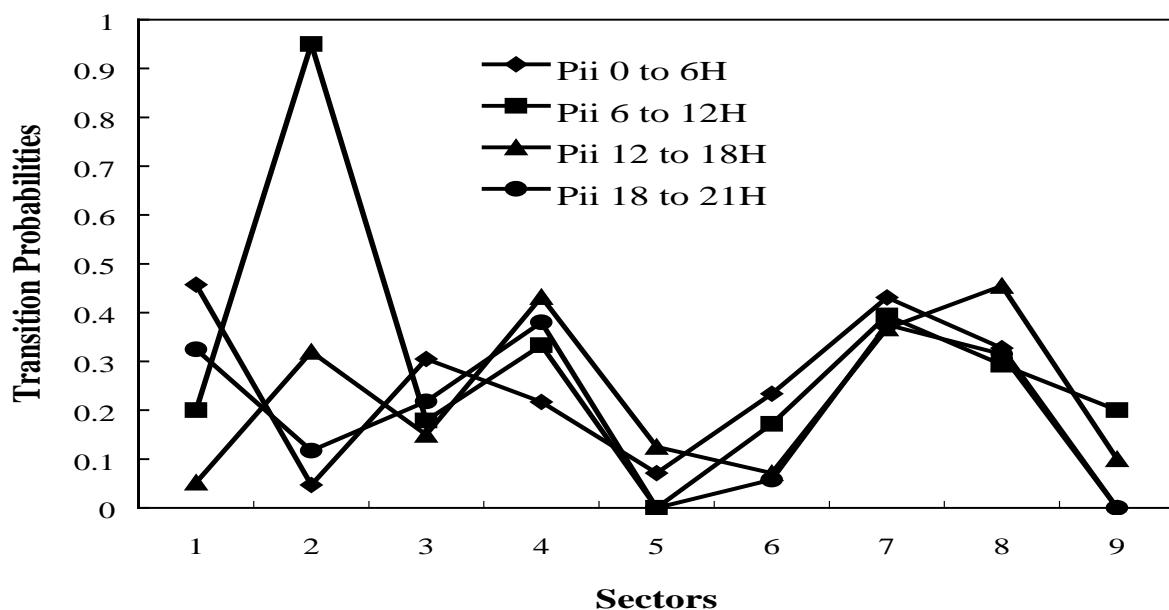


Fig. 5-14. Probabilités de transition quand les données mensuelles de la direction du vent sont réparties en quatre classes (avec i allant de 1 à 9).

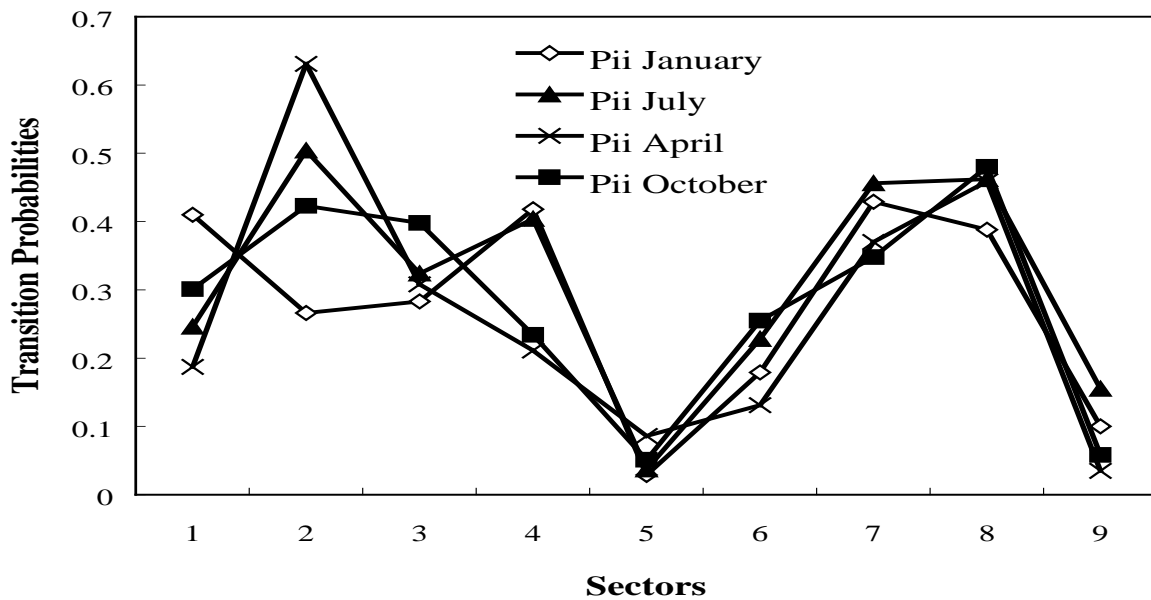


Fig. 5-15. Probabilité de transition estimée sur la base de données mensuelles de la direction du vent regroupées en une même classe.

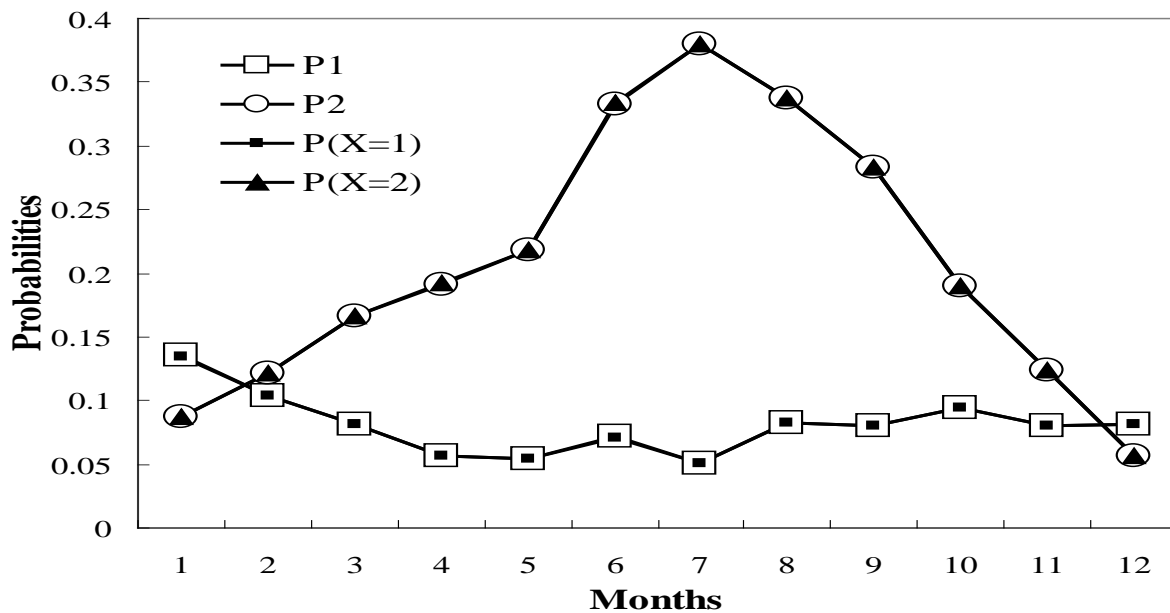


Fig. 5-16 Probabilité à priori (P_i) et probabilité markovienne à long-terme $\{P(X=i)\}$ pour les données mensuelles de la direction du vent (i représente le secteur i).

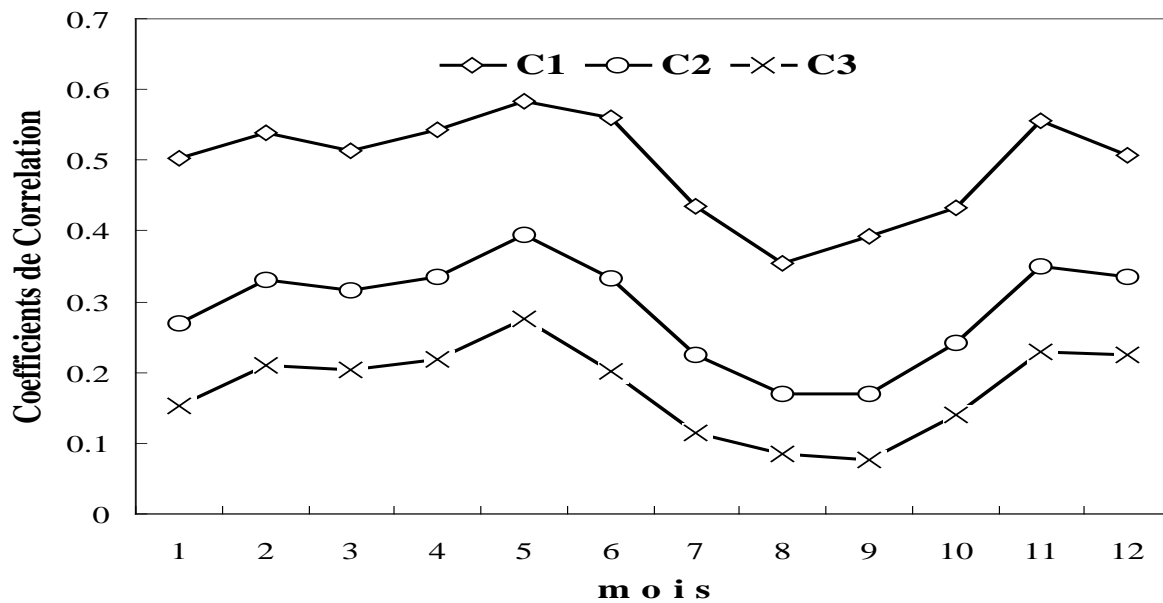


Fig. 5-17. Coefficients de Corrélation pour les données mensuelles de direction du vent. C₁, C₂ et C₃ sont les coefficients de corrélation, quand deux observations sont séparées de trois, six et neuf heures respectivement.

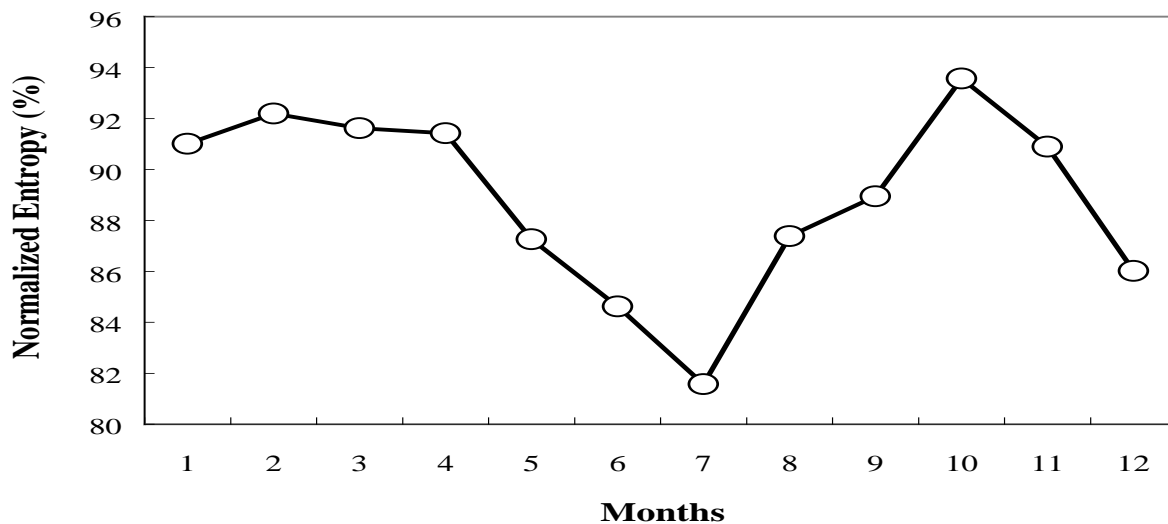


Fig. 5-18. Entropie normalisée pour les données mensuelles de la direction du vent.

5.5 Discussion

Les distributions de Weibull évaluées pour trente sept stations météorologiques de l'Algérie, ajustent très bien les séries tri-horaires de données expérimentales et reproduisent convenablement les propriétés statistiques du vent.

Ces résultats sont conformes à ceux obtenus dans d'autres parties du Monde [Sahin et Aksakal, 1998; Hillring et Krieg, 1998; Zekai, 2000]. Ils signifient que pour une direction donnée, la distribution statistique du vent est régie par la loi de Weibull.

La cartographie des paramètres de Weibull que nous avons établie par interpolation polynomiale, rend possible une reconstitution assez précise de la vitesse du vent pour n'importe quel endroit de l'Algérie et quelle que soit la direction considérée. Cependant, l'interpolation polynomiale cause une incertitude qui dépend fortement de la nature du relief de la région où doit être évaluée la vitesse du vent. En effet, cette erreur varie entre 5 et 30 % quand on va du Sud au Nord de l'Algérie. Elle est liée au fait que le Sud algérien formé, pour une grosse part, du désert du Sahara, est un sol quasiment uniforme alors que le Nord est une région à relief tourmenté et le plus souvent montagneuse.

La classification basée sur les algorithmes de Ward et des K-means que nous avons élaborée, a permis de décomposer le territoire algérien en zones homogènes correspondant respectivement à différentes forces du vent. Cette classification a montré que les ressources éoliennes sont très importantes surtout dans le Sud Ouest de l'Algérie. Aussi, cette région convient tout à fait à l'exploitation de la conversion d'énergie éolienne.

De façon générale, la classification de l'énergie éolienne déduite de la cartographie des paramètres de Weibull, nous informe sur l'importance du potentiel d'énergie éolienne disponible en Algérie. D'après cette étude, le Nord du Sahara est le mieux adapté à l'implantation de systèmes de conversion de l'énergie éolienne, car la puissance éolienne est maximale dans une telle région.

Les résultats de ce chapitre ont également mis en évidence le caractère markovien de la vitesse et de la direction du vent. En effet, la vitesse du vent mesurée à Es Senia (Oran), a été représentée par une chaîne de Markov du premier ordre à trois états tandis que la direction du vent a été modélisée par des chaînes de Markov du premier ordre à neuf états décrivant soit un processus homogène, soit un processus inhomogène. La description par une chaîne de Markov inhomogène permet de rendre compte de la variabilité horaire de la direction du vent observée à l'échelle de la journée alors que la représentation par une chaîne de Markov

homogène nous informe convenablement sur le comportement à long terme du processus étudié.

Les processus markoviens ainsi identifiés, sont caractérisés par un coefficient d'autocorrélation non nul. Pour la direction du vent, une analyse des variations de ce coefficient au cours du temps, fait apparaître que l'état présent dépend de manière significative des trois états successifs immédiatement antérieurs. Ces résultats montrent que le vent est un phénomène persistant à l'échelle tri-horaire et que sa direction reste, dans la plupart des cas, dans le même état pendant 9 h. Cet effet de mémoire de la direction du vent implique que celle-ci doit être un processus markovien du troisième ordre. Cependant, nous avons trouvé que l'approximation du premier ordre suffit pour rendre compte des variations de la direction du vent. En effet, les améliorations que pourrait apporter une modélisation par des chaînes de Markov du second ordre ou du troisième ordre, sont minimes et sont obtenues au prix de calculs inextricables et inutiles du point de vue pratique.

La génération synthétique de séries chronologiques de données tri-horaires du vent, est rendue possible grâce à la représentation de la vitesse par une chaîne de Markov du premier ordre à trois états et de la direction du vent par une chaîne de Markov du premier ordre à neuf états. En pratique, nous avons pu reconstituer plus facilement les données du vent en modélisant la vitesse du vent par une distribution de Weibull et la direction du vent par une chaîne de Markov du premier ordre à neuf états [Youcef Ettoumi *et al.* 2001 d].

L'intérêt de l'analyse basée sur les chaînes de Markov, est celui de la conception, du dimensionnement et de la gestion optimale des systèmes utilisant l'énergie éolienne. En effet, pour évaluer les performances et le comportement *in situ* de ces systèmes, il est nécessaire de connaître les caractéristiques du vent ou du moins de simuler les séries chronologiques de données à l'endroit où le système est appelé à fonctionner. Cette analyse effectuée en considérant les données collectées dans la région d'Oran, peut aussi être étendue à l'ensemble des stations météorologiques du réseau algérien.

CHAPITRE 6

6. Zonage climato-énergétique : Application à la classification en types de temps

Tout projet portant sur le développement des énergies renouvelables est lié à la climatologie du lieu. Ici nous avons élaboré une méthode de zonage climato-énergétique. Celle-ci est basée sur le choix des grandeurs météorologiques les plus sensibles à l'être humain. Elle a été appliquée à la recherche d'une classification en types de temps pour l'Algérie. A titre de comparaison, le système de classification de Köppen a été appliqué aux stations étalon qui résultent du zonage climato-énergétique.

6.1 Généralités

Comme nous l'avons vu au premier chapitre, ce sont des relevés d'éléments météorologiques, tels que la température, le vent, la pression, l'humidité et les précipitations qui permettent de caractériser l'état de l'atmosphère. Le climat apparaît alors comme une notion synthétique complexe et peut être considéré comme étant la succession des états atmosphériques observés au cours d'une période suffisamment longue.

De façon générale, les buts essentiels de la climatologie sont:

L'analyse complète des éléments météorologiques qui déterminent le climat.

La recherche des causes qui expliquent les différents climats et les fluctuations qui les accompagnent.

L'étude de l'action du climat sur les êtres vivants, les animaux, les matériaux, le sol, les techniques et les activités économiques et même sociales.

Les applications de la climatologie sont diverses :

Associée à la pratique agricole, on parlera de climatologie agricole.

Associée à la biologie, on parlera de bioclimatologie.

Associée à l'agronomie, on traitera la question en écologie et en pédologie.

Associée à la navigation aérienne et à la pêche, c'est la climatologie maritime, dont il sera question.

Etroitement liée à l'hydrologie, on parlera d'hydrométéorologie qui englobe naturellement l'hydroclimatologie.

