

N° d'ordre : 01/2006-D/EL

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
« HOUARI BOUMEDIENE »
FACULTE D'ELECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE



THESE

Présentée pour l'obtention du diplôme de DOCTORAT

EN : Electronique

Spécialité : Rayonnement Atmosphérique

Par

HARROUNI SAMIA

SUJET

**CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION FRACTALE DU
RAYONNEMENT SOLAIRE : APPLICATION AUX SYSTÈMES
PHOTOVOLTAIQUES**

Soutenue publiquement le 21/02/2006, devant le jury composé de :

A. ADANE	Professeur	U.S.T.H.B	Président
A. GUESSOUM	Professeur	U. BLIDA	Directeur de thèse
B. HADDAD	Maître de Conférences	U.S.T.H.B	Examineur
R. OUSSAID	Maître de Conférences	U.S.T.H.B	Examineur
A. KHELLAF	Directeur de recherche	C.D.E.R	Examineur
H. SALHI	Maître de Conférences	U. BLIDA	Examineur

A LA MÉMOIRE DU PROFESSEUR ABDELBAKI MAAFI

Ce travail de thèse a été proposé par le défunt Abdelbaki MAAFI, Professeur à la Faculté d'Electronique et Informatique de l'U.S.T.H.B. Il a été entamé sous sa direction en 2000/2001. Aussi, Je tiens à travers cette thèse lui rendre hommage et lui certifier ma gratitude envers tous les efforts et l'aide qu'il m'a procuré.

Grâce à ses conseils et son orientation dès le début de ce travail, ce dernier a pu être rapidement développé. Ainsi, je me suis permis de l'enrichir par d'autres idées qui certainement le Professeur MAAFI aurait apprécié et approuvé.

Aujourd'hui, notre travail a aboutit à des résultats très satisfaisants, les divers articles publiés dans des revues de hauts niveau en témoignent. Aussi, j'estime que mon devoir envers mon Professeur a été accompli en finalisant le dernier travail qu'il a proposé.

Reposes en paix cher Professeur, vos idées et travaux resteront pour toujours des références précieuses pour nos travaux et recherches futurs.

REMERCIEMENTS

Même si la liste des personnes qui m'ont apporté leur aide dans l'élaboration de cette thèse est longue, je tiens ici à remercier particulièrement quelques uns d'entre eux.

*D'abord et avant tout, je remercie très chaleureusement Monsieur **A. ADANE**, Professeur à la Faculté d'Electronique et Informatique de l'U.S.T.H.B, pour avoir bien voulu me faire l'honneur de présider le Jury de ma thèse.*

*Monsieur **A. GUESSOUM**, Professeur à l'Université de Blida a bien accepté la continuité de mon travail sous sa direction. Aussi, je tiens à lui exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance pour m'avoir aidé et conseillé tout le long des recherches effectuées dans le cadre de ce travail.*

*J'exprime mes plus sincères remerciements à Monsieur **A. KHELLAF**, Directeur de Recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (C.D.E.R), à Monsieur **H. SALHI**, Maître de Conférence à l'Université de Blida, à Monsieur **B. HADDAD** et Monsieur **R. OUSSAID**, Maîtres de Conférence à la Faculté d'Electronique et Informatique de l'U.S.T.H.B pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour l'honneur qu'ils me font en participant à ce Jury de thèse.*

*Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur **M. MAAFI**, frère du défunt Professeur **A. MAAFI**, pour s'être intéressé à mon travail et pour l'aide qu'il m'a toujours octroyé (documentation) tout au long de mes travaux de recherche.*

*Que Monsieur **N. SAVY**, chercheur à l'Institut de Recherche en Mathématiques de Rennes, Monsieur **M. KOLHE**, chercheur à l'Institut de recherche sur l'hydrogène de l'Université du Québec à trois rivières, trouvent ici*

le témoignage de ma profonde reconnaissance pour l'aide matérielle (documentation) et morale (discussions scientifiques) qu'ils m'ont procuré.