Les paramètres météorologiques généralement utilisés dans les classifications climatiques, sont dits paramètres sensibles [Jones *et al.* 1997]. Ce sont surtout des paramètres qui véhiculent des sensations que l'on peut percevoir [Atick, 1992]. Par exemple, la sensation « du chaud et du froid » est perceptible directement par le toucher et l'odorat. « Un soleil assommant » peut avoir des conséquences directes sur un individu. « Un excès d'humidité peut être étouffant ». Par ailleurs, une brise, un vent soit chaud, soit froid, ou encore glacial et pour ainsi dire, toutes les variétés de vent, peuvent être également perçues par l'être humain. C'est pourquoi, les paramètres que nous avons retenus sont en liaison avec ces sensations perceptibles à la fois de climat et d'énergie. Ce sont le rayonnement solaire, la température, le vent et l'humidité. Ce choix peut également être justifié aussi bien par la disponibilité de séries fiables que par la bonne répartition des points de mesures à travers toute l'Algérie. C'est pourquoi partant d'un ensemble de séries chronologiques de quelques éléments

météorologiques, nous voulons donner à l'Algérie une certaine individualité climatique à l'échelle de la région. A cet effet, nous avons considéré les mesures de l'insolation, du vent moyen, de la température moyenne, de la température minimale, de la température maximale, de l'humidité moyenne, de l'humidité minimale et de l'humidité maximale, collectées pendant la période de 1981/95 dans 32 stations météorologiques réparties sur le territoire algérien. Ces stations sont celles qui se distinguent par une étoile dans la Table. 1-1.

La procédure que nous avons adoptée, est une classification regroupant des stations ayant des caractéristiques climato-énergétiques similaires. Dans cette recherche d'une classification en types de temps, les méthodes multifactorielles ont été considérées. Ceci revient à faire subir un traitement statistique adéquat aux grandeurs météorologiques mesurées dans les différentes stations. Les méthodes multifactorielles permettent de résumer l'information contenue dans un grand tableau de données, qui à l'état brut serait difficilement exploitable [Stern *et al.*, 1999]. C'est le principe même de la classification en composantes principales ou ACP [Morrison, 1976 ; Barnston, 1987]. Cependant, avec ce type de classification, il faut admettre une perte relative d'information mais un gain conséquent en lisibilité.

De même que pour l'analyse en composantes principales (ACP), la classification automatique est utilisée en prévision climatique dans le but de cibler le prédictant dans l'espace. Ceci revient à effectuer une régionalisation du prédictant en regroupant en classes homogènes des données dont les identités ne sont pas connues. Dans cette méthode, on utilise plutôt le degré de similarité et de dissemblance entre les variables à étudier. Cette analyse a déjà été utilisée en météorologie dans le but de rassembler les observations météorologiques journalières en types de temps, de regrouper les régions homogènes de l'océan tropical en considérant les observations de bateaux et de définir les régions climatiques basées sur les données climatiques de surface. La classification automatique tout comme l'analyse en composantes principales est un outil statistique d'analyse descriptive.

Pour identifier les différents types de climat que l'on peut rencontrer en Algérie, nous avons donc adopté une classification en composantes principales, assortie d'une classification automatique. Le but recherché est une classification de l'Algérie en zones homogènes et une identification de stations étalons caractérisant le type de temps de chaque zone homogène. Ces méthodes de classification seront présentée ci-après.

Remarquons qu'au-delà de la météorologie au jour le jour, la climatologie descriptive consiste en une analyse spatio-temporelle quantitative des variables météorologiques qui

caractérisent le climat d'un lieu ou d'une région. A titre de comparaison, nous appliquerons la classification de Köppen aux stations étalon identifiées par zonage climato-énergétique.

6.2 Méthodologie

6.2.1 Analyse en composantes principales

L'ACP est une transformation optimale permettant de condenser au mieux une information contenue dans une base de données où il peut y avoir une grande dispersion. Elle consiste à définir k nouvelles variables à partir de combinaisons linéaires des n variables initiales qui feraient perdre le moins d'information possible par rapport à l'information totale. Ces nouvelles variables sont appelées composantes principales. Les axes qu'elles déterminent sont les axes principaux. Dans ce genre d'analyse de données, la variance constitue une mesure de l'inertie. Aussi, l'ACP consistera donc à rechercher les directions de variance maximale.

6.2.1.1 Principe de l'ACP

Soit une population de p éléments ou individus. Pour chacun de ces individus, nous disposons d'un nombre n d'observations. Dans l'analyse en composantes principales, chacune de ces observations constitue quant à elle, une variable. Ainsi, nous devons prendre en compte n variables par individu, avec $n > 1$. L'approche statistique multifactorielle est alors une analyse des données dans leur ensemble, en tenant compte simultanément de toutes les variables. D'où, l'intérêt d'une telle méthode car elle permet l'étude de données multidimensionnelles, lorsque toutes les variables observées sont de type numérique et que l'on veut voir s'il y a des liens entre ces variables.

Une interprétation admise de l'ACP repose sur la représentation des données initiales à l'aide de nuages de points dans un espace géométrique. L'objectif est alors de trouver des sous-espaces (droite, plan,...) qui représentent au mieux le nuage initial.

6.2.1.2 Matrice de données

Soit $Y=[Y^1, \dots, Y^n]$, un vecteur à n variables quantitatives observées sur p individus de poids w_i et soit x_i^j , la mesure de la variable Y^j effectuée sur le $i^{\text{ème}}$ individu, avec $i = 1, \dots, p$ et $j = 1, \dots, n$. Ces mesures sont alors regroupées dans une matrice x de dimensions (pxn) .

6.2.1.3 Méthode

Les principales étapes de la méthode que nous avons utilisée, sont :

La représentation graphique optimale des individus (lignes), minimisant les déformations du nuage des points, dans un sous-espace E_K de dimensions K ($K < n$),

La représentation graphique des variables dans un sous-espace F_K en explicitant au mieux les liaisons initiales entre ces variables.

La réduction (ou compression) de la dimension de Y par un tableau de rang K ($K < n$).

La question à résoudre, est donc de trouver le sous-espace affine E_K de dimension K (avec $K < n$ et souvent $K = 2$) telle que l'inertie du nuage des points par rapport à l'espace E_K , soit minimum, lorsque les variables sont centrées et représentées par des vecteurs de F_K .

6.2.1.4 Inertie du nuage de points

Le nuage de points N est formé de l'ensemble des p individus, dans l'espace des variables Y , de dimensions n . Dans l'espace E_K , l'inertie I_{EK} du nuage de points est donnée par:

$$I_K = \sum_{j=1}^n w_j d_M^2(x^j, E_K) \quad (6-1)$$

Dans cette expression, w_i est la pondération sur les individus. Chaque individu i est muni du poids w_i . En général, il est admis que tous les individus soient dotés du même poids. d_M est la distance définie par la métrique M . En pratique, on considère la métrique qui réduit les variables. Pour ce faire, on calcule l'écart type pour chacun des caractères et ceux-ci constituent à leur tour la matrice de covariance. L'écart type devient ainsi une mesure unique commune à tous les caractères et les unités dans lesquels s'expriment initialement les données n'ont plus d'importance. $d_M(x^i, E_K)$ désigne donc la distance entre x^i et E_K , c'est à dire la distance entre x^i et sa projection sur E_K .

Soit V , la matrice d'inertie du nuage N ou matrice de covariance des caractères (x_1, \dots, x_p) . Les équations aux valeurs propres faisant intervenir ces matrices, sont alors résolues en utilisant les propriétés spectrales des matrices considérées. Les axes principaux, sont définis par les vecteurs propres U_i classés dans le sens décroissant des valeurs propres et les inerties expliquées par ces axes sont égales aux valeurs propres. Ces vecteurs forment une base M orthonormée de E_K . En effet, les vecteurs U_i sont par définition normés et la matrice VM est symétrique. Donc, ses vecteurs propres sont orthogonaux. La trace de la matrice VM est la somme des éléments diagonaux, c'est à dire la somme de toutes les valeurs propres. D'où :

$$\frac{\sum_{i=1}^r \lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \times 100 \quad (6-2)$$

Si r est le rang de la matrice x , on a alors : :

$$\lambda_1, \lambda_r > 0 \quad \text{et} \quad \lambda_{r+1}, \dots, \lambda_n = 0, \quad \text{donc} \quad i > r, \quad I_{\Delta u_r^\perp} = 0. \quad (6-3)$$

Le nuage de points N se trouve alors exactement dans le sous-espace vectoriel E_r engendré par les r premiers axes factoriels.

6.2.1.5 Calcul des axes principaux

A partir de la matrice x dont les éléments ont été normalisés et celle des vecteurs propres U_i , associés aux valeurs propres, on obtient la matrice des composantes principales: $Z = X_1 \cdot U$,

où U est la matrice des vecteurs propres. On en déduit que les coordonnées des individus dans les axes principaux choisis sont $z_{11}, z_{12}, z_{13}, \dots, z_{32}, z_{1440}$ respectivement. En effet, d'après la base de données considérée, on a 32 stations et 15 ans fois 12 mois fois 8 paramètres par station, exprimés en valeur mensuelle. Donc, le nombre total de lignes de la matrice Z est de 32 et celui des colonnes est de 1440.

6.2.1.6 Qualité ponctuelle de la représentation

La qualité ponctuelle de la représentation pour le $i^{\text{ème}}$ individu, dans les axes principaux est, par définition:

$$u_{ij} = \frac{z_{ij}^2}{\sum_{p=1}^{1440} x_{pj}^2} \quad (6-4)$$

avec $i = 1, \dots, 32$

z_{i1} = première composante principale

z_{i2} = seconde composante principale

$z_{ij} := j^{\text{ème}}$ composante principale

x = matrice centrée et réduite ;

u_{ij} = valeur de la qualité ponctuelle de l'axe j .

La qualité ponctuelle représente la corrélation entre la variable initiale et la variable reconstruite par chaque composante principale ou par une combinaison de ces composantes

principales. On dit que la représentation qui explique mieux les individus, est celle la plus proche de l'unité.

6.2.2 Classification automatique

Le nombre de variables initiales a été réduit grâce à l'analyse en composantes principales. Ce sont donc ces dernières qui caractériseront les individus. Ces derniers sont classés en fonction de leur similarité en vue de mettre en évidence des zones homogènes selon un critère fixé à l'avance. La technique employée dans notre cas, est la classification hiérarchique à algorithme ascendant. Pour ce faire, deux éléments essentiels sont nécessaires. Ce sont d'une part, une distance mesurant la ressemblance des individus et d'autre part, un critère d'agrégation.

6.2.2.1 Distance

La distance considérée dans cette étude, est la distance euclidienne car celle-ci est positive, symétrique et vérifie l'inégalité triangulaire. Soit deux stations i et j , la distance euclidienne D_{ij} est définie par la relation suivante :

$$D_{ij} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (S_{ki} - S_{kj})^2 \quad (6-5)$$

Dans cette expression, m désigne le nombre de variables qui caractérisent ces stations, S_{ki} et S_{kj} sont les $k^{\text{ièmes}}$ composantes principales correspondant respectivement aux stations i et j . La distance euclidienne est directement prise comme indice de similarité car les composantes principales sont déjà standardisées.

6.2.2.2 Critère d'agrégation

Deux étapes forment le critère d'agrégation. La première concerne l'agrégation des groupes. Elle est basée sur la minimisation des distances entre groupes, calculées en faisant :

$$L_{ij} = \frac{1}{N_i N_j} \sum_{p=1}^{N_i} \sum_{q=1}^{N_j} D_{pq}^2 \quad (6-6)$$

N_i est le nombre d'individus contenus dans le groupe $g(i)$

N_j est le nombre d'individus contenus dans le groupe $g(j)$

D_{pq} est la distance entre l'individu p du groupe $g(i)$ et l'individu q du groupe $g(j)$

L_{ij} est par conséquent la somme des distances entre tous les individus de $g(i)$ et $g(j)$

La seconde étape est l'optimisation de la classification. En effet, au cours de la première étape, les centres de gravité de chaque groupe sont calculés et les éléments considérés sont

reclassés autour de ces centres de gravité. Chaque élément est affecté à la classe dans laquelle sa distance au centre de gravité est minimale. Lorsque la composition est modifiée, les centres de gravité sont recalculés et la procédure se répète. Le regroupement est optimal quand l'état des classes reste inchangé. Pour parfaire l'agrégation, un second critère est appliqué qui est celui de l'inertie I totale du nuage de points, c'est à dire sa variance. Soit :

$$I = I_B + I_W \quad (6-7)$$

où pour l'ensemble des classes, I_W est la somme des inerties intra-classes et I_B , la somme des inerties inter-classes.

Ceci revient à minimiser la variance intra-classes, c'est à dire à rendre les classes de plus en plus compactes et à maximiser la variance inter-classes, c'est à dire rendre les classes de plus en plus dissemblables.

6.2.2.3 Classes

Pour chaque classe d'éléments, une station étalon a été définie. Cette station qui se situe à la distance la plus faible du centre de gravité, est alors considérée comme station de référence pour sa classe. L'intérêt de définir un tel étalon est que toutes ses propriétés statistiques sont transférables à chaque localité située dans la même zone.

6.3 Zonage Climato-énergétique

6.3.1 Données

L'ACP a été appliquée aux données moyennes mensuelles de huit paramètres météorologiques, à savoir l'insolation, le vent moyen, la température moyenne, la température minimale, la température maximale, l'humidité moyenne, l'humidité minimale et l'humidité maximale. Rappelons que ces paramètres ont été mesurés pendant la période de 1981/95 dans 32 stations météorologiques réparties sur le territoire algérien (voir Table 1-1).

Nous avons donc établi une matrice X_0 de 1440 colonnes. Ces colonnes définissent les variables sur 32 lignes (ou stations) associées aux individus. La matrice X_0 est donc de dimension 1440 x 32. Dans cette matrice, l'ordre des variables n'est pas important puisque leur arrangement de différentes manières donne, à chaque fois, le même résultat. Donc, les résultats de l'ACP ne dépendent pas de l'ordre des variables. Avant d'appliquer l'ACP, nous avons calculé la moyenne et l'écart-type de chaque échantillon relatif aux variables de la matrice d'origine. Ceci permet de standardiser ces variables et de diminuer leur dispersion.

Nous obtenons une nouvelle matrice X_1 dont les échantillons sont des données centrées réduites.

6.3.2 Calcul des composantes principales

Pour caractériser les stations météorologiques et réduire la base initiale de données, un traitement préalable basé sur l'analyse en composantes principales (ACP), a été effectué. Ensuite, la classification hiérarchique ascendante a été utilisée pour regrouper les stations météorologiques considérées dans cette étude. Après leur reconstitution, les séries correspondant aux composantes principales, ont fait l'objet d'une telle classification. C'est ainsi que le degré de ressemblance des nuages d'observations relatives à chacune des stations a été mis en évidence. En résumé, les principales étapes de ce calcul sont :

Calcul de la matrice de corrélation R à partir de X_1 , avec $R = [1440/1440]$;

Calcul des valeurs propres à partir de la matrice de corrélation R ;

Calcul de la variance expliquée par chaque composante.

Les résultats essentiels de l'analyse en composantes principales sont donnés par la Table 6-1. où les composantes les plus significatives, sont mises en évidence. Les quatre premières expliquent 82% de la variance totale et les 18% restantes sont réparties sur les 1436 restantes.

6.3.3 Estimation de la qualité ponctuelle

La Fig. 6-1 donne les diagrammes représentant respectivement la qualité ponctuelle du 1^{er} (u_{i1}), 2^{ème} (u_{i2}), 3^{ème} (u_{i3}), 4^{ème} (u_{i4}), 5^{ème} (u_{i5}) axes principaux et le plan principal U composé des quatre premiers axes principaux. Cette figure montre que la représentation des individus sur le premier axe est inférieure à 0,4. Elle est d'environ de 0,2 sur le deuxième axe. Elle est proche de 0,2 sur le troisième axe, inférieure à 0,2 sur le quatrième axe et vaut 0 sur le cinquième axe sauf pour un seul individu (la trentième station est représentée avec une valeur de 0,27). La somme $U = u_{i1} + u_{i2} + u_{i3} + u_{i4}$ vaut pratiquement 0,6 pour l'ensemble des individus.

6.3.4 Interprétation

La valeur atteinte par la somme des quatre premières qualités ponctuelles, associées aux quatre premiers axes principaux est de 0,6, pour presque la totalité des individus. Les quatre premières composantes principales représentent donc les données de base avec une

bonne approximation. Cependant, le nombre de variables qui correspond à 1440 axes principaux, est considérable. Un bruit important contenu dans les 1436 axes principaux restants, vient alors perturber la représentation par quatre composantes principales. Parmi les composantes non considérées, il existe celles qui ont un faible explication ponctuelle quand elles sont prises isolément, mais leur somme n'est pas forcément négligeable

Composantes	Valeurs propres	Variance expliquée (%)
1	828	57
2	212	72
3	89	78
4	57	82
5	33	84
6	30	87
7	25	88
8	18	90
9	15	91
10	13	92
.	.	.
.	.	.
1440	0	100

Table 6-1 Représentation des composantes principales.

6.3.5 Regroupement des stations

Le regroupement des stations a été effectué en appliquant deux méthodes. L'une est basée sur la projection des individus dans les plans principaux et l'autre sur leur regroupement par classification hiérarchique.

6.3.5.1 Projection des individus dans les plans principaux

Le but de notre étude est d'obtenir une représentation des individus dans un espace de dimension réduite. A partir des axes principaux définissant cet espace, nous avons représenté les coordonnées de la projection de tous les individus dans le premier plan et le deuxième plan ainsi que l'espace formé par les trois premiers axes principaux (voir Fig. 6-2, 6-3 et 6-4). Cette représentation nous renseigne sur les propriétés climatologiques des individus. Donc,

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

ceux qui ont des propriétés similaires seront les plus proches, comme l'indique le regroupement obtenu.

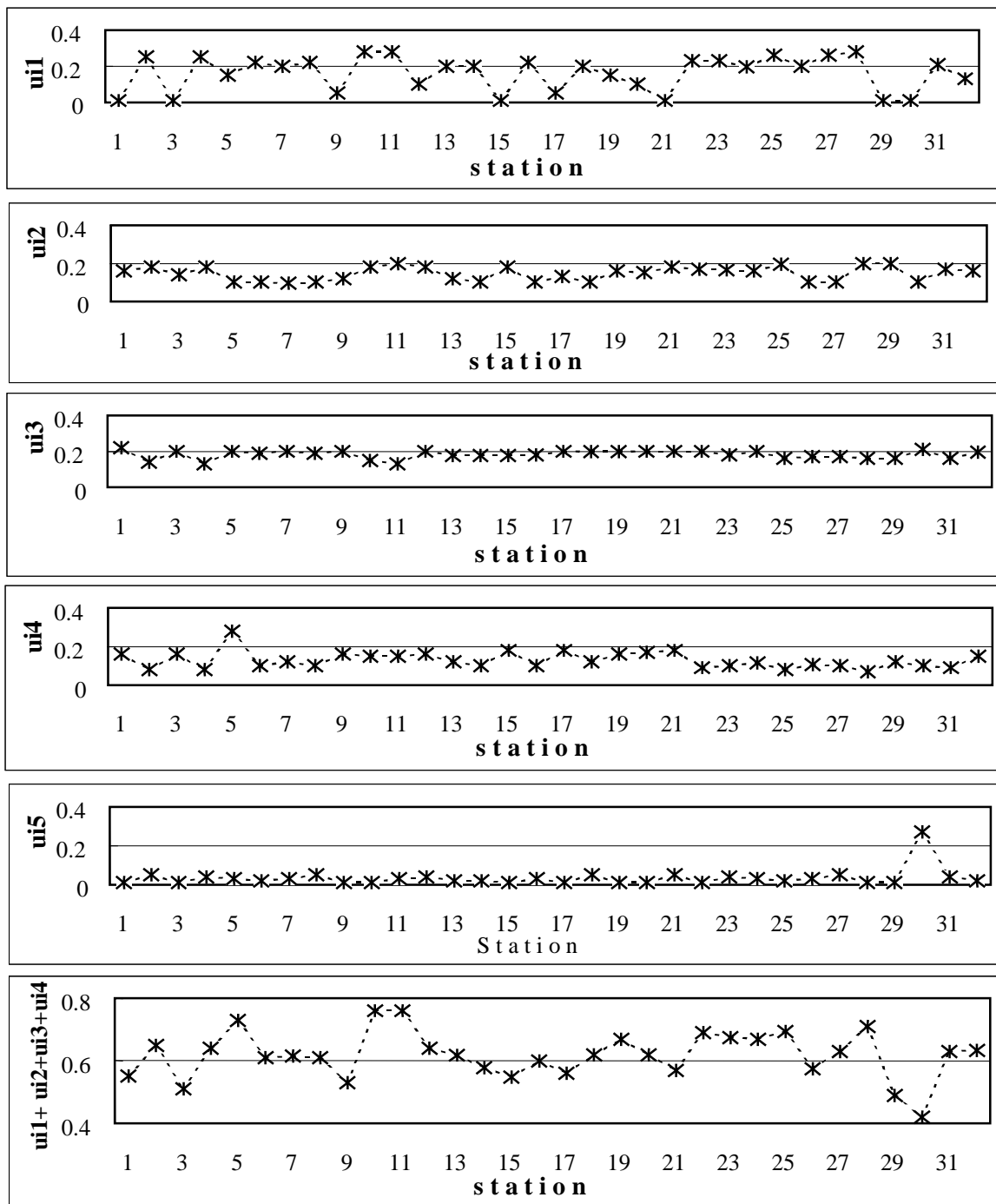


Fig. 6-1.Représentation de la qualité ponctuelle des axes principaux ui1, ui2, ui3, ui4, ui5 et de celle du plan principal composé des quatre premiers axes principaux.

La Fig. 6-2 donne les coordonnées de la projection de tous les individus dans le 1^{er} plan formé les deux premiers axes. La Fig. 6-3 représente les coordonnées de la projection de tous les individus dans le 2^{ème} plan formé par le premier et le troisième axe. Sur la Fig. 6-4, sont portées les coordonnées de la projection de tous les individus dans l'espace formé par les trois premiers axes principaux. Ces trois axes peuvent être interprétés comme suit :

L'axe (z_1) explique la variante Est Ouest.

L'axe (z_2) explique la variante Nord Sud.

L'axe (z_3) explique la variante Sud Nord.

6.3.5.2 Regroupement par classification hiérarchique

Le regroupement des stations réalisé par classification hiérarchique ascendante, permet de distinguer six régions caractéristiques. La méthode de classification hiérarchique ascendante et la technique de projection sur les axes principaux, conduisent aux mêmes résultats. En considérant les facteurs climatiques : vent, insolation, température et humidité, nous pouvons donc décomposer l'Algérie en six régions homogènes du point de vue climato-énergétique.

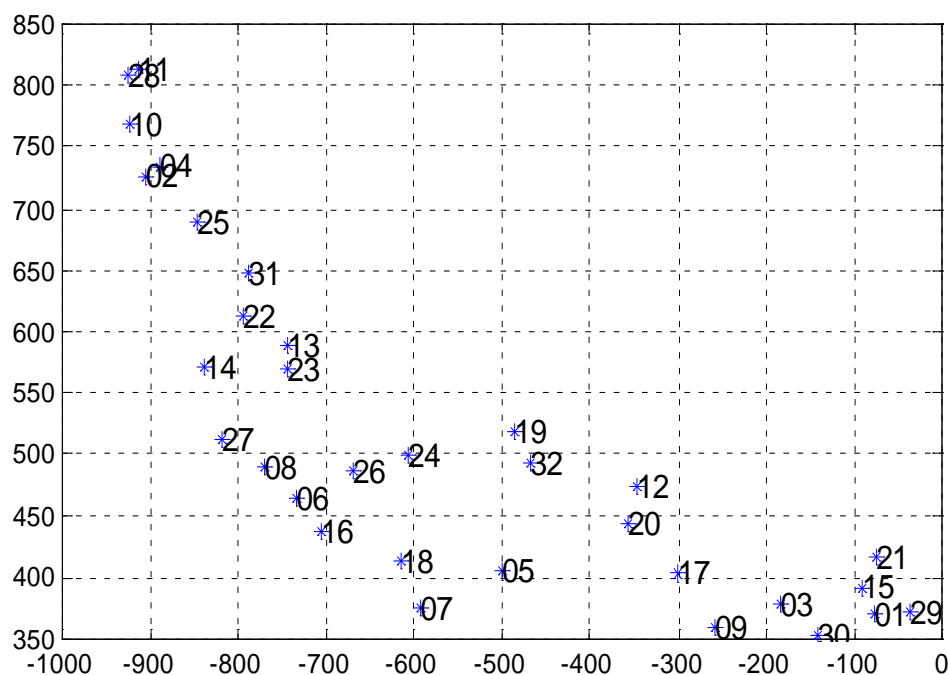


Fig. 6-2. Coordonnées de la projection de tous les individus dans le 1^{er} plan formé des deux premiers axes.

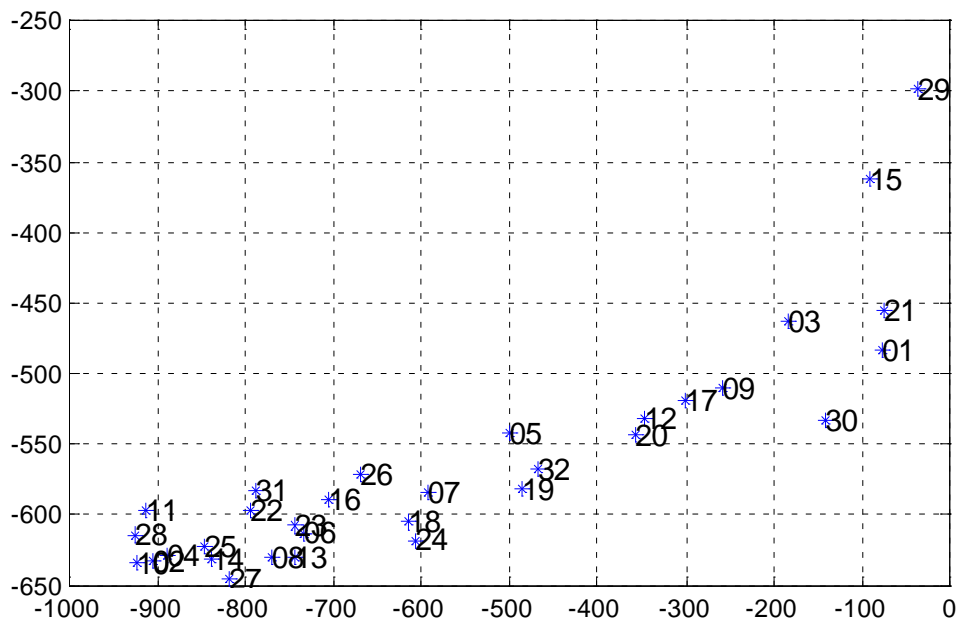


Fig. 6-3. Coordonnées de la projection de tous les individus dans le 2^{er} plan formé par le premier et le troisième axe.

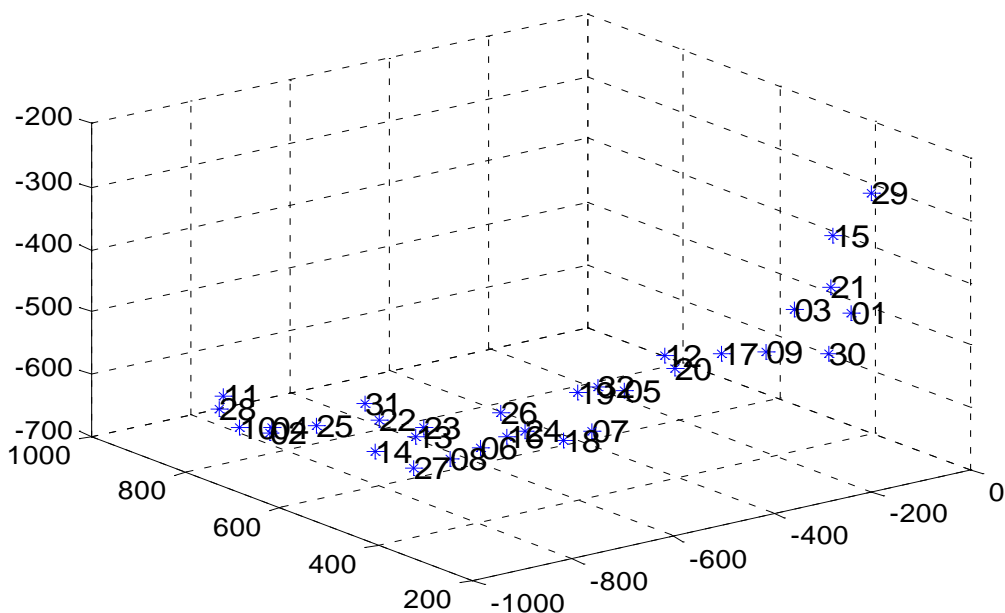


Fig. 6-4. Coordonnées de la projection de tous les individus dans l'espace formé des trois premiers axes principaux.

6.3.6 Station étalon

La classification en zones homogènes a été complétée par l'identification de stations étalons représentatives de chaque région. L'intérêt de définir une station étalon pour une zone homogène donnée, est que les informations météorologiques fournies par une telle station, peuvent être transposées à n'importe quel point de cette zone. Les six zones homogènes formant l'Algérie et leurs stations étalons sont indiquées, ci-après, en caractère gras :

Région 1 (Nord): Béni saf, Skikda, Bédjaia, **Alger**, Annaba, Oran.

Région 2 (intérieur du pays): Tlemcen, **Maghnia**, Chlef, Miliana.

Région 3 (Hauts Plateaux): Constantine, Sétif, Bordj Bou Arréridj, **Batna**, Djelfa, Saïda,
M'Sila, El Kheïter, El Bayadh.

Région 4 (Nord du Sahara): Touggourt, El Oued, Biskra, **Ghardaïa**, Goleâ, Béchar,
Aïn Sefra.

Région 5 (Sahara central): Adrar, In Salah, Timimoun, **In Amenas**.

Région 6 : Djanet, **Tamanrasset**.

6.3.7 Carte des régions

La carte présentée dans la Fig. 6-5, résulte du zonage climato-énergétique de l'Algérie. Ce zonage qui est basé sur des grandeurs climatiques, permet donc de délimiter les six régions obtenues, en fonction de leur climat [Youcef Ettoumi *et al*, 2001 e].

6.4 Application à la classification des types de temps

La climatologie classique est la description par cartes, tableaux, graphiques ou textes des composantes du climat d'une région ou d'un pays. Les valeurs de ces composantes sont généralement calculées à l'échelle du mois et reproduites sous forme de moyennes. Nous concevons aisément que ces valeurs moyennes concernant un temps moyen fictif, soient probablement peu représentatives de la série de types de temps qui se succèdent au cours d'une journée ou d'un mois. Un climat spécifique à la région ou au pays considéré correspond à chacun des types de temps et le climat observé au cours du mois, reflète surtout une fréquence plus grande de certains d'entre eux. C'est pourquoi, il nous a semblé intéressant de mener une étude objective de ces types de temps. Notre approche a pour but de faire ressortir les principaux types de temps qui prévalent en Algérie et donc de trouver des ensembles d'observations météorologiques présentant un certain degré d'homogénéité interne. La phase la plus difficile de cette étude, est d'identifier les principaux types de temps et d'en analyser

les composantes car ceux ci regroupent des situations caractéristiques et relativement fréquentes.

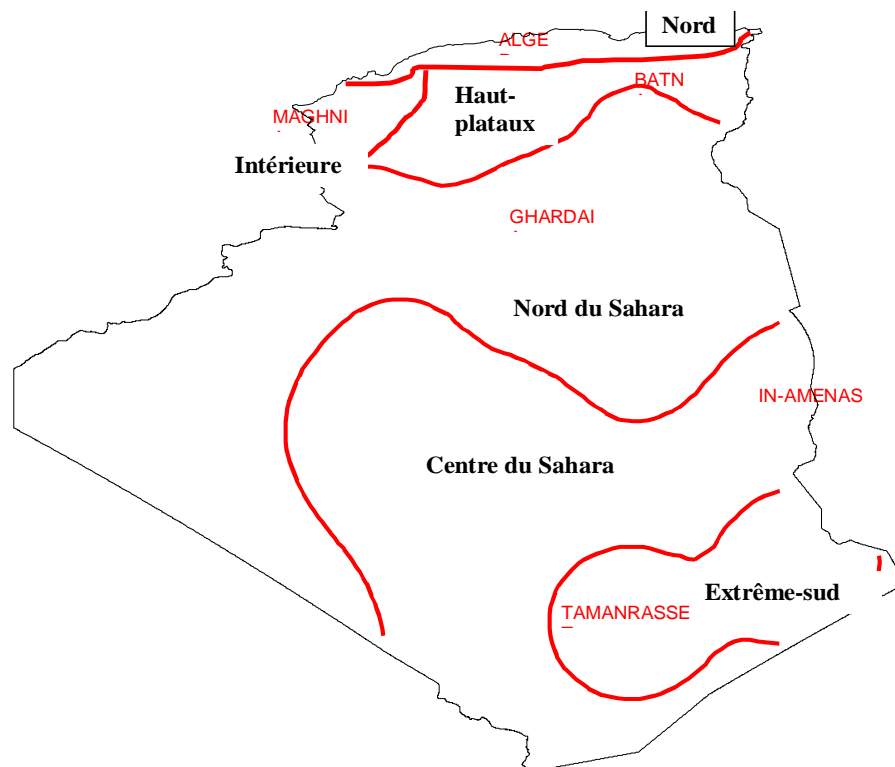


Fig. 6-5. Carte représentative des six régions climato-énergétiques algériennes.

6.4.1 Données de base

Les données météorologiques que nous avons utilisées, ont été enregistrées dans les stations d'Alger, de Batna, de Ghardaïa, d'In Amenas, de Maghnia et de Tamanrasset pendant la période 1990/99. Ce sont des mesures relevées à 06 h , 09 h , 12 h , 15 h et 18 h pour les paramètres suivants :

- la température de l'air
- l'humidité relative de l'air
- la nébulosité totale
- la pression atmosphérique
- les précipitations

la composante méridienne du vent (direction).

la composante zonale du vent (vitesse)

la visibilité horizontale

la température du thermomètre mouillé sous abri

Nous avons aussi considéré les mesures journalières des paramètres suivants :

la température maximale

la température minimale

le taux de précipitations totalisé

l'évaporation

l'insolation

Le choix de telles variables météorologiques permet de couvrir l'essentiel des éléments quantitatifs du temps sensible. Le fait qu'elles soient mesurées à des heures différentes, ne veut pas forcément dire que l'on veuille appréhender des évolutions diurnes particulières. Les diverses observations quotidiennes d'une même variable peuvent cependant aider à établir les types de temps.

6.4.2 Application

Pour chacune des six stations étalons considérées, l'ensemble de ces données a été organisé en douze sous-ensembles mensuels sur la période d'étude. A cet effet, les données qui caractérisent les jours des mois de même nom, ont été cumulés sur la période d'étude. Ces données ont été centrées et réduites pour réduire leur dispersion, les standardiser et leur attribuer le même poids. L'ACP a alors été appliquée à 72 matrices représentant l'ensemble des données centrées et réduites. En pratique, les principales étapes de cette analyse sont :

Calcul de la matrice de corrélation R (50x50).

Calcul des valeurs propres à partir de la matrice de matrice corrélation R.

Calcul des variances expliquées en %.

Vérification de l'équation de North dont la forme mathématique est :

$$\delta\alpha = \alpha \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{N}} \right) \quad (6-8)$$

Dans cette expression, α est l'une des valeurs propres de la matrice des corrélations (R) et N, le nombre d'éléments considérés. L'intervalle à respecter est $[\alpha - \delta\alpha, \alpha + \delta\alpha]$

Nous tenons néanmoins à signaler que les composantes associées à des valeurs propres dégénérées ne peuvent pas être prises en considération puisque les axes factoriels qui leur correspondent, ne sont pas déterminés. Après calcul des valeurs propres et de leurs valeurs expliquées, on trouve 72 nouvelles matrices représentatives des composantes principales et formées de 9 à 12 colonnes et de 282, 300 ou 310 lignes selon le mois considéré (rappelons que la période d'étude est de dix ans).