De même, je remercie vivement Monsieur **Paulo Gonçalves**, chercheur à l'Institut Supérieur Technique (IST) et l'Institut des Systèmes et Robotique (ISR) de Lisbonne pour les précieux programmes **MATLAB** qu'il m'a fourni.

Je n'oublie surtout pas de remercier toutes les personnes et tous les organismes qui m'ont permis de disposer des données utilisées dans cette thèse. Je cite particulièrement, la Société Nationale d'Electricité et Gaz (SONELGAZ), le MIDC (Measurement and Instrumentation Data Center), CPAU (City of Palo Alto utilities) de San Francisco en spécifiant Madame **Lindsay Joye** (Manager PV de CPAU), SRML (Solar Radiation Monitoring Laboratory) de l'université d'Oregon, EOS-WEBSTER Earth Science Information Partner (ESIP) ainsi que l'Université de New Hampshire.

J'exprime mes plus vifs remerciements à tous les membres de l'équipe « Instrumentation Solaire et Modélisation » du Laboratoire « Instrumentation » de la Faculté d'Electronique et Informatique de l'U.S.T.H.B dont je fais partie. Plus particulièrement, je spécifie notre chef d'équipe Monsieur **A. TALHA** pour son soutien, encouragement et l'aide morale et matérielle qu'il m'a apporté.

Enfin, je ne saurais oublier toutes les personnes, parents, amis et collègues qui m'ont aidé de près ou de loin pour bien mener ce travail de thèse qui sans eux n'aura jamais aboutit.

DÉDICACES

Ce travail est dédié à :

- *Mes très chers parents*
- *Ma tante Houria*
- *Mes sœurs Zahoua et Betitra*
- *Mes frères Hamou, Samir, Nabil et Lyes*
- *A toute ma famille*
- *A tous mes amis(es)*

TABLE DES MATIÈRES

<u>INTRODUCTION</u>	<u>1</u>
----------------------------	-----------------

<u>CHAPITRE 1 : ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE DES COURBES</u>	<u>5</u>
--	-----------------

I. INTRODUCTION -----	5
II. DIMENSION FRACTALE -----	6
III. APPROCHE THEORIQUE D'ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE -----	7
IV. APPROCHE EXPERIMENTALE D'ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE DES OBJETS NATURELS -----	8
IV.1. La dimension de boîte ou de Box-counting -----	9
IV.2. La dimension de Minkowski-Bouligand -----	10
IV.3. Discussion sur les méthodes de Box-counting et de Minkowski-Bouligand -----	11
IV.3.1. La valeur réelle de la dimension fractale D -----	11
IV.3.2. La résolution -----	12
IV.3.3. Effet des approximations théoriques -----	12
IV.3.4. Choix de l'intervalle $[\varepsilon_0, \varepsilon_{\max}]$ -----	12
V. MESURE DE LA DIMENSION FRACTALE DES SIGNAUX TEMPORELS -----	12
V.2. Méthode du recouvrement rectangulaire -----	14
V.2.2. Validation de la méthode -----	17
VI. CONCLUSION -----	19

<u>CHAPITRE 2 : CLASSIFICATION DES SIGNAUX D'ECLAIREMENTS SOLAIRES A L'AIDE DE L'ANALYSE FRACTALE</u>	<u>27</u>
--	------------------

I. INTRODUCTION -----	27
II. LE RAYONNEMENT SOLAIRE -----	27
III. CLASSIFICATION DES ECLAIREMENTS SOLAIRES EN DES TYPES DE TEMPS -----	29
III.1. Classification fractale des signaux d'éclairement solaire -----	30
III.2.1. Principe de la méthode -----	32
III.2.2. Banque de données -----	34
III.2.3. Traitement fractal des signaux d'éclairement solaire -----	37
III.2.4. Mise en œuvre de la classification -----	54
IV. CONCLUSION -----	62