La classification automatique exposée au chapitre 5, a été appliquée à ces matrices pour classer les observations en fonction de leurs similarités. Le critère d'agrégation choisi pour classer les jours de la période 1990/99, est basé sur l'algorithme de classification 'Average Linkage' [Esaudero 1977]. La division en classes obtenue à l'aide de cet algorithme, est réalisée en utilisant les coordonnées des centres de gravité des groupes obtenus par ACP. Ensuite, la classification est améliorée à l'aide de l'algorithme des K-means.

Au début, chaque élément à classer appartient à un groupe différent. A chacune des itérations, il s'agit de calculer la distance euclidienne entre les éléments de paires formées à partir d'individus appartenant à deux groupes différents. Les diverses distances obtenues sont utilisées plus loin pour déterminer une distance moyenne entre les classes considérées.

L'indice de similarité du critère Average Linkage est calculé en faisant:

$$L_{ij} = V_i + V_j + d_{pq}^{ij} \quad (6-9)$$

d_{pq}^{ij} est la distance entre les individus p et q appartenant aux groupes i et j respectivement. L'expression (6-9) est fonction des variances intra-groupes V_i et V_j , correspondant respectivement aux classes i et j.

A chacune des itérations, l'algorithme assemble les deux groupes pour lesquels L_{ij} est minimal. Si L_{ij} croit subitement, cela signifie que l'algorithme a mélangé deux groupes peu semblables, donc il sera possible d'établir la césure.

La division ainsi obtenue, permet de calculer les centres de gravité des différents groupes autour desquels une classification hiérarchique réorganise les éléments considérés. Cette nouvelle classification se fait de façon que chaque jour appartienne à la classe pour laquelle la distance par rapport au centre de gravité est minimale. Lorsque la composition d'un groupe est modifiée, les centres de gravité sont recalculés et le processus se répète.

Une fois la classification terminée, nous avons déterminé une journée appelée ‘journée étalon’ pour chaque classe, dont la distance par rapport au centre de gravité de la classe considérée, est la plus faible (ou moyenne des éléments de la classe).

6.4.3 Caractère synoptique des classes

Pour chaque mois et pour chaque stations étalon, les propriétés statistiques de chacune des classes comprennent les valeurs moyennes et les écarts type de toutes les variables météorologiques utilisées ainsi que le nombre d’éléments qui leur correspondent. Les écarts type intragroupe (DI) et intergroupe (DE) sont des mesures de dispersion. Ils s’écrivent :

$$DI = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N_k} w_k \delta_k \quad (6-10)$$

$$DE = \sqrt{\frac{1}{w} \sum_{k=1}^{N_g} (X_k - X)^2} \quad (6-11)$$

avec

N : Nombre total d’éléments à classer

N_k : Nombre d’éléments de groupe k ($k=1, \dots, N_g$)

N_g : Nombre du groupe.

X_k : Moyenne d’une variable donnée pour un groupe déterminé.

X : Moyenne de la variable calculée en considérant tout l’ensemble d’éléments.

δ_k : Ecart type correspondant à une variable quelconque calculé à l’intérieur du groupe k.

6.4.4 Résultats

L’analyse objective décrite précédemment, nous a permis de représenter les différentes classes obtenues pour chacun des mois de l’année, par des ‘journées types’. Ces dernières reflètent les principaux types de temps prévalant en Algérie. A la suite d’une analyse de données climatologiques mesurées dans trente deux stations d’observation du réseau météorologique algérien, une régionalisation climatique de l’Algérie a permis de distinguer six principales zones homogènes. Chacune d’elles est représentée par un étalon, soit Alger, Batna, Ghardaïa, In amenas, Maghnia et Tamanrasset respectivement.

Pour toutes les stations étalon et pour l’ensemble des mois, l’état synoptique des classes les plus prédominantes, est décrit dans l’annexe C. On trouve que le nombre de classes obtenues pour chaque mois et chaque étalon, varie entre cinq et dix. Cependant, on observe toujours une prédominance d’une classe sur les autres. En effet, une classe donnée peut

rassembler jusqu'à 90% des individus et en conséquence certaines classes sont très peu peuplées. Pour tous les mois de l'année, les classes que nous avons obtenues, sont suffisamment homogènes, représentatives des types de temps et en nombre suffisamment élevé pour décrire le climat prévalant sur le territoire algérien. En effet, les écarts types de chaque classe sont inférieurs aux écarts types intraclasse.

Dans le cas d'Alger, la classe 1 rassemble 88% des jours du mois de Juin. Dans l'ensemble, ce groupe est homogène. Son état synoptique est décrit par des températures élevées comprises entre 16°C et 28°C, un ciel nuageux, des pressions basses, des précipitations rares, des vents assez forts, de vitesse valant pratiquement 5,7 m/s. Cette classe persiste avec un épisode de 13 jours. Il y a aussi prédominance de la classe 2 au mois de Février. Cette classe comprend 84% des jours analysés. Elle est relativement homogène. Elle est caractérisée par des températures de 18°C la journée et faibles le matin, un ciel nuageux, des précipitations rares, des vents faibles, une pression élevée.

Pour Maghnia, la classe 1 n'est pas très homogène. Elle réunit 81% des jours du mois d'Octobre. Les températures enregistrées se situent entre 11°C et 25°C. Le ciel est peu nuageux. Les vents en surface sont de faibles valeurs. La pression enregistrée est élevée. Cette classe persiste avec un épisode de 15 jours.

Pour Batna, les classes 1 et 2 persistent avec un épisode de 15 jours, aux mois d'Avril et de Novembre. La classe 1 du mois d'Avril est moyennement homogène surtout pour la visibilité, avec 69% des jours du mois considéré. L'état synoptique typique se distingue par des températures comprises entre 3°C et 18°C, un ciel nuageux et des précipitations faibles.

Pour le site de Ghardaïa, les classes qui ont une persistance épisodique de 15 jours, se présentent aux mois de Mars, d'Août et de Décembre. La classe 1 la plus représentative du mois de Mars, rassemble 78% des jours de ce mois. Elle est moyennement homogène. Elle est caractérisée par des températures comprises entre 10°C et 22°C, un ciel peu nuageux, des vents en surface très forts de l'ordre de 9m/s et une présence de traces de pluie.

Les classes ayant un épisode de 15 jours à In Aménas, correspondent aux mois de Janvier, de Février et de Mars. La classe 2 la plus significative du mois de Février, englobe 63% des jours du mois considéré. Elle est assez homogène, ses éléments synoptiques se traduisent par des températures comprises entre 4°C et 20°C, un ciel clair, un temps est peu humide et des vents de vitesse de 2,5m/s à 6heures et 4,6 m/s à 12 heures.

Le site de Tamanrasset est caractérisé par des épisodes de 15 jours, correspondant au dernier trimestre de l'année. La classe 1 la plus prédominante pour le mois de Décembre, réunit 83% des jours de ce mois. Cette classe est assez homogène. Elle se caractérise par des températures comprises entre 6°C et 22°C, un ciel peu nuageux et des vitesses du vent allant de 1,4m/s à 4,5m/s.

Pour mieux illustrer de tels résultats, nous avons représenté dans la Fig. 6-6, les états synoptiques des classes les plus prédominantes du mois de Juin, pour les sites les plus représentatifs de l'Algérie.

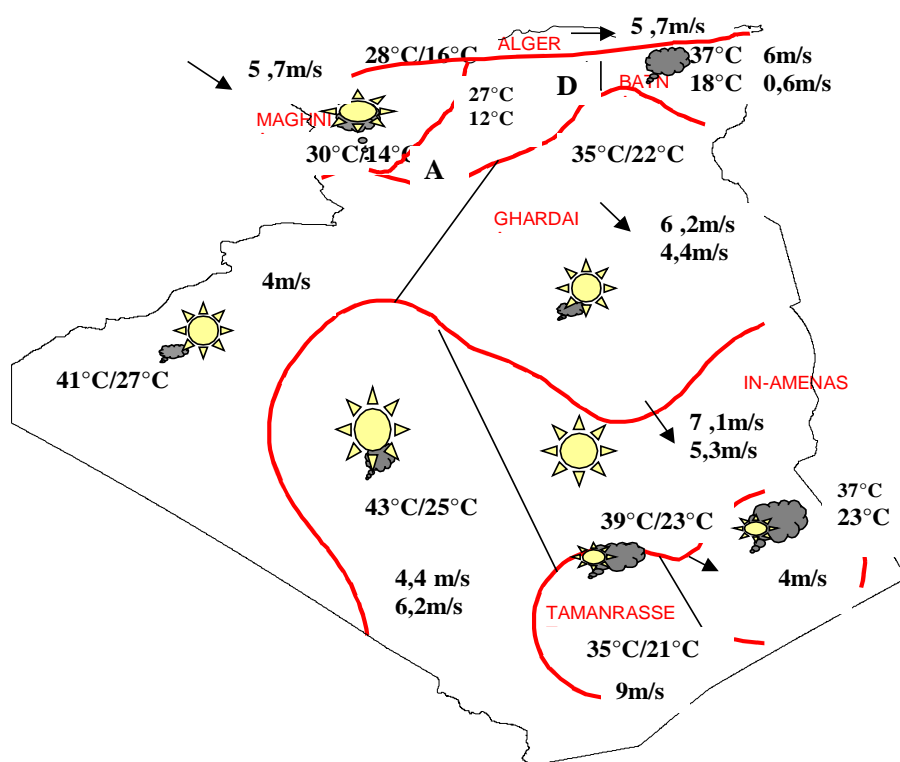


Fig. 6-6. Représentation de l'état synoptique des 'journées types' les plus probables au mois de Juin, pour les sites les plus représentatifs de l'Algérie.

6.5 Discussion

Grâce à l'analyse en composantes principales et la classification objective que nous avons adoptées, diverses classes ont pu être obtenues pour tous les mois de l'année. Ces classes sont assez homogènes et représentatives des types de temps qui peuvent se présenter sur le territoire algérien. Leur nombre varie de 5 à 10 selon le mois et la région considérée. Les écarts types de chaque classe sont inférieurs aux écarts types intra-classe (DI).

A titre de comparaison, la classification de Köppen décrite au chapitre 1, a été considérée. En se basant sur la climatologie globale, cette classification donne, dans le cas de l'Algérie, trois zones climatiques qui sont :

- CSa pour les régions côtières
- BSh pour les hauts plateaux

BWh pour le Sahara

Nous avons adapté la classification de Köppen à l'approche développée dans les paragraphes précédents. A cet effet, les données de température caractérisant la saison chaude et la saison froide, les moyennes annuelles des données de température et les données de précipitations ont été considérées. Ces données ont été collectées dans les six stations étalon, à savoir Alger, Batna, Ghardaïa, In Amenas, Maghnia et Tamanrasset.

Alger, située en zone côtière et décrite par une banque de données de 40 ans, est classée Csa.

Maghnia, représentée par une banque de données de 25 ans, avait été initialement classée BSh dans le système de climatologie global. En tenant compte de la classification par station étalon, elle est répertoriée BSk partout, sauf en été, où elle est indexée par BWk, à cause de la sécheresse estivale.

Batna est décrite par une banque de données de 27 ans. Dans la classification basée sur la climatologie globale, ce site est classé BSh. En adoptant la classification par station étalon, on trouve une classe différente. Celle-ci est BWk pour ce site.

Ghardaïa est une zone du sud représentée par une banque de données 36 ans. La classe typique de ce site est BWh, quelle que soit la méthode utilisée.

In Amenas, est une zone du sud décrite par une banque de données de 40 ans. En climatologie globale, elle est classée BWh. Quand on tient compte de la classification par station étalon, on trouve que ce site est aussi classé BWh, sauf pour l'année 1965, où il est classé BSh à cause des précipitations abondantes durant cette année.

Tamanrasset et une zone du sud représentée aussi par une banque de données de 40 ans. Ce site est classé BWh quelle que soit le type de classification utilisée.

A la lumière de ces résultats, nous estimons qu'une approche basée sur des moyennes annuelles et celles correspondant aux saisons, peut être affinée grâce à l'approche objective telle que présentée dans ce chapitre. En effet, l'introduction d'un spectre de données plus large rend la recherche des types de temps qui prévalent en Algérie, plus proches de la réalité.

La classification des types de temps fait intervenir trois grandeurs énergétiques. Il s'agit de l'insolation qui rappelons-le est fortement corrélée à l'irradiation solaire, de la température qui est liée à l'énergie thermique mise en jeu lors des échanges atmosphériques et du vent, qui est une source d'énergie éolienne. La cartographie de l'Algérie basée sur les types de temps est alors d'un intérêt certain pour le développement et l'exploitation des énergies renouvelables.

Conclusion

L'approche que nous venons de présenter, a l'intérêt de rendre compte de l'évolution spatio-temporelle des grandeurs météorologiques les plus représentatives du climat. Elle a conduit à une classification de l'Algérie en types de temps. Cette classification est beaucoup plus précise que celles communément utilisées en météorologie. Elle montre que l'Algérie peut être partagée en six zones homogènes alors que la classification de Köppen couramment employée pour décrire la climatologie globale, ne permet de distinguer que trois régions principales. Une telle régionalisation a été rendue possible grâce à la modélisation des distributions statistiques des phénomènes météorologiques mis en jeu et à l'analyse de leur caractère stochastique. Partant d'observations effectuées dans les stations météorologiques du réseau algérien, nous nous sommes surtout attachés, à identifier les grandeurs météorologiques, qui sont à même de contribuer à une meilleure évaluation des énergies renouvelables liée à une climatologie régionale.

Ainsi, les données mensuelles d'insolation ont fait l'objet d'une cartographie basée sur l'analyse de Fourier. Cette cartographie fait apparaître trois régimes radiatifs caractérisant le climat algérien. Nous avons également montré que les mesures solaires collectées quotidiennement dans diverses localités de l'Algérie, sont décrites convenablement par des distributions de probabilité beta. Grâce au concept de zone homogène, les cartes des paramètres caractérisant les distributions beta qui en résultent, peuvent être associées à l'équation d'Angström pour estimer le flux global d'irradiation solaire en n'importe quel point de l'Algérie.

A l'échelle horaire, nous avons mis en évidence l'absence de liaison entre la durée d'ensoleillement et la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité. Par contre, il existe une forte corrélation entre l'insolation et la nébulosité. Un modèle autorégressif des données horaires d'insolation a alors été construit. D'abord, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de corrélation de l'insolation ont été calculés conditionnellement à la nébulosité. Ensuite, la nébulosité a été modélisée par des chaînes de Markov. Nous trouvons que ce modèle dont les paramètres dépendent des transitions entre les états de nébulosité, reproduit parfaitement les données d'insolation. L'analyse des cumulants a montré que la série de données horaires d'insolation forme un processus non stationnaire caractérisé par une distribution de probabilité dissymétrique et que les moments d'ordres 3 et 4 jouent un rôle

non négligeable. Grâce à de tels résultats, nous pouvons maintenant générer des données synthétiques très utiles pour le calcul de la taille des systèmes de conversion d'énergie solaire.

Une cartographie de la température a aussi été établie en vue d'applications héliothermiques. Elle montre que les données tri-horaires de température, sont caractérisées par une distribution de Laplace-Gauss. Ce type de modèle permet la simulation de séries chronologiques de données quotidiennes de température en n'importe quel endroit de l'Algérie. L'analyse de l'effet des écarts thermiques dans des zones semi-arides montre que celui-ci est un facteur déterminant de la qualité de vie dans ces régions et de la conception de l'habitat en zones semi-arides. Les résultats obtenus laissent entrevoir la possibilité d'une valorisation de matériaux locaux dans la construction d'habitations.

L'expérience menée à Djelfa sur les vents de sables, a permis de quantifier l'apport des salissures par les vents de sable et l'importance des dégradations causées par celles-ci dans les réseaux d'assainissement. Pour une meilleure gestion de l'entretien de ces réseaux, une telle expérience doit être poursuivie et une analyse statistique des dépôts de lithométéores doit être effectuée à l'échelle de l'heure et à celle de la journée, pour les différentes directions du vent.

Ayant établi que la vitesse du vent suit la loi de Weibull en Algérie, nous avons construit les cartes mensuelles des paramètres de cette distribution en fonction de la direction du vent. Ces cartes sont très utiles dans la génération de données en n'importe quel site de l'Algérie. Ensuite, nous avons effectué une classification de l'énergie éolienne. Il en résulte trois classes de vent. En particulier, le gisement éolien est le plus important dans le Sud Ouest de l'Algérie. Cette région est donc bien adaptée au développement de systèmes de conversion d'énergie éolienne. Etant donné la persistance du vent, la vitesse et la direction du vent ont été modélisées par des chaînes de Markov pour Oran. Un modèle bivarié basé sur la représentation de la vitesse du vent par une distribution de Weibull et de la direction du vent par une chaîne de Markov du premier ordre à neuf états, permet de tenir compte de la dépendance des deux sortes de variable et de reconstituer les données de vitesse et de direction du vent avec une bonne précision. Les données simulées sont en excellent accord avec celles résultant de l'observation pour le site d'Oran. Aussi, il serait intéressant d'étudier les performances de ce modèle pour d'autres sites de l'Algérie.

Comme nous venons de le constater, les paramètres énergétiques considérés dans notre étude, présentent des caractéristiques statistiques différentes car liées à la nature même des phénomènes étudiés. L'analyse climato-statistique ainsi développée, met en évidence plusieurs nuances de temps pour l'Algérie selon le lieu ou l'époque considérés. Les cartes que

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

nous avons établies, sont utiles pour l'estimation, la prédiction et la simulation des grandeurs météorologiques mises en jeu. Cependant, pour mieux connaître les effets dynamiques du climat, il serait intéressant de considérer des séries chronologiques formées de données météorologiques produites ou collectées à des échelles de temps courtes, par exemple, plus petites que l'heure. Pour évaluer ces effets dynamiques et apprécier la validité de la classification des types de temps que nous avons élaborée, un appareil capable de mesurer l'ensoleillement et la température à l'échelle de la minute, a été construit (voir annexe A). Puis, les performances de divers modules photovoltaïques ont été évaluées sur site en fonction de différents paramètres météorologiques. Ces expériences ont fait apparaître une forte influence de la température, du vent et de la teneur en humidité sur le rendement des modules photovoltaïques [Youcef Ettoumi et Adane, 2000 b]. A long terme, l'observation des états dynamiques de l'atmosphère nécessitera la mise au point de chaînes automatiques d'acquisition de données et la constitution de banques de données à l'échelle de la minute. A cet effet, nous avons déjà entrepris la conception et la réalisation d'une chaîne instrumentale intelligente pour la mesure de la pression, de l'humidité, de la vitesse du vent et de sa direction à différentes échelles de temps.

La classification des types de temps est basée sur ceux les plus fréquemment observés dans les stations représentatives des six régions. Réalisée en appliquant une analyse en composantes principales et une commande hiérarchisée à une base consistante de données, elle est d'une importance considérable du point de vue climatologique. Une telle classification peut être utilement exploitée pour résoudre des problèmes posés par l'environnement terrestre, pour étalonner les images prises par des satellites météorologiques et pour développer des applications dans le domaine des énergies renouvelables. Elle pourrait aussi être étendue à l'évaluation des champs de précipitations. En effet, des études effectuées au sein de notre Laboratoire, ont montré que l'indice des précipitations pour le Nord de l'Algérie peut être estimé ou encore prédite à partir des données de température de la surface de l'océan Atlantique [Haddad *et al.*, 2001 ; Nacef *et al.*, 2001 ; Raaf *et al.*, 2001].

En Algérie, le secteur socio-économique et la communauté scientifique semblent mesurer de plus en plus l'importance d'une préservation de l'environnement. Appelé à un essor de ses activités, ce pays se trouve actuellement confronté à une demande énergétique croissante. Le réseau électrique actuel n'est pas suffisant eu égard aux importantes superficies couvertes par l'Algérie alors que l'extension éventuelle de ce réseau est assujettie à de lourds investissements. De plus, la protection de l'environnement doit passer par un ralentissement

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

de l'épuisement des ressources d'énergie fossile. Vu les richesses incommensurables en matière d'ensoleillement, d'énergie thermique et de ressources éoliennes, il est impératif de prévoir une alternative pour répondre, à la fois, à nos besoins en énergie et aux exigences en matière de protection de l'environnement. Les modèles que nous avons élaborés, s'avèrent alors très utiles au développement de projets d'installation de systèmes de conversion d'énergies renouvelables sur le territoire algérien.

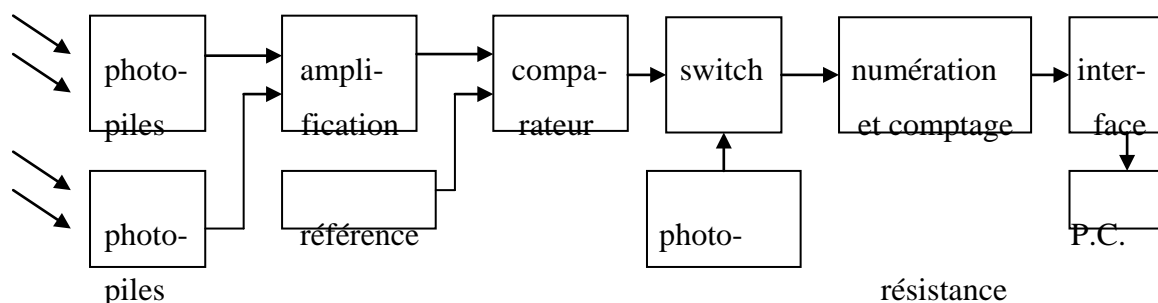
Annexe A : Expérimentation et réalisation

Héliographe électronique

L'héliographe électronique que nous avons mis au point, est basé sur l'utilisation de deux photopiles identiques, l'une orientée vers le nord et l'autre vers le sud, puis de détecter la différence des éclairagements reçus par les deux photopiles. Le schéma-bloc de cet appareil est donné par la Fig. A-1.

Eclairement

Solaire



Le seuil du comparateur est réglé de façon que le montage détecte une différence d'éclairement lorsque celle-ci correspond à une valeur supérieure ou égale à 120 W/m^2 . Une photorésistance commande un switch de façon que la mesure soit interrompue pendant la nuit et que le dispositif soit mis en service pendant la journée. Le signal analogique est transformé en impulsions dont la fréquence est proportionnelle à la différence d'éclairement. Après comptage, le nombre de ces impulsions est transmis à un microordinateur PC qui acquiert, traite et stocke en mémoire les données d'insolation à différentes échelles de temps.

Pyranomètre électronique

Expérimentation sur des modules photovoltaïques

Annexe B : Les tests statistiques

1. Généralités

Un test est un mécanisme permettant de trancher entre H_0 , c'est à dire accepter l'ajustement ou l'hypothèse, et H_1 , à savoir rejeter l'ajustement ou l'hypothèse.

Dans le cas de l'ajustement de données expérimentales par une distribution, l'examen de la valeur de l'ajustement requiert deux sortes de tests : le test d'ajustement et le test d'hypothèse.

Le test statistique le plus utilisé est le test de χ^2 à n degrés de libertés. Cependant, on peut aussi employer deux tests équivalents. Ce sont le test de Kolmogorov-Smirnov et le test de Cramer-Von Mises [Lehmann, 1959; Saporta, 1978].

Il existe également d'autres tests comme par exemple le test de Fisher ou le test de Snedecor, mais ces tests ne seront pas considérés ici car n'étant pas adaptés à notre étude.

2. Test de χ^2

Considérons n éléments d'un échantillon, répartis en k classes selon les valeurs croissantes de la variable aléatoire X et soit N_h , l'effectif de la $h^{\text{ième}}$ classe définie par l'intervalle $[a_{h-1}, a_h]$. On a donc une variable aléatoire dont la valeur à l'issue de l'échantillonnage est n_h , avec :

$$\sum_{h=1}^k N_h = n \quad \text{et} \quad \sum_{h=1}^k n_h = n$$

Supposons que X suive une loi spécifiée de fonction de répartition $F(x)$, l'effectif théorique sera : $n'_h = n p_h$, avec $p_h = F(a_h) - F(a_{h-1})$.

Le test statistique va donc consister à analyser les écarts entre les effectifs observés et les effectifs théoriques.

Dans le test de χ^2 , l'importance de ces écarts est évaluée en considérant la quantité :

$$\sum_{h=1}^k \frac{(N_h - np_h)^2}{np_h} \quad (\text{B} - 1)$$

Si les effectifs de chaque classe sont suffisamment nombreux, cette quantité suivra une loi de χ^2 à $k - 1$ degrés de libertés. Cette loi est définie par :

$$f(x) = \frac{x^{\frac{k-1}{2}-1} e^{-\frac{x}{2}}}{2^{\frac{k-1}{2}} \Gamma(\frac{k-1}{2})} \quad (\text{B} - 2)$$

ou $\Gamma\{(k - 1)/2\}$ est la fonction Gamma.

Si le test est réalisé au seuil α , on aura :

$$P(\chi_{h-1}^2 > \chi_{h-1}^2(\alpha)) = \int_{\alpha}^{\infty} f(x)dx = \alpha \quad (\text{B} - 3)$$

La quantité $\chi_{h-1}^2(\alpha)$ est déterminée en utilisant la table de χ^2 . La comparaison entre les quantités (A - 1) et (A - 3), permet d'accepter ou de rejeter l'hypothèse H.

3. Test de Kolmogorov-Smirnov

Ce test n'exige pas de groupement des éléments de l'échantillon en classes et la répartition des données expérimentales se rapproche assez vite d'une répartition limite en fonction de l'augmentation de la taille des échantillons.

Soit $F_n^*(x)$, la fonction de répartition des données expérimentales et soit $F(x)$, une fonction de répartition spécifiée à laquelle doivent s'ajuster les valeurs expérimentales. Le test de Kolmogorov-Smirnov consiste à déterminer la quantité :

$$D_n = \sup | F_n^*(x) - F(x) | \quad (\text{B} - 4)$$

La distribution asymptotique de cette quantité est alors:

$$P(n^{1/2}D_n < y) \rightarrow \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k e^{-2k^2y^2} = K(y) \quad (\text{B} - 5)$$

La fonction $K(y)$ étant tabulée, on en déduit une valeur d_n et le test est effectué en écrivant que : $D_n > d_n$.

4. Test de Cramer-Von Mises

Comme le test de Kolmogorov-Smirnov, le critère de Cramer-Von Mises est un test d'hypothèse non paramétrique. Il consiste à élever au carré puis à effectuer la moyenne des

différences observées entre les distributions de probabilité cumulée expérimentales et théoriques. L'écart quadratique moyen est donné par :

$$n \omega_n^2 = \frac{1}{12n} + \sum_{k=1}^n \left[\frac{(2k-1)}{2n} - F(x_k) \right]^2 \quad (\text{B-6})$$

avec

$$n \omega_n^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} [F_n^*(x) - F(x)]^2 dx \quad (\text{B-7})$$

Dans ces expressions, n est le nombre d'échantillons mesurés $x_1, \dots, x_k, \dots, x_n$, formant la bases de données considérées et $F(x_k)$ est la fonction de probabilité cumulée théorique calculée au niveau (k).

La quantité $n \omega_n^2$ étant également tabulée, le test est réalisé par rapport à cette quantité.

ANNEXE C : Résultats du zonage climato-statistique

Tous ces résultats ont été obtenus suivant la méthodologie décrite au chapitre six. Pour chacun des douze mois de l'année, ils donnent les classes de temps associées aux stations étalons. Soit :

1. ALGER

JANVIER

Classe 1 :

Le temps de cette classe se présente assez fréquemment, puisque 60% des jours analysés en font partie. Les résultats indiquent que ce groupe est assez homogène malgré sa dimension, puisque pour la plupart des variables, les écarts types sont inférieurs à la moyenne des écarts types calculés à partir de toutes les classes (intra groupe). Vu l'indisponibilité de bulletin, cette classe se traduit par des températures douces (17°C à midi et basse le matin et le soir, une pression élevée et assez stable, un ciel nuageux, un vent enregistré peu significatif, des précipitations rares.

Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

FEVRIER

Classe 2 :

C'est la classe la plus significative, puisqu'elle comprend 84% des jours analysés, elle est relativement homogène. Ces données se traduisent par des températures entre 18°C la journée et faible le matin, un ciel nuageux, des précipitations rares, des vents faibles et une pression élevée.

Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

MARS

Classe 1 :

Cette classe comprend 80% des jours appartenant à ce mois, elle est homogène sauf le paramètre humidité Hr dont les écarts types sont supérieurs aux écarts types intra groupe DI. Elle se traduit par des températures douces (pendant la journée 19°C et faible le matin et le soir) un ciel nuageux surtout le matin, des pressions assez élevées et stables en majorité, des précipitations rares et un vent important.

Elle persiste avec deux épisodes de 9 jours.

AVRIL**Classe 1 :**

78% des jours de ce mois appartiennent à cette classe, qui est moyennement homogène et elle se traduit par des températures entre 22°C et 8°C, un ciel nuageux, des pressions faibles, des précipitations négligeables et un vent remarquable surtout à 15H.

Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

MAI**Classe 1 :**

Cette classe comprend 61% des jours du mois. Elle est moyennement homogène puisque les écarts type des variables considérées sont souvent plus grandes que les DI. Les données se caractérisent par des températures remarquables entre 25°C et 14°C, une nébulosité de 4, des pressions basses, pas de précipitations et des vents significatifs.

Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

Classe 2 :

Cette classe est aussi significative puisque 22,25% des jours du mois en font partie. Elle est presque homogène sauf pour le paramètre humidité, son jour étalon est caractérisé par des températures entre 22°C et 9°C, un ciel peu nuageux le matin puis nuageux le soir, quelques traces de pluie le soir (à partir de 18H) et un vent de vitesse égale à 6m/s.

Elle persiste avec deux épisodes de 7 jours.

JUIN**Classe 1 :**

Les jours de cette classe représentent 88% de ceux qui font partie de ce mois. Dans l'ensemble ce groupe est homogène, et ses paramètres se traduisent par des températures élevées entre 28°C et 16°C, un ciel nuageux, des pressions basses, des précipitations rares et des vents assez forts 5,7m/s. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

JUILLET**Classe 1 :**

Elle comprend presque 20% des jours totales du mois, elle est moyennement homogène pour l'ensemble des paramètres et caractérisées par des températures fortes à 35°C à partir de 9H et 16°C le matin, un ciel clair, des pressions très basses et un vent à 5m/s à 12H.

Elle persiste avec un épisode de 5 jours.

Classe 2 :

Elle est la plus importante du mois c à d 51% des jours du mois en font partie, cette classe est moyennement homogène, ces caractéristiques sont :

Les températures sont élevées et comprises entre 30°C et 20°C, le temps est humide et le ciel nuageux le matin avec quelque éclaircies à 12H. Les pressions sont basses et stables avec un vent à 6m/s surtout à 15H. Il n'y a pas de précipitations.

Elle persiste avec un épisode de 9 jours.

AOUT**Classe 2 :**

Cette classe se présente assez fréquemment puisque 92% des jours de ce mois en font partie. Ses caractéristiques sont : Températures relativement moyennes entre 38°C et 20°C, ciel peu nuageux, pressions basses, pas de précipitations et vent considérable à 5m/s.

Cette classe est assez homogène et persiste avec un épisode de 15 jours.

SEPTEMBRE**Classe 2 :**

Cette classe est parfaitement homogène, elle comporte 73% des jours du mois considéré. Ses éléments se traduisent par des températures entre 30°C à 12H et 18°C à 6H, un ciel nuageux avec quelque pluies surtout le matin, un vent d'une vitesse de 6m/s et des pressions faibles avec une visibilité moyenne.

Elle persiste avec un épisode de 14 jours.

OCTOBRE**Classe 1 :**

70% des jours du mois en font partie, avec une homogénéité considérable. Cette classe contient des éléments ayant des caractéristiques météorologiques dépressionnaires comme la présence des orages, le vent à 3m/s, ciel nuageux et températures entre 25°C pendant la journée et 12°C le matin et le soir. Elle persiste avec deux épisodes de 15 jours.

NOVEMBRE**Classe 3 :**

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Cette classe est la plus significative du mois, puisque 85% en font partie. Assez homogène, elle est caractérisée par des températures douces entre 19°C et 12°C, un ciel présentant un aspect nuageux, des précipitations importantes et l'existence de vent à faibles valeurs.

Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

DECEMBRE**Classe 1 :**

Ce groupe est moyennement homogène. Il comprend 78% des jours fictifs du mois, nous indiquons que les températures varient entre 16°C et 6°C, le ciel présente un aspect nuageux, les pressions sont importantes, les précipitations sont peu significatives et les vents faibles à toute heure.

Elle persiste avec un épisode de 14 jours.

2. MAGHNIA**JANVIER****Classe 2 :**

C'est la classe qui se présente plus fréquemment dans ce mois avec 72% des jours fictifs, elle est moyennement homogène surtout ce qui concerne la visibilité et les pressions. Les Températures sont basses entre 16°C et 2°C. Le Ciel est peu nuageux. Les vents sont faibles 2,8 m/s (15 h) et 0,8 m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

FEVRIER**Classe 2 :**

80% des jours du mois en font partie, cette classe est aussi moyennement homogène, le type d'évaluation météorologique associé à cette classe correspond à une situation dépressionnaire plus marquée par l'arrivée d'un front froid en surface avec la présence de rafales violentes de vent de vitesse 14 m/s direction sud ,le ciel est généralement nuageux et les températures sont entre 13°C et 9°C. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

MARS**Classe 1 :**

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Cette classe correspond à 73% des jours au total, elle n'est pas très homogène mais moyenne, La carte synoptique montre la présence d'une situation dépressionnaire et d'occlusion à caractère de front froid, un ciel très nuageux, une présence de faibles averses de pluie et des températures faibles, entre 9°C et 3°C. Elle persiste avec un épisode de 14 jours.

AVRIL**Classe 3 :**

C'est la classe la plus significative avec 70% des jours, elle est parfaitement homogène et se traduit par des températures entre 22°C et 7°C, un temps peu humide et un ciel peu nuageux. La vitesse de vent varie entre 5,2 m/s (15 h) et 2 m/s (9 h) et la pression est élevée.

Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

MAI**Classe 1 :**

64% des jours appartiennent à cette classe qui est assez homogène avec des températures enregistrées relativement élevées entre 28°C et 11°C, un ciel peu nuageux, un temps peu humide et une pression élevée. Le vent de vitesse varie entre 5,2 m/s (15 h) et 0,3 m/s (06 h).

Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

JUIN**Classe 1 :**

60% des jours appartiennent à cette classe qui est moyennement homogène. Les températures sont élevées entre 30°C et 14°C, le ciel est peu nuageux, il n'y a pas de précipitations et la vitesse du vent varie entre 5,7 m/s (15 h) et 1,2 m/s (9 h). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

JUILLET**Classe 1 :**

Elle est moyennement homogène avec 66% des jours. Les températures sont élevées entre 35°C et 18°C. Le temps est peu humide. Le ciel est clair. La vitesse de vent varie entre 6m/s (15 h) et 0,1 m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

AOUT

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Les classes 1 et 2 sont très importantes car elles expliquent respectivement 35% et 64% des jours du mois considéré, par contre l'homogénéité est presque assez vérifiée pour la première classe et moyenne pour la deuxième.

Classe 1 :

La carte synoptique montre que le site de Maghnia se situe entre deux situations dépressionnaires et anticyclonique, le ciel présente un aspect nuageux, les vents sont faibles et les températures enregistrées sont entre 32°C et 18°C. Elle persiste avec un épisode de 7 jours.

Classe 2 :

Les températures sont entre 37°C et 18°C. Le ciel est clair. La vitesse des vents varie entre 5,5 m/s (15 h) et 0,4 m/s (6 h). Le temps est peu humide.

Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

SEPTEMBRE**Classe 1 :**

La situation en surface présente un caractère dépressionnaire plus marqué par l'arrivée d'un front frais en surface, les vents enregistrés en surface sont de vitesse 3 m/s dans la direction Nord Ouest, le ciel est peu nuageux et les températures sont entre 25°C (pendant la journée) et 3°C (le matin et le soir). Cette classe est moyennement homogène avec 59% des jours. Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

Classe 2 :

35% des jours de ce mois appartiennent à cette classe qui est assez homogène sauf pour les visibilitées. Les températures sont élevées (entre 33°C et 18,5°C). Le ciel est peu nuageux. Il y a présence de précipitations mais de valeur peu significative. La vitesse du vent est relativement stable à 4 m/s. Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

OCTOBRE**Classe 1 :**

Cette classe n'est pas assez homogène et contient 81% des jours de ce mois. Les températures se situent entre 25°C et 11°C. Le ciel est peu nuageux. Les vents en surface sont de faibles valeurs. La pression est élevée. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

NOVEMBRE**Classe 1 :**

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Les températures sont douces entre 20°C et 8°C. Le ciel est peu nuageux. Il y a présence des précipitations de faibles valeurs. Les vents en surface sont faibles et stables.

Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

Classe 2 :

12% des jours font partie de cette classe qui nous informe que les températures sont fraîches entre 18°C et 9°C, la nébulosité est importante (5/10), les précipitations sont significatives (1,3 mm), les vents en surface sont élevés entre 49 m/s (12 h) et 4,6 m/s (06 h).

Elle persiste avec deux épisodes de 6 jours.

DECEMBRE**Classe 2 :**

C'est la classe qui se présente la plus fréquemment dans ce mois avec 82% des jours fictifs, elle est moyennement homogène. Les températures sont entre 16°C et 3°C. Le ciel est peu nuageux. Les vents en surface sont de valeurs faibles. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

3. BATNA**JANVIER****Classe1 :**

C'est la classe1 qui se présente le plus fréquemment dans ce mois avec 67% des jours fictifs, elle n'est pas très homogène car les DI sont inférieurs aux écarts type des données moyennes des paramètres climatiques étudiés. Les températures sont entre 11°C et 0°C. Le ciel est nuageux. Les vents en surface sont stables et faibles (2m/s). Elle persiste avec un épisode de 14 jours.

FEVRIER**Classe1 :**

Le type de temps associé à cette classe correspond à une situation dépressionnaire, le vent en surface est d'une vitesse 3m/s, le ciel est très nuageux, ces conditions donnent lieu à une activité pluviométrique, les vents en surface sont d'une vitesse 4m/s dans la direction NW, le ciel est nuageux, les températures sont très basses 6°C (la journée) et -1°C (le matin et le

soir). Cette classe comprend 14% des jours de ce mois. Elle persiste avec un épisode de 7 jours.

Classe2 :

Plus de 68% des jours appartiennent à cette classe qui est moyennement homogène. Le type d'évolution météorologique associé à cette classe correspondent à une situation dépressionnaire, le ciel est nuageux, les vents en surface sont d'une vitesse 4m/s dans la direction NW, les températures sont toujours très basses entre 5°C et 0°C. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

MARS

Classe2 :

Cette classe est assez homogène avec 72% des jours. Les températures sont entre 17°C et 2°C. Le ciel est peu nuageux. Les précipitations sont présentes mais peu significatives. Elle persiste avec deux épisodes de 11 jours.

AVRIL

Classe1 :

Elle est moyennement homogène surtout pour la visibilité avec 69%des jours. Les températures sont entre 18°C et 3°C. Le ciel est nuageux. Les précipitations sont faibles. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

Classe2 :

La carte synoptique montre la présence d'une dépression, le ciel est nuageux et là pluie est présente (0,5mm), les vents en surface sont très élevés (10m/s), les températures sont relativement élevées la journée (24°C) et fraîches le soir et le matin (8°C). 14% des jours considérés lui appartiennent. Elle persiste avec un épisode de 4 jours.

MAI

C'est la classe2 qui est la plus significative car elle comporte 76% des jours. Elle est moyennement homogène.

Classe2 :

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Les températures enregistrées sont entre 26°C et 9°C. Le ciel est peu nuageux. Les précipitations sont rares et peu significatives. La vitesse du vent varie entre 5,8 m/s (15 h) et 1m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

JUIN**Classe1 :**

les températures sont élevées entre 37°C et 18° C. Le ciel est nuageux. La vitesse du vent varie entre 6m/s (18 h) et 0,6m/s (06 h). 22% des jours considérés appartiennent à cette classe. Elle persiste avec un épisode de 7 jours.

Classe2 :

C'est la classe la plus représentative du mois car 48% des jours lui appartiennent, elle est aussi moyennement homogène. La carte synoptique montre que la région de Batna se situe entre deux situations dépressionnaires et anticycloniques, le ciel est très nuageux, les températures sont moins élevées pendant la journée (27°C) et assez fraîches (12°C). Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

JUILLET**Classe4 :**

La classe 4 est parfaitement homogène, elle engendre 57% des jours de ce mois. Les températures sont entre 35°C et 16°C. Le ciel est clair. La vitesse du vent varie entre 6,6 m/s (18 h) et 0,4m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

AOUT**Classe2 :**

C'est la classe la plus fréquente dans ce mois puisque 73% des jours lui appartiennent, elle n'est pratiquement peu homogène. Le type de temps associé à cette classe correspond à une situation anticyclonique, la situation en surface est calme, le ciel est clair, les températures sont entre 31°C (la journée) et 10°C (le matin et soir). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

SEPTEMBRE**Classe2 :**

75% des jours appartiennent à cette classe qui est moyennement homogène pour tous les paramètres climatiques. La température varie entre 29°C et 14° C. Le ciel est peu nuageux.

La vitesse du vent varie entre 0,9m/s (06 h) et 5,7m/s (15 h). Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

OCTOBRE

Classe1 :

La carte synoptique montre que la région de Batna se situe entre deux situations dépressionnaire et anticyclonique, le ciel est nuageux, il y a présence des précipitations avec des valeurs importantes (24mm). Les températures sont moins élevées pendant la journée (28°C) et fraîches le soir et le matin (13°C). Elle est la plus significative avec 60% des jours fictifs. Elle est moyennement homogène car les DI sont inférieurs aux écarts types de la classe pour presque tous les paramètres. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

Classe2 :

Le type de temps associé à cette classe correspond à une situation dépressionnaire, le vent est à vitesse faible, la nébulosité est faible d'une valeur 2/10, les températures sont toujours basses entre 28°C (la journée) et 13°C (matin et soir). Elle comprend 16%des jours. Elle persiste avec deux épisodes de 5 jours.

NOVEMBRE

Classe1 :

12% des jours appartiennent à cette classe qui est moyennement homogène ; son évolution météorologique correspond à une situation dépressionnaire plus marquée par la présence d'un front froid en surface et de rafales violentes des vents (8m/s), le ciel est nuageux, les températures sont basses entre 13°C (la journée) et 7°C(matin et soir). Elle persiste avec trois épisodes de 3 jours.

Classe2 :

68% des jours fictifs appartiennent à cette classe qui n'est pas très homogène, elle contient des éléments pour lesquels la situation est anticyclonique, la vitesse du vent est très faible, le ciel est nuageux, il y a présence d'averses de pluie, les températures varie entre 18°C (journée) et 7°C (matin et soir). Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

DECEMBRE

Classe1 :

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Plus de 52% des jours appartiennent à la classe 1 qui n'est pas assez homogène notamment concernant la visibilité. La situation en surface présente un caractère anticyclonique plus marqué par la présence d'un front froid en surface avec un système de haute pression, le ciel est peu nuageux, les températures sont basses entre 08°C et 04°C. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

Classe2 :

12% des jours seulement de ce mois appartiennent à cette classe qui est assez homogène. Les températures sont entre 16°C et 1° C. Le ciel est peu nuageux La vitesse du vent varie entre 7,2m/s et 0,8m/s (19 h). Elle persiste avec un épisode de 8 jours.

Classe3 :

Cette classe est assez homogène avec 12.5% des jours de ce mois. La carte synoptique montre que la région de Batna se situe entre deux situations dépressionnaire et anticyclonique avec la présence d'un front froid en surface, la vitesse du vent en surface est élevée (8m/s dans la direction SW), le ciel présente un aspect peu nuageux, les températures sont entre 17°C (la journée) et 09°C (le matin). Elle persiste avec un épisode de 5 jours.

4. GHARDAIA**JANVIER****classe1 :**

Plus de 68% des jours considérés font partie de cette classe qui est moyennement homogène avec des températures entre 15°C et 5°C, un ciel peu nuageux, la présence des précipitations mais de faibles valeurs, des vents en surface stables (4m/s). Elle persiste avec deux épisodes de 9 jours.

classe2 :

Cette classe comporte 21% des jours de ce mois avec une température relativement élevée entre 19°C et 9°C, un ciel peu nuageux et un vent en surface de vitesse qui varie entre 5,4m/s (12 h) et 3,0m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 9 jours.

FEVRIER**Classe1:**

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Elle comprend 28% des jours et se traduit par des températures relativement élevées entre 22°C et 10°C, un ciel peu nuageux, des vents en surface stables et de valeur 4m/s. Elle persiste avec un épisode de 9 jours.

Classe2 :

51% des jours du mois font partie de cette classe qui est moyennement homogène avec des températures entre 18°C et 5°C, un ciel toujours peu nuageux et des vents en surface de 4m/s. Elle persiste avec deux épisodes de 12 jours.

MARS**Classe1 :**

C'est la classe la plus représentative puisqu'elle engendre 78% des jours fictifs, elle est moyennement homogène avec des températures sont entre 22°C et 10°C, un ciel peu nuageux, des vents en surface très forts (9m/s) et la présence de traces de pluie. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

AVRIL

C'est les classes 1 et 2 qui sont les plus représentatives avec respectivement 59% et 25% des jours fictifs, elles sont assez homogènes.

Classe1:

Les températures sont entre 24°C et 12°C. Le ciel est peu nuageux. Les vents en surface sont de 4,7m/s. Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

Classe2:

Les températures sont élevées (entre 30°C et 16°C). La nébulosité est de 3/10. Les vents en surface sont stables et atteignent 5,9m/s. Elle persiste avec un épisode de 6 jours.

MAI**Classe1:**

Cette classe est homogène pour l'ensemble des paramètres sauf, pour les températures ou les DI sont inférieurs aux écarts- types de la classe, elle comporte 75% des jours, le type de temps associé à cette classe correspond à une situation anticyclonique, le vent en surface est de forte vitesse (5m/s dans la direction NW), le ciel est clair, les températures sont moins élevées la journée (38°C) et fraîches le matin et le soir (11°C). Elle persiste avec un épisode de 14 jours.

JUIN

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Les classes les plus significatives dans ce mois sont les deux premières qui sont moyennement homogènes avec respectivement 56% et 32% des jours.

Classe1:

Les températures sont entre 35°C et 22°C. Le ciel est peu nuageux. La vitesse des vents varie entre 6,2m/s(9h) et 4,4m/s(06h). Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

Classe2:

Les températures sont très élevées (entre 41°C et 27°C). Le ciel est peu nuageux. Les vents en surface sont stables et atteignent 4m/s. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

JUILLET**Classe1:**

C'est la classe la plus fréquemment présentes au cours de ce mois avec 74% des jours, elle est moyennement homogène. Les températures sont entre 40°C et 27°C. Le ciel est clair. Les vents en surface sont stables et atteignent 4m/s. Elle persiste avec deux épisodes de 8 jours.

AOUT**Classe1:**

Cette classe est moyennement homogène elle explique 71% des jours. Les températures varient entre 39°C et 26°C. Le ciel est clair. La vitesse des vents n'est pas stable et varie entre 4,1m/s (18h) et 1,3m/s (06h). La pression est relativement élevée. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

SEPTEMBRE**Classe2:**

Elle est la plus représentative des classes puisqu'elle comporte 82% des jours et son homogénéité est assez moyenne, le type de temps associé à cette classe est caractérisé par la présence d'une situation dépressionnaire, les pressions sont relativement faibles, le vent en surface est de vitesse 6m/s pour la direction NE, le ciel est clair, il y a présence de la tempête de sable, les températures sont élevées la journée (35°C) et douces le matin et le soir (15°C).

Elle persiste avec un épisode de 14 jours.

OCTOBRE

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Les classes 2 et 5 sont les plus significatives, la première est assez homogène par contre la deuxième n'est pas très homogène pour l'ensemble des paramètres, elles expliquent respectivement 63% et 26% des jours.

Classe2:

Les températures enregistrées sont moins élevés (entre 29°C et 17°C), le ciel est peu nuageux, les vents en surface sont stables et de valeur 4m/s. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

Classe5:

Le type de temps associé à cette classe est caractérisé par la présence d'une situation anticyclonique, le vent en surface est de vitesse 4m/s dans la direction SW, le ciel est peu nuageux, les températures sont élevées la journée (28°C) et douces le matin et le soir (16°C).

Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

NOVEMBRE**Classe1 :**

Plus de 70% des jours appartiennent à cette classe qui assez homogène avec des températures douces entre 20°C et 10°C, un ciel peu nuageux. La vitesse des vents entre 4,2m/s (15 h) et 2,7 m/s (18 h). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

DECEMBRE**Classe2 :**

Cette classe est moyennement homogène sauf pour la pression où les DI sont inférieurs aux écarts- types de la classe. Les températures sont entre 17°C et 6°C. Le ciel est clair. Les vents en surface sont toujours stables avec des vitesses de 3m/s. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

5. IN AMENAS**JANVIER****Classe1 :**

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

62% des jours de ce mois font partie de cette classe, l'homogénéité est assez vérifiée sauf pour la pression et la visibilité. Elle se traduit par des températures situées entre 17°C et 3° C, un ciel clair, une vitesse du vent variable entre 9,4m/s(12 h) et 2,2m/s (6 h). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

Classe4 :

Elle comprend 17%des jours de ce mois et se traduit par des températures relativement moins élevées (entre 22°C et 7°C), un ciel peu nuageux et un temps peu humide. La vitesse du vent se situe entre 6.1m/s (12 h) et 3.4 m/s (6 h). Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

FEVRIER**Classe2 :**

C'est la classe la plus significative, puisqu'elle engendre 63% des jours fictifs, elle est assez homogène, ses éléments synoptiques se traduisent par :des températures entre 20°C et 4°C, un ciel clair, un temps peu humide et des vents compris entre 4.6m/s (12 h) et 2.5m/s (6 h). Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

MARS**Classe3 :**

Cette classe est très homogène avec 22% des jours du mois de mars lui appartenant. Les températures sont relativement moins élevées (entre 21°C et 6°C). Le ciel est clair. Le temps est peu humide. La vitesse du vent est de 4 m/s. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

Classe4 :

C'est la classe la plus fréquemment présente dans ce mois, elle comprend 56% des jours fictifs :

Les températures sont relativement élevées (entre 25°C et 10° C). Le ciel est clair. La vitesse du vent varie entre 6,4m/s (9 h) et 3,7m/s (6 h). Elle est moyennement homogène, et persiste avec un épisode de 15 jours.

AVRIL

Les deux classes 1 et 2 sont les plus fréquemment présentent dans ce mois avec respectivement 38 % et 36 %.

Classe 1 :

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Le type de temps associé à cette classe correspond à une situation anticyclonique, le ciel est clair, le régime du vent est très faible, les températures enregistrées sont élevées, soit 36°C pendant la journée et 19°C le soir et le matin, cette classe est très homogène. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

Classe 2 :

Cette classe est assez homogène sauf pour les pressions et la visibilité, elle contient des éléments ayant des caractéristiques météorologiques cycloniques, les pressions sont basses, le régime des vents correspond à une vitesse de 13m/s, le ciel est couvert, de fortes averses, des pluies et des tempêtes de sable sont présentes, les températures sont entre 26°C et 7°C. Elle persiste avec un épisode de 9 jours.

MAI**Classe 3 :**

Elle comprend 33% des jours de ce mois, toujours homogène sauf pour les pressions. Elle se caractérise par des températures élevées (entre 37°C et 28°C), un ciel présentant un aspect clair, un vent de valeur importante entre 7.00m/s (09 h) et 4.2m/s (12 h), des pressions moins élevées et un temps moins humide. Elle persiste avec un épisode de 10 jours.

Classe 4 :

Cette classe comporte 29% des jours, elle est très homogène sauf pour l'humidité. Les températures sont toujours élevées (entre 32°C et 17°C). Le ciel est clair. Les pressions sont relativement élevées. Le vent est de valeur stable (4m/s). Elle persiste avec deux épisodes de 9 jours.

JUIN

C'est la classe 3 qui est la plus significative avec 47% des jours

Classe 2 :

20% des jours appartiennent à cette classe. Elle se traduit par : des températures très élevées (entre 39°C et 23°C), un ciel clair, une vitesse du vent comprise entre 7.1m/s (09 h) et 5.3m/s (18 h). Le temps est peu humide. Elle persiste avec un épisode de 4 jours.

Classe 3 :

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Cette classe est assez homogène et nous informe que les températures sont très élevées (entre 43°C et 25°C), que le ciel est peu nuageux et que la vitesse du vent est stable entre 4.4m/s (15 h) et 6.2m/s (09 h). Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

JUILLET**Classe 2 :**

Cette classe comporte 46%des jours, elle est moyennement homogène sauf pour la visibilité Les températures sont toujours élevées (entre 40°C et 23°C). Le temps est relativement sec. Le ciel est clair. Elle persiste avec deux épisodes de 8 jours.

Classe 4 :

17% des jours appartiennent à cette classe, la carte synoptique montre que la situation en surface correspond à une situation anticyclonique et à des hautes pressions, les vents en surface sont non significatifs, le ciel est clair, les températures sont entre 35°C et 25°C. Elle persiste avec un épisode de 9 jours.

AOUT**Classe 1 :**

Les températures sont entre 39°C et 29°C. Le ciel est clair. La vitesse du vent en surface est stable (4m/s). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

Classe 2 :

54% des jours du mois d'août font partie de cette classe qui est très homogène concernant tous les paramètres avec des températures entre 37°C et 22°C, un ciel clair, des pressions relativement élevées et une vitesse du vent de 5m/s. Elle persiste avec un épisode de 5 jours.