CHAPITRE 3 : ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES SYSTÈMES PV À L'AIDE DE L'ANALYSE FRACTALE **64**

I. INTRODUCTION	64
II. ETUDE REDUITE DE LA PERFORMANCE DES SYSTEMES PV	65
II.1. Principe de la méthodologie	65
II.2. Description et fonctionnement des systèmes PV étudiés	66
II.2.1. Systèmes PV installés à Tahifet et Imehrou	66
II.2.2. Système PV installé à Palo Alto	74
II.3. Mise en œuvre de la méthodologie	79
III. ANALYSE DES RESULTATS ET DISCUSSION	87

CHAPITRE 4 : IDENTIFICATION DE LA PERSISTANCE A LONG TERME DANS LES SÉRIES DU RAYONNEMENT SOLAIRE À L'AIDE DE LA DIMENSION FRACTALE **92**

I. INTRODUCTION	92
II. TECHNIQUES DE MESURE DE LA PERSISTANCE A LONG TERME DANS LES SÉRIES TEMPORELLES	93
II.1. Fonction d'auto-corrélation et semivariogramme	93
II.2. L'analyse spectrale	94
II.3. L'analyse des ondelettes	95
II.3. L'analyse des étendues normalisées (Rescaled Range Analysis)	96
II.4. L'analyse des fluctuations redressées (Detrended Fluctuation Analysis)	98
III. ETUDE DE LA PERSISTANCE DES IRRADIATIONS SOLAIRES a L'AIDE DE LA DIMENSION FRACTALE	99
III.1. Principe	99
III.2. Données expérimentales	100
III.3. Résultats et discussion	104
IV. CONCLUSION	109

CONCLUSION **110**

ANNEXES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

BIBLIOGRAPHIE

NOMENCLATURE

α	Exposant de l'analyse de la DFA
β	Exposant de l'analyse spectrale
θ	Inclinaison du capteur (°C)
δ	Déclinaison solaire (°)
$\Delta\tau$	Largeur des rectangles utilisés pour le recouvrement du signal
$\Delta\tau_{max}$	Largeur maximale des rectangles utilisés pour le recouvrement du signal
$\sigma(\hat{D})$	Ecart type de la dimension fractale
$\sigma(K_T)$	Ecart type de l'indice de clarté
$\eta(j)$	Rendement de conversion du générateur PV correspondant à la journée j
$\lambda(S)$	Facteur de similitude
ω_s	Angle horaire au coucher du soleil sur plan horizontal (°C)
ω_{st}	Angle horaire au coucher du soleil sur plan incliné (°C)
D_B	Dimension de boîte
D_H	Dimension de Hausdorff
D_M	Dimension de Minkowski–Bouligand
D	Dimension fractale théorique
$\hat{D}$	Dimension fractale estimée
$\hat{D}_1$	Seuil 1 de la dimension fractale
$\hat{D}_2$	Seuil 2 de la dimension fractale
$\hat{D}_{1m}$	Dimension fractale estimée en utilisant les données d'1 minute
$\hat{D}_{10m}$	Dimension fractale estimée en utilisant les données de 10 minutes
$\hat{D}_{min}$	Dimension fractale estimée minimale
$\hat{D}_{max}$	Dimension fractale estimée maximale
$\langle \hat{D} \rangle$	Moyenne de la dimension fractale
$\langle K_T \rangle$	Moyenne de l'indice de clarté