SEPTEMBRE**Classe 1:**

55% des jours de ce mois font partie de cette classe, qui est homogène sauf pour la pression. Cette classe se traduit par des températures entre 37°C et 21°C, un ciel est clair, des pressions élevées et une vitesse du vent qui varie entre 5.5m/s (09 h) et 2.8m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

Classe 2 :

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Elle comprend 29% des jours fictifs, elle est moyennement homogène. Les températures sont élevées 40°C et 25°C. Le ciel est peu nuageux. La vitesse de vent se situe entre 5.7m/s (09 h) et 2.8m/s (06 h). Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

OCTOBRE**Classe 2 :**

Cette classe est moyennement homogène, elle comprend 54% des jours. Les températures sont toujours entre 33°C et 17°C. Le ciel est peu nuageux. Les vents en surface sont stables (4m/s). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

Classe 5 :

La carte synoptique montre que la région d'In Amenas se situe entre deux situations anticyclonique et dépressionnaire, le ciel est clair, les vents en surface sont de faibles valeurs, les températures sont relativement moins élevées entre 26°C (la journée) et 12°C (matin et soir). Elle englobe 17% des jours de ce mois. Elle persiste avec deux épisodes de 4 jours.

NOVEMBRE**Classe 2 :**

54% des jours du mois considéré en font partie, elle est moyennement homogène, La carte synoptique montre que la situation est anticyclonique, la vitesse de vent en surface est 6 m/s dans la direction E, le ciel est peu nuageux, les températures sont élevées pendant la journée (27°C) et douces le matin et le soir (13°C). Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

DECEMBRE**Classe 1 :**

20% des jours du mois font partie de cette classe qui est moyennement homogène, Le type de temps associé à cette classe correspond à une situation dépressionnaire en présence d'un système de faible pression, la vitesse de vent est de 3 m/s dans la direction Est, le ciel est clair, les températures sont entre 21°C (la journée) et 05°C (matin et soir). Elle persiste avec un épisode de 9 jours.

Classe 3 :

Cette classe est toujours moyennement homogène avec 29% des jours, elle se traduit par des températures relativement élevées (entre 20°C et 5°C), un ciel peu nuageux et la

vitesse de vent qui varie entre 1,8 m/s (06 h) et 4,1 m/s (15 h). Elle persiste avec un épisode de 8 jours.

6. TAMANRASSET

JANVIER

Classe 1 :

Ce groupe est très homogène pour l'ensemble des paramètres. Il contient 15% des jours du mois avec une situation synoptique traduite par des températures entre 24°C et 8°C, un ciel nuageux, des précipitations rares et peu significatives et la présence de vent avec de fortes pressions. Elle persiste avec un épisode de 7 jours

Classe 2 :

Cette classe se présente fréquemment avec 59% des jours du mois considéré. Par contre, elle n'est pas très homogène surtout pour la pression. Elle nous informe que les températures sont entre 19°C et 3°C. Les pressions sont élevées. Le ciel est clair. Il n'y a pas de précipitations et il y a présence de vent. Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

FEVRIER

Classe 2 :

Cette classe est moyennement homogène, elle comprend 82% des jours fictifs du mois de Février, ses caractéristiques synoptiques sont des températures entre 22°C et 5°C, un temps moins humide, un ciel nuageux et des vents faibles. Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

MARS

Classe 2 :

La classe est homogène, elle exprime 26% des jours fictifs et se caractérise par des températures entre 25°C et 10°C le matin, un ciel clair, des vents de forte vitesse (9m/s à 12 h), une visibilité importante et des pressions élevées. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

Classe 4 :

21% des jours de ce mois en font partie. Les températures sont entre 27°C et 14°C. Le ciel est nuageux. Le temps est relativement humide. Les précipitations sont peu significatives. Les vents sont importants. Cette classe est moyennement homogène. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

AVRIL

Classe 1 :

Cette classe est assez homogène, elle explique 17% des jours du mois, ses caractéristiques sont des températures élevées (entre 31°C et 18°C), un ciel présentant un aspect nuageux, des pressions moins élevées et des vents significatifs (4m/s). Elle persiste avec un épisode de 8 jours.

Classe 3 :

C'est la classe qui se présente fréquemment dans ce mois puisque 41% des jours en font partie. Elle se traduit par des températures variant entre 28°C et 12°C, un ciel clair, des vents de 6m/s et un temps sec.

Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

MAI

Les groupes 1 et 2 sont les plus significatifs puisque le premier explique 46% et le second 37% des jours considérés.

Classe 1 :

La carte synoptique montre la présence d'une situation anticyclonique et d'un système de hautes pressions. Le vent est de 6m/s et de direction E. Le ciel est clair, les températures sont très élevées pendant la journée (36°C) et douce le matin et le soir (18°C). Cette classe est moyennement homogène. Elle persiste avec un épisode de 7 jours.

Classe 2 :

Cette classe est très homogène, surtout concernant la pression, puisque les écarts types de la classe sont supérieures aux écarts types intra groupe DI. Ses éléments synoptiques se traduisent par des vents de valeurs élevés (7m/s), des températures entre 33°C et 17°C, pas de pluie et un ciel nuageux. Elle persiste avec un épisode de 12 jours.

JUIN

Dans ce mois c'est la deuxième classe qui est significative avec 40% des jours, puis la troisième classe avec 25% des jours. Toutes les classes sont pratiquement homogènes sauf pour la visibilité.

Classe 2 :

Les températures sont entre 37°C et 23°C, le ciel est nuageux, les précipitations sont peu significatives et la vitesse du vent est de 5m/s. Elle persiste avec un épisode de 7 jours.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

Classe 3 :

Les températures entre 35°C et 21°C, le ciel est nuageux et la vitesse de vent élevé (9m/s à 9 h).

Elle persiste avec un épisode de 6 jours.

JUILLET

Classe 2 :

Cette classe comprend 45% des jours du mois considéré, elle est assez homogène pour l'ensemble des paramètres climatiques et se traduit par des températures entre 35°C et 22°C, un ciel clair, des pressions élevées et une grande visibilité. Le régime des vents varie entre 8m/s (9 h) et 5m/s (18 h). Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

AOÛT

Classe 1 :

Cette classe est très homogène, puisque les écarts types intra groupe DI sont inférieurs aux écarts types de la classe concernant les paramètres étudiés. Elle représente 33% des jours du mois d'Août et se traduit par des températures élevées, variant entre 35°C et 23°C, un ciel nuageux, la présence de quelques traces de pluies et des vents de vitesse égale à 4m/s. Elle persiste avec un épisode de 7 jours.

Classe 2 :

Cette classe se présente plus fréquemment que les autres groupes avec un pourcentage de 51% de la totalité des jours du mois. Par contre, elle est moyennement homogène et ces éléments synoptiques se traduisent par des températures toujours élevées, variant entre 35°C et 23°C, un ciel peu nuageux et des vitesses de vent de 5m/s. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

SEPTEMBRE

La classe 1 est la plus significative puisqu'elle comprend 73% des jours fictifs du mois.

Classe 1 :

Les températures sont entre 34°C et 21°C. Le ciel est nuageux. Les précipitations sont de faibles valeurs (0,1mm). Le régime des vents varie entre 6,4m/s (9 h) et 4,8m/s (18 h). Cette classe est moyennement homogène. Elle persiste avec un épisode de 13 jours.

OCTOBRE**Classe 1 :**

Cette classe est moyennement homogène, elle comporte 62% des jours fictifs du mois considéré. Les températures sont entre 30°C et 16°C. Le ciel est peu nuageux. La vitesse du vent est entre 5,1m/s (12 h) et 1,4m/s (6 h). Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

Classe 2 :

21% des jours concernés en font partie, elle se traduit par des températures élevées entre 34°C et 23°C, un ciel présentant un aspect nuageux, des précipitations rares toujours peu significatives et la présence toujours de vent avec une vitesse moyenne de 5m/s. Elle persiste avec un épisode de 11 jours.

NOVEMBRE**Classe 1 :**

Elle comprend 29% du nombre total des jours du mois considéré, elle est très homogène surtout pour la pression. Son type de temps correspond à une situation dépressionnaire. Les vents en surface malgré leur faiblesse, ont une direction sud, le ciel est nuageux et les températures relativement fraîches, se situent entre 21°C et 11°C. Elle persiste avec trois épisodes de 5 jours.

Classe 3 :

Cette classe est la plus fréquemment présente dans ce mois, 41% des jours en font partie. Ses éléments climatiques correspondent à des températures relativement élevées (entre 27°C et 12°C), un ciel peu nuageux et des vents assez stables de valeur moyenne égale à 4m/s. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

DECEMBRE**Classe 1 :**

83% des jours de ce mois font partie de cette classe qui est assez homogène. Elle se caractérise par des températures entre 22°C et 6°C, un ciel peu nuageux et une vitesse du vent comprise entre 4,5m/s et 1,4m/s. Elle persiste avec un épisode de 15 jours.

Références

- Ackerman EA. The Köppen classification of climates in North America. *Geog. Rev.* 1941, 31, 105-111
- Adane A, Ramdani T. Estimation of global solar radiation using sunshine duration for Bedjaia, Algeria. In : *Proceedings of third World Renewable Energy Congress.* Oxford : Elsevier Science Ltd, 1996 ;III : 2154-2157.
- A.F.E.D.E.S N°4. Généralités sur le rayonnement solaire. 1974.
- Afgan NH, Gobaisi DA Cavalho MG, Cumo M. Sustainable energy development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1998; 2(3) : 235-286
- Aguiar R, Collares-Pereira M. Statistical properties of hourly global radiation. *Solar Energy* 1992; 48(3) : 157-168.
- Aguiar R, Collares-Pereira M, Tag A. A time-dependent, autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation. *Solar Energy* 1992; 49(3) : 167-174.
- Aires F, Chedin A. and Nadal J.P. Independant component analysis of multivariate time series : Application to the tropical SST variability. *Journal of Geophysical research* 2000 ; 105(13),17 : 437-455.
- Albar OF, Yousif B Wind, solar energy potential in Makkah (Saudi Arabia) comparison with Red Sea coastal sites. *Renewable Energy* 1991; 1(3/4), 435-440.
- Algifri AH, Bin Gadhi SM, Nuaguna BT. Thermal behaviour of adobe and concrete houses in Yemen. *Renewable Energy* 1992; 2(6) : 597-602.
- Alnaser WE. New model to estimate the solar global irradiation using astronomical and meteorological parameters. *Renewable Energy* 1993; 3(2/3) : 175-177.
- Alsaad MA. Solar radiation map for Jordan. *Solar and Wind Technol* 1990;7(2-3) : 267-275.
- Amato U, Cuomo V, Fontana F, Serio C. Statistical predictability and parametric models of daily ambient temperature and solar irradiance : An anlysis in the Italian climate. *Journal Appli. Meteor.* 1989;28 : 711-721.
- Ångström A. Solar and terrestrial radiation, *Q. J. R. Met. Soc.* 1924; 50 : 121 – 125.
- A.N.R.H.. Analyse granulométrique d'une terre. Note interne , Novembre 1999.
- Arlery R, Grisolet H et Guilmet D. *Climatologie, Méthodes et Pratiques.* Paris : Edition Gauthier Villars, 1973.
- Asch G. *Les Capteurs en Instrumentation Industrielle.* Paris : Edition Dunod, 1983.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

-
- Astier R, Duhamel Ch. Modèles de prévision et de simulation de l'irradiation solaire au pas de temps de l'heure. *Rev. Phy. Appl.* 1983;18 : 29-38.
- Atick JJ. Could information theory provide an ecological theory of sensory processing. *Network Comput. Neural Syst.* 1992; 3 : 213-251.
- Awbi HB. Ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1998; 2(1-2) : 157-188.
- Bagnold RA. The physics of blown sand and desert dunes. Londres : Methuen, 1954; XXIV-226p.
- Bajwa MM. Direct convective passive cooling as an energy conserving technique in the maritime desert climate of the Arabian Gulf Region. *Renewable Energy* 1992; 2(3) : 255-273.
- Baker R. Desertification and control. A study of the UN Plan of Action and its possible application. *Sci Rev Arid Zone Research*. Jodhpur : Scientific Publishers. 1982; 285p.
- Balling RC. Harmonic analysis of monthly insolation levels in the U.S. *Solar Energy* 1983 ; 31(3) : 293-298.
- Balouktsis A Tsanakas D, Vachtsevanos G. Stochastic modeling of daily global solar radiation. *Solar Energy* 1989;7 : 1-10.
- Barlaud M, Alengrin G, Menez J, Grenier Y, Aboutajdine D. Méthodes d'identification paramétriques pour des signaux non stationnaires perturbés par un bruit blanc. In : *Proceeding Onzième Colloque GRESTI Nice, Juin 1987* ; 749-752.
- Barnston A, Livezey R. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Weather Rev.* 1987 ; 115 : 1083-1126.
- Bernus E. La sécheresse dans la tradition touarègue. In. B Bret, les hommes face aux sécheresses, Nordeste brésilien, sahel africain. Paris : EST-IMEAL. 1989 ; 251-256.
- Black JN, Bonython CW, Prescott JA. Solar radiation and the duration of sunshine. *Quart. J. Roy. Met. Soc* 1954 ; 231-235.
- Boileau G, Guerrier B. Comparaison de modèles statistiques saisonniers et non-saisonniers en météorologie solaire. *Rev. Phys. Appl* 1985 ;125-130.
- Boileau G, Bénard C. Modélisation de l'irradiation solaire au pas de temps de l'heure. *Revue Phys.* 1981; 16 : 237-347.
- Bouroubi MY. Modélisation du rayonnement solaire à l'échelle journalière et horaire. Alger (Algérie), USTHB. Thèse de Magister. 1998.
- Butera FM. Principles of thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1998; 2(1-2) : 39-87.

-
- Callegari M, Festa R, Ratto CF. Stochastic modelling of daily beam irradiation. *Renewable Energy* 1992;2(6) : 611-624.
- Castini F, Festa R, Ratto CF. Stochastic modelling of wind velocities time series. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 1998;74-76 : 141-151.
- Cazenave A, Domonth K, Gennero MC, Ferret B. Global mean sea level changes observed by Topex-Poseidon and ERS-1. *Productivity and water use. Plant and Soil* 1998; 23(9-10) : 1069-1075.
- Chaudhary Q-U-Z. A procedure to obtain global solar radiation maps from sunshine duration for Pakistan. *Solar and Wind Technol* 1990;7(2-3) : 245-253.
- Christensen WI, Bryson R.A. An investigation of the component analysis for weather classification. 1987.
- Christian C, Maurice L. L'assainissement en milieu urbain ou rural. Paris : Edition du moniteur, Tome-1, 1991.
- Coch H. Bioclimatism in vernacular architecture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1998; 2(1-2) : 67-87.
- Coppolino S. Validation of a very simple model for computing global solar radiation in the European, African, Asian and North American areas. *Solar and Wind Technol.* 1989; 7(4) : 489-494.
- Coulson KL. *Solar and Terrestrial radiation.* Academic Press, 1975.
- Daget P, Djellouli Y. Le climat méditerranéen change-t-il? La sécheresse à Alger au cours des cent dernières années. *Publ Assoc Intern Climat* 1991 ; 4 : 187-95.
- Dagnelie P. *Analyse statistique à plusieurs variables.* Grenoble : Presses agronomiques, 1989.
- Daniel AR, Chen AA. Stochastic simulation and forecasting of hourly average wind speed sequences in Jamaica. *Solar Energy* 1991 ; 46 : 1-11.
- Darwish ASK, Sayigh AAM. Wind energy potential in Irak. *Solar and Wind Technology* 1988; 5 : 215-222.
- Decarli F, Groppt C, Festa R, Ratto CF. A procedure to obtain global radiation maps from sunshine durations at isolated stations in a region with complex orography. *Solar Energy* 1986;37 : 91-108.
- De Miguel A, Bilbao J, Salson S, Lage A. Solar radiation and sunshine hour maps in Castilla and Leon region (Spain). *Renewable Energy* 1994;4(8) : 933-940.
- Déqué M, Marquet P, Jones RG. Simulation of climate change over Europ using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dyn.*1998; 14 : 173-189.