$(K_T)_I$	Seuil de l'indice de clarté
B_H	Fonction du mouvement Brownien fractionnaire MBF
$Dec(j)$	Déclinaison solaire (°C)
Ec	Energie journalière consommée par la charge
Ecl	Eclairement solaire global (W/m²)
Eg	Energie journalière générée par le champ PV
E_{quad}	Erreur quadratique
Er	Eclairement solaire de référence (1kW/m²)
$E_{utilisée, PV, jour}$	Energie journalière générée par le champ PV directement utilisée par la charge ou injectée dans le réseau
$F(x)$	Fonction de distribution cumulative FDC
$F_l(n)$	Grandeur caractéristique des fluctuations d'une fenêtre de longueur n dans l'analyse de la DFA
Freq.	Fréquence d'apparition
H	Irradiation globale journalière
Ha	Exposant de Hausdorff
H_{cs}	Constante solaire (1367 W/m²)
H_d	Composante directe du rayonnement solaire
H_{d0}	Irradiation globale directe reçue sur une surface horizontale
H_o	Irradiation globale journalière hors atmosphère
H_w	Exposant de l'analyse des ondelettes
I_g	Courant généré (A)
I_u	Courant utilisé (A)
K_d	Valeur corrigée de la constante solaire
K_T	Indice de clarté
ϕ	Latitude du lieu (°C)
L_c	Pertes de captation
L_s	Pertes du système
N	Taille du signal recouvert
P_0	Puissance du champ PV (kWc)
P_c	Puissance consommée par la charge (W)
P_g	Puissance générée par le champ PV (W)
P_{gridin}	Puissance extraite du réseau (W)

$P_{gridout}$	Puissance injectée dans le réseau (W)
PR	Taux de performance
P_{ve}	Puissance consommée par le véhicule électrique (W)
r	Fonction d'auto-corrélation
R	Etendue de la série temporelle dans l'analyse R/S
$S(\Delta\tau)$	Surface du signal recouvert par des rectangles de largeur $\Delta\tau$
S_m	Fonction de la densité de puissance spectrale
S_{PV}	surface totale du champ PV (m ²)
S_t	Ecart type de la série temporelle dans l'analyse R/S
T_a	Température ambiante (°C)
T_c	Température du caisson de batterie (°C)
T_{cel}	Température cellule (°C)
V_b	Tension de la batterie (V)
V_c	Tension du champ PV (V)
V_W	variance de W
W	Transformée des ondelettes
W_H	Fonction de Weierstrass FW
W_s	Vitesse du vent (m/s)
Y_A	Indice de performance du champ PV (kWh/(j · kWc))
Y_f	Indice de performance final (kWh/(j · kWc))
y_k	Semivariogramme
Y_m	Transformée de Fourier discrète
Y_r	Indice de performance de référence (kWh/(j · kWc))

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le rayonnement solaire, source d'une énergie inépuisable et abondante a depuis le siècle passé suscité l'intérêt des chercheurs en vue de son exploitation industrielle. Or, l'utilisation optimale du rayonnement solaire nécessite une bonne connaissance de ses caractéristiques physiques. Son caractère intermittent a cependant incité à la recherche de modèles adéquats capables de décrire avec précision ses propriétés.

Ainsi, les approches Markoviennes [1-5] et les modèles autorégressifs [6,7] par exemple ont largement contribué à la modélisation du rayonnement solaire. Actuellement, des modèles plus récents sont appliqués à la modélisation du caractère aléatoire du rayonnement solaire tel que les réseaux de neurones [8-12].

Ce travail de thèse explore les possibilités d'application d'un nouveau type de modèles au rayonnement solaire : le modèle fractal. En plus du caractère inédit de cette nouvelle approche, notre travail vise à évaluer l'apport de ce formalisme dans la description du caractère fluctuant du rayonnement solaire dans le but d'optimisation des systèmes énergétiques notamment photovoltaïques.

Dans la littérature, très peu de travaux consacrés à l'application des fractales au rayonnement solaire ont été publiés [13-15]. C'est alors que nous nous sommes intéressées à ce genre d'approche afin de compléter ces travaux antérieurs et contribuer à la modélisation fractale du rayonnement solaire.

Pour comprendre l'origine des propriétés fractales du rayonnement solaire, il faudrait rappeler que l'analyse fractale développée par le mathématicien *Benoît Mandelbrot* traduit essentiellement les propriétés d'invariance d'une variable donnée. C'est ainsi qu'est apparue la notion d'auto-similarité. Cette dernière renvoie au fait que l'objet fractal peut être décomposé en sous-unités, puis en sous-sous unités, qui possèdent les mêmes propriétés statistiques que l'objet global. Quelle que soit l'échelle d'observation, on observe donc des caractéristiques identiques. Ce concept de structure fractale peut être étendu aux séries temporelles. L'auto-similarité signifie alors qu'en moyenne, les fluctuations sur une échelle de temps sont similaires aux fluctuations sur d'autres échelles de temps, ceci est désigné par auto-affinité au lieu d'auto-similarité.

Le premier objectif de notre travail de thèse est donc de détecter le caractère fractal ou auto-affin des séries du rayonnement solaire. Ceci permettra par la suite d'exploiter une caractéristique importante des objets fractals qui est leur dimension fractale. Sur la base de cette dernière, deux objectifs ont été fixés dans notre travail :

La mise au point d'une méthode permettant l'identification des états météorologiques ou des types de temps. Cette identification est d'une utilité pratique dans l'étude de performance des systèmes photovoltaïques.

La modélisation à l'aide de l'analyse fractale de la dépendance temporelle à long terme des données du rayonnement solaire. Ceci permet la simulation de ce rayonnement dont l'une des applications envisagées est le dimensionnement et l'optimisation du stockage électrique des systèmes photovoltaïques.

Le premier objectif est dicté par la définition de la dimension fractale. En effet, pour les séries temporelles (courbes fractales) la dimension fractale représente le degré d'irrégularité de la courbe, elle a une valeur entre 1 et 2, ce qui correspond à la dimension euclidienne d'une ligne et celle d'un plan respectivement. Ainsi, pour les courbes du rayonnement solaire cette dimension permet de quantifier leurs fluctuations, le signal le plus fluctuant est celui dont la dimension fractale se rapproche le plus de 2.

La dimension fractale permet donc d'établir une classification des signaux du rayonnement solaire en des types de temps. Ces derniers permettront alors la réduction d'une longue série de données en des classes de journées typiques. Ceci est d'un grand intérêt dans la réduction du coût d'analyse de la performance des systèmes photovoltaïques.

Le deuxième objectif vise à mettre en évidence le phénomène de mémoire longue dans les séries du rayonnement solaire. En effet, *Mandelbrot* caractérisa les processus fractals par une « mémoire longue » ou ce qui est appelé « la dépendance à long terme ». La mémoire longue encore désignée par « persistance à long terme » décrit la corrélation des séries temporelles à des échelles longues. C'est-à-dire la dépendance à long terme entre les événements actuels et les événements futurs.

La mise en évidence de ce phénomène dans les séries du rayonnement solaire permet sa simulation. Ceci est d'un grand apport aussi bien dans le domaine météorologique puisque le rayonnement solaire permet de déterminer les types de temps que dans le domaine énergétique étant donné que c'est la source qui alimente les systèmes photovoltaïques.

Cette thèse regroupe 4 chapitres :

Dans le premier chapitre, nous nous intéresserons à la dimension fractale qui sera la base de la suite de ce travail. Après des généralités sur la notion de dimension, nous présenterons les méthodes d'estimation de la dimension fractale. Puis, dans le but d'améliorer la complexité et la précision de l'estimation de la dimension fractale des signaux temporels discrets, nous proposerons une nouvelle méthode simple basée sur un recouvrement multi-échelle utilisant le rectangle comme élément géométrique de recouvrement. Ensuite, et afin de valider la méthode, elle sera appliquée à des signaux fractals dont la dimension fractale est connue. Les résultats seront présentés et discutés à la fin du chapitre.

Le chapitre 2 traite un des objectifs de ce travail : la classification des signaux du rayonnement solaire en des types de temps à l'aide de l'analyse fractale. Après un aperçu sur les notions de base du rayonnement solaire, nous traiterons le problème de la classification des signaux d'éclairement solaire en des types de temps. Aussi, nous présenterons une méthode de classification des éclaircissements solaires que nous avons élaboré. Cette dernière est basée sur la dimension fractale et l'indice de clarté. La méthode sera appliquée à 5 sites différents. Nous terminerons ce chapitre par une discussion et une analyse des résultats obtenus.

Une des diverses applications de la classification établie au chapitre 2 est son application dans l'étude de la performance des systèmes photovoltaïques. Aussi, le chapitre 3 portera sur la présentation d'une méthode d'évaluation de la performance des systèmes PV. Cette méthode vise la simplification de l'étude de la performance des systèmes PV en utilisant un nombre restreint de données grâce à la classification établie au chapitre 2. La méthode sera appliquée à deux systèmes PV autonomes et un système relié au réseau. Afin d'apprécier la performance de ces systèmes et valider la méthode proposée, le rendement du générateur et les indices de performance seront utilisés.

Au chapitre 4, la question de la persistance à long terme du rayonnement solaire donc le deuxième objectif de cette thèse sera traitée, montrant l'existence d'une dépendance temporelle à long terme dans les séries de ce paramètre. Dans une première partie, nous présenterons les différentes techniques de quantification de la persistance à long terme des séries temporelles déjà existantes. Ensuite, nous proposerons une nouvelle approche de mesure de la persistance à long terme, il s'agit de la dimension fractale. Aussi, nous utiliserons la méthode d'estimation de la dimension fractale que nous avons élaborée au chapitre 1 pour l'étude de la persistance des irradiances solaires. A la fin, nous exposerons et discuterons les résultats obtenus.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale donnant une analyse globale des résultats obtenus dans les quatre chapitres.

Des informations complémentaires relatives aux différentes méthodes présentées dans notre thèse ont été données en annexe.

CHAPITRE 1

CHAPITRE 1

ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE DES COURBES

I. Introduction

Le terme fractal du latin *fractus* qui signifie “brisé” est utilisé pour désigner toute forme géométrique fragmentée ou non régulière. Ce fut le mérite de Benoît Mandelbrot mathématicien français de découvrir le concept de fractale dans les années 70 et d’en faire une nouvelle discipline mathématique baptisée par « la géométrie fractale ».

L’analyse fractale a connu par la suite une expansion et un développement rapide dans un très grand nombre de champs. Un nombre énorme de publications sous forme de livres [16-55] et d’articles [56-67] sont alors apparues.

Les fractals étant des objets présentant des irrégularités géométriques, leur description et leur modélisation s’effectue à l’aide d’un indice puissant de mesure de ces irrégularités appelé “dimension fractale”.

Ce chapitre est consacré à cet outil mathématique ayant de vastes et importantes applications pratiques. Après des généralités sur la notion de dimension, nous présenterons les méthodes d’estimation de la dimension fractale. Pour cela, nous allons d’abord s’intéresser à l’approche théorique d’estimation de cet indice utilisée pour les objets euclidiens ou les objets fractals auto-similaires¹, ensuite à l’approche expérimentale utilisée dans le cas des objets fractals naturels qui ne sont pas auto-similaires.

Par la suite, nous nous intéresserons à l’estimation de la dimension fractale des signaux temporels qui traduit le degré de fluctuation du signal. Ceci permet alors de comparer l’irrégularité de deux courbes de signaux, ce qui présente un grand intérêt dans des applications diverses.

Aussi, à la fin du chapitre nous présenterons une méthode d’estimation de la dimension fractale des signaux temporels discrets que nous avons élaboré avec une technique d’optimisation.

II. Dimension fractale

¹ Les notions d’auto-similarité et d’auto-affinité sont définies dans l’annexe 1

Mathématiquement, chaque espace métrique lui est associé un nombre caractéristique appelé "dimension", la plus fréquemment utilisée est celle désignée par "dimension topologique" ou "euclidienne". Les figures géométriques simples ont des dimensions euclidiennes entières. Ainsi, le point est de dimension euclidienne 0, une ligne