-
- Dixon WJ. BMDP Statistical software. London, Los Angeles, Berkeley : University of California Press, 1985.
- Dubief J. Alizés, harmattan et vents de sables étésiens, Alger : Inst Rech Sah. 1951 : T VII : 187-9.
- Dubief J. Les vents et le déplacement du sable au Sahara. Alger : Inst Rech Sah. 1952; T VIII : 123-62.
- Douguedroit A. The variations of dry spells in Marseille from 1865 to 1984. Journal of Climatology, Royal Meteorological Society 1987; 7 : 541-551.
- Eckholm EP. Losing ground. Environment stress and world food. Prospects. New-York : WW Norton. 1976; 47p.
- Edinger R, Kaul S. Human kind's detour toward sustainability : past, present and future of renewable energies and electric power generation. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2000; 4(3) : 295-313.
- Elkadi H. Ecological approach for the evaluation of intelligence energy features in a building's skin. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2000; 4(1) : 91-103.
- Emsalem R. Climatologie générale. Tome-1, 1970.
- Escourrou G. Climatologie Pratique. Paris : Edition Masson, 1978.
- Fennesssy MJ and Shukla J. Seasonal prediction over with a regional model Nested in a global model, Journal of Climate , 2000 ; 13 : 2605-2627.
- Festa R, Jain S, Ratto CF. Stochastic modelling of daily global irradiation. Renewable Energy 1992; 2(1) : 23-34.
- Fleagle R, Businger G JA. An Introduction to Atmospheric physics. Second Edition-A.P. 1980.
- Gallegos HG, Lopardo R. Spatial variability of the global solar radiation obtained by the solarimetric network in the Argentina Pampa Humeda. Solar energy 1988 ; 40(5).
- Gallo C. The utilization of microclimate elements. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1998; 2(1-2) : 89-114.
- Garcia A, Torres JL, Prieto E, De Francisco A. Fitting wind speed distributions : a case study. Solar energy 1998;62(2) : 139-144.
- Giraud C, Longhetto A, Brusasca G, Colombo V, Elissei G, Morselli MG. Climatological study of the adrano site of the Eurelis Solar Mirror Power Plant. Solar Energy 1987;39 : 459-466.
- Gornitz V. Monitoring sea level changes. Clim. Change 1995 ; 31 : 515-544.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

-
- Graham VA, Hollands KGT. A method to generate synthetic hourly solar radiation globally. *Solar Energy* 1990; 44(6) : 333-342.
- Guillemot J. *Eléments de géologie*. Edition Technip, 1986.
- Guttman NB, Plantico MS. Climatic temperature normals. *Journal of Climate and Appl. Meteor.* 1987;26(10) : 1428-1435.
- Haddad B, Youcef Ettoumi F, Adane A, Sauvageot H. Modélisation des précipitations dans le Nord de l'Algérie. *Climat et environnement*. XIV Colloque international de la climatologie. Minerva S.L. Septembre 2001 ; 157.
- Hall MG, Oppenheim AV, Willsky AS. Time-varying parametric modeling of speech. *Signal Processing* 1983;5(3) : 267-285.
- Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *J. Geophys. Res. – Atmos.* 1997 ; 102 : 6831-6864.
- Hasan A. Wind energy in West Bank and Gaza Strip. *Renewable Energy* 1992; 2(6), 637-640.
- Hay JE. Calculating solar radiation for inclined surfaces : Practical approaches. *Renewable Energy* 1993; 3(4/5) : 373–380.
- Hellden U. Desertification monitoring : is the desert encroaching ? *Desertification control. Bulletin, Nairobi, Kenya* 1988 ; 17 : 8-11.
- Hennesey JP Jr. Some aspects of wind power statistics. *Journal Appl. Meteor.* 1977; 16 : 119-128.
- Hillring B, Krieg R. Wind energy potential in southern Sweden – Example of planning methodology. *Renewable energy* 1998; 13(4) : 471-479.
- Horvath G, Toth L. The activities in wind energy in Hungary. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2001; 5(2) : 191-200.
- Houghton JT, Meiro Filho LG, Callander BA, Harris N, Kattenberg A, Maskell K. *Climate Change 1995. The Science of Climate Change*. New York : Cambridge University Press, 572p, 1996.
- Hulme M. A 1951-80 global land precipitation climatology for the evaluation of general circulation models. *Climate Dyn.* 1992; 7 : 57-72.
- Hutchinson MF. Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: I-II. Two dimensional smoothing of data with short range correlation. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis* 1998 ; 2(2):153-185.
- Jambu M. *Classification automatique pour l'analyse des données*. Paris : Ed Dunod, 1978.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

-
- Jones D, Weymouth G. An Australian monthly rainfall dataset. Technical Report 70, Bur. Meteor., Australia. 1997 ; 19pp.
- Justus CG, Hargraves WR, Mikhail A, Graber D. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *Journal Appl. Meteor* 1978; 17 : 350-353.
- Kalkstein LS, Tan G, Skindlov JA. An evaluation of three clustering procedures for use in synoptic climatological classification. *Journal of Climate and Appl. Meteor.* 1987, 26(6) : 717-730.
- Kibboua M, Boutahraoui S. Le barrage vert : Bilan et résultats préliminaire . Séminaire International Sur les Techniques de Reboisement et lutte contre la désertification - Bou-Saada 5-11 Dec. 1987.
- Köppen W, Geiger R. *Handbuch der Klimatologie*, 5 Vols., Berlin, 30-1930.
- Köppen W. 1931. *Klimakarte der Erde*. Grundriss der Klimakunde, 2nd Ed., Berlin and Leipzig.
- Koussa M, Saheb D, Yaiche R, Mefti A. Correlation between hourly solar radiation components in Algiers-Bouzareah and the seasonal effect on their values. *Proceeding Renewable Energy Sources*. 1990 ; 21-27.
- Ledermann W, Liloyd E. *Handbook of Applicable Mathematics*, Vol. VI. Statistics, Part A. New York : John Wiley and Sons, 1984.
- Legget J. A guide to the Kyoto Protocol : a treaty with potentially strategic implications for the renewable industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 1998; 2(4) : 345-351.
- Lehmann EL. *Testing statistical hypotheses*, New York : John Wiley and Sons, 1959.
- Le Provost C. Le niveau de la mer, un index fondamental pour l'océanographie et la climatologie. *La Météorologie* 1991; 7(40) : 3-12.
- Li J. The bioclimatic features of vernacular architecture in China. *Renewable Energy* 1996; 8(1-5) : 305-308.
- Löhmann U, Sausen R, Bengtsson L, Cubasch U, Perlwitz J, Roeckner E. The Köppen climate classification as a diagnostic tool for general circulation models. *Max-Planck-Institut für Meteorologie*, 1993 ;Report No. 92 : 22pp.
- Loufti H, Khtira A. Stochastic analysis and generation of synthetic sequences of daily global solar irradiation : Rabat site (Morocco). *Renewable Energy* 1992; 2(2) : 129-138.
- Mainguet M, Callot Y. L'erg de Fachi-Bilma (Tchad-Niger). Contribution à la connaissance de la dynamique des ergs et des dunes des zones arides chaudes. Edition C.N.R.S. 1978.

-
- Mainguet M. Desertification, natural background and human mismanagement. Springer Verlag, 1990.
- Manabe S, Stouffer RJ. Climate variability of a coupled ocean-atmosphere-land surface model : implication for the detection of global warming (Walter Orr Roberts Lecture). Bull. Amer. Meteor. Soc. 1997; 78 : 1177-1185.
- Mefti A, Benmezai Y, Boudjelti O, Koussa M. Estimation des éclaircissements énergétiques direct, diffus et global reçus sur plan incliné. Application au site de Bouzaréah. Proceeding 5^{ème} Journée Internationale de thermique, Tunis 1991. pp 745-751.
- Mefti A, Youcef Ettoumi F, Bouroubi MY, Haddadi M, Adane A. Caractérisation des données d'insolation mensuelles en Algérie. 2^o Séminaire National du Génie Electrique, SNGE'99, Biskra, 22-24 Novembre 1999.
- Mendel JM. Tutorial on Higher-order-statistics (Spectra) in Signal Processing and System Theory : Theoretical Results and some Applications. In : Proceedings of the IEEE March 1991 ; 79(3) : 278-305.
- Messen N. Cadre dynamique des vents de sable et la dégradation du milieu naturel. Premier Colloque Climat-Environnement, Oran Nov. 1994.
- Monfort A, Gourieroux C. Séries temporelles et modèles dynamiques. Paris : Edition Economica, 1990.
- Morgan VT. Statistical distributions of wind parameters at Sydney, Australia. Renewable energy 1995; 6(1) : 39-48
- Morrison D. Multivariate statistical methods. New York : McGraw-Hill, 1976.
- Müller MJ. Selected climatic data for a global set of standard stations for vegetation science. Dr. W. Junk Publishers The Hague, Boston, London. 1982, 306 pp.
- Muneer J, Abodahab N, Weir G, Kubie J. Windows in buildings : Thermal, Acoustic, Visual and Solar. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2001; 5(2) : 201-202.
- Nassir SM, Raza SM, Raja IA. Distribution of wind power resources over Pakistan. Renewable Energy 1992 ; 411-420.
- Nacef L, Youcef Ettoumi F, Kadi M, Adane A, Sauvageot H. Application de modèles statistiques et ARPEGE-CLIMAT à la prévision pluviométrique. Climat et environnement. XIV Colloque international de la climatologie. Minerva S.L. Septembre 2001.
- Nfaoui H, Buret J, Sayigh AAM. Stochastic simulation of hourly average wind speed sequences in Tangers (Morocco). Solar Energy 1996;56 : 301-314.

- Nicholson SE, Sone B, Kone B An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Nino and the 1998 the Nina years. *Journal of Climate* 2000 ; 13 : 2628-2639.
- North GR, Bell V, Cahalan RF. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions. 1982.
- Olseth JA, Skartveit A. A probability density model for hourly total and beam irradiance on arbitrarily orientated planes. *Solar Energy* 1987; 39(4) : 343–51.
- Olseth JA, Skartveit A. The short-term variability of solar irradiance. In : *Proceedings of first World Renewable Energy Congress*. Oxford : Pergamon Press, 1990;V : 3102-3016.
- Pagney P. *Les Climats de la Nature*. Edition Masson, 1976.
- Pedelaborde P. *Introduction à l'Etude Scientifique du Climat*. Edition Revue, 1970.
- Perrin de Brichambaut. *Les Instruments de Mesures Météorologiques* 1977. Cahier d'information de la Météorologie Nationale N° 1 D.
- Philander SG. *El Niño, la Niña, and the Southern Oscillation*. United Statee, San Diego : Academic Press, 293p, 1990.
- Phillips WT. Harmonic analysis of climatic data. *Solar energy* 1984 ; 32(3) : 124-130.
- Phillips C. *Les tas de sable*. La Recherche N° 324 Octobre 1999.
- Pirrazoli PA. *Sea-Level Changes, The Last 20000Years*. Royaume Uni, Chichester : John Wiley & Sons, 210p, 1996.
- P.N.R 1997-2001 :Programme National de Recherche : Aménagement-Environnement, N°03/02/05/01/97
- Raaf O, Naili R, Haddad B, Adane A, Youcef Ettoumi F. Analyse des distributions statistiques des précipitations dans la région de Sétif par traitement d'images Radar. Journée d'Etude Nationale: Sécheresse et Changements climatiques en Algérie. Oran, 12 Novembre 2001.
- Ramdani T. mise en œuvre d'un convertisseur DC/AC pour système photovoltaïque de moyenne puissance. Thèse de Magister, U.S.T.H.B. Alger, 2000.
- Rao TS. The fitting of non stationary times-series models with time dependent parameters. *Journal Royal Statistit. Soc. Series B*. 1970;32(2) : 1371-1430.
- Ratto CF. Climatic data availability and modelling. *Solar and Wind Technol* 1989;6(4) : 433-440.
- Rehman S, Halawani TO. Statistical characteristics of wind in Saudi Arabia, *Renewable Energy* 1994; 4(8), 949-956.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

-
- Ross SM. Stochastic processes. J Wiley&Son, 1982.
- Saadaoui B. Modélisation des phénomènes de sable - Premier colloque Climat Environnement. Oran, Nov. 1994.
- Sahin AZ, Aksakal A. Wind power energy potential at the northeastern region of Saudi Arabia. Renewable energy 1998 ; 14(1-4) : 435-440.
- Sala M. Technology for modern architecture. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1998; 2(1-2) : 189-234.
- Saporta G. Théories et méthodes de la statistique. Paris : Technip, 1978.
- Sayigh AAM. The iso-radiation map for the Arab region. Solar and Wind Technol 1987;4 : 163-177.
- Sayigh AAM. Introduction. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1998 ; 2(1-2) : 1-2.
- Sayigh AAM, Marafia AH. Thermal comfort and the development of bioclimatic concept in building design. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1998 a; 2(1-2) : 3-24.
- Sayigh AAM, Marafia AH Vernacular and contemporary buildings in Qatar. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1998 b; 2(1-2) : 25-37.
- Schmetterer L. Introduction to Mathematical Statistics, Berlin : Springer-Verlag, 1974.
- Sen Z. Stochastic wind energy calculation formulation. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics 2000; 84(2): 227-234.
- Serra R. Daylighting. Renewable and Sustainable Energy Reviews 1998; 2(1-2) : 115-155.
- Sheridon D. Desertification of the United States. Council on Environmental Quality. 1981 ; 142p.
- Stern H, de Hoedt G, Ernst J. 1999. Objective classification of Australian climates. 8th Conf. on Aviation, Range and Aerospace Meteorology, Amer. Meteor. Soc., Dallas, Texas, 10-15 Jan.
- Stewart WJ. Introduction to the numerical analysis of Markov chains. Princeton, 1994.
- SURFER for Windows. User's Guide. Gildden Software Inc., Golden CO, USA, 1998.
- Tackle ES, Brown JM. Note on the use of Weibull statistics to characterise wind-speed data. Journal Appl. Meteor. 1977; 17 : 556-559.
- Tett SFB, Mitchell FB, Parker DE, Allen MR. Human influence on the atmospheric vertical temperature structure : Detection and observations. Science 1996 ; 274 : 1170-1173.
- Thornthwaite CW. The climates of North America according to a new classification. Geog. Rev. 1931 ; 21 : 633-655.
- Touati A. Les climats de la terre. INRP, Académie des Sciences : Septembre 2000.

- Toupet CH. Concepts et définitions. Sécheresse. 1990 ; 1 : 240-245.
- Trenberth KE, Hoar TJ. El Niño and Climate change. Geophys. Res. Lett. 1997 ; 24 : 3057-3060.
- Trewartha GT. An introduction to weather and climate. McGraw-Hill, 1943 ; 545 pp.
- Tsekos C, Anastasiou K. Persistence statistics of marine environmental parameters from Markov theory, part 2 :analysis in continuous time. Applied ocean research 1996. 18(5) : 243-255.
- UNCOD. Desertification : its causes and consequences. Secretariat of United Nations, Conference on desertification. Kenya, Nairobi : Pergamon Press, 1977.
- Viers G. .Eléments de Climatologie. Edition Nathan, 1968.
- Ward JH. Hierarchical grouping to optimize an objective functions. Journal Amer. Stat. Assoc. 1963 ; 58 : 236-244.
- Warren A, Agnew C. An assessment of desertification and land degradation in arid and semi-arid areas. International institute for environment and development. Drylands programme. London : University College. 1988 ; 72p.
- Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability. Journal Appl. Mech. 1951 ; 18 : 293-297.
- Willmott Cj, Vernon NT. Solar climates of the conterminous United States : A preliminary investigation. Solar Energy 1980;24 : 295-303.
- Wiser RH. The role of public policy in emerging green power markets : an analysis of marketer preferences. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2000; 4(2) : 177-212.
- WMO. Meteorological aspects of the utilization of solar radiations as an energy source. Tech. Note 172, WMO N° 557, 1981.
- WMO. Calculation of monthly and annual 30-year standard normals. World Climate Data Programme Report No. 10, World Meteorological Organisation, Geneva, Switzerland, 11pp, 1989.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Simulation of hourly sunshine duration from nebulosity. In : Proceeding World Renewable Energy Congress, WRECIII, Reading, GBR, 11-16 Sept 1994 a ; 5 : 2354-2356.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Etude de la non stationnarité de la corrélation de l'irradiation solaire globale. ISEC'94, In : Proceedings International System Electronic Conference, 1994 b.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

-
- Youcef Ettoumi F, Adane A, Hammouche R. Modelling and simulation of hourly wind Algeria. In : Proceeding of ISES Solar World Congress, Harare, Zimbabwe, 9-16 sept, 1995a.
- Youcef Ettoumi F, A. Adane A, Hammouche R. Application des lois de probabilités à la simulation de la vitesse du vent. 5^o Colloque Maghrébin sur les Modèles Numériques de l'Ingénieur (CMMNI), Rabat, Maroc, 21-23 Nov. 1995b.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Application des moments d'ordre supérieur à l'analyse temporelle de l'insolation. MCEA, Conférence Internationale, INPG, Grenoble 1996a.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Optimum classification of wind energy potential in Algeria. World Renewable Energy Congress, climate change, energy and the environment, Denver, Colorado, August, 1996b.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Modélisation de la vitesse du vent à l'aide des chaînes de Markov. Conférence Maghrébine en Génie Electrique, CMGE'99, 4-6 Décembre 1999.
- Youcef Ettoumi F. Estimation approchée des ressources en énergie solaire envisagée comme énergie de substitution. 2^{ème} Symposium du Comité de l'énergie, Rationalisation de l'utilisation de l'énergie : économie d'énergie et environnement Alger. 15-16 Novembre 2000 (SP8).
- Youcef Ettoumi F, Mefti A, Bouroubi MY, Adane A. Fourier analysis of monthly sunshine duration for Algeria. In : Proceedings of sixth World Renewable Energy Congress. Oxford : Elsevier Science Ltd, 2000 a;IV : 2543-2546.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Génération des données d'irradiation globale solaire quotidienne à Béchar. International Conference on Electronics, ICEL'2000, USTO, Oran, Algérie, 13-15 Novembre 2000 a.
- Youcef Ettoumi F, Adane A. Modélisation horaire de la direction du vent. Colloque sur l'héliothermie, l'environnement et la maîtrise des systèmes solaires, CHEMS'2000, Alger 13-15 Mai 2000 b.
- Youcef Ettoumi F, Messen N. Présentation des données météorologiques relatives à la température dans une région semi-aride. Congrès Scientifique sur l'approche de la recherche scientifique et des nouvelles technologies dans le développement et la mise en valeur des régions arides et semi-arides, El-Oued, Algérie, 4-6 Octobre 2000 a.
- Youcef Ettoumi F, Messen N. 'Les écarts thermiques observés dans une zone semi-aride : cas de la région de Djelfa'. Séminaire International. Espace Saharien et Développement durable. Biskra le 14-16 Novembre 2000 b.

Evaluation des Energies Renouvelables en Algérie

-
- Youcef Ettoumi F, Mefti A, Adane A, Bouroubi MY. Statistical analysis of solar measurements in Algeria using Beta distributions. *Renewable Energy* 2001; 26(1) : 47-67.
- Youcef Ettoumi F, Nacef L, Adane A, Sauvageot H. Génération du gisement solaire quotidien en Algérie. 3^{ième} Séminaire National en Génie Electrique, 29-31 Octobre 2001b.
- Youcef Ettoumi F, Messen N, Adane A, Sauvageot H. Temperature variations in a housing of the semi-arid region of Djelfa (Algeria). Juillet 2001c, (article sous presse revue *Building&Environment*, Elsevier Science).
- Youcef Ettoumi F, Sauvageot H, Adane A. Statistical bivariate modelling of wind at Oran (Algeria) using first-order Markov chain and Weibull distribution. *Solar Energy* (soumis). Elsevier Science 2001d.
- Youcef Ettoumi F, Adane A, Sauvageot H. Type de temps en Algérie. *Climat et environnement*. XIV Colloque international de la climatologie. Minerva S.L. Septembre 2001e.
- Youcef Ettoumi F, Adane A, Sauvageot H. Analyse de la température normale en Algérie. Journée d'Etude Nationale: Sécheresse et Changements climatiques en Algérie. Oran, 12 Novembre 2001f.
- Youcef Ettoumi F, Adane A, Naili R. Analysis of the Performance of Silicon PV Modules under Air Cooling Tests. World Renewable Energy Congress VII Cologne, Germany, 29 June-5 July, 2002 (accepted abstract).
- Zekai Zen. Stochastic wind energy calculation formulation. *Journal of wind Engineering and industrial aerodynamics* 2000 ; 84 : 227-234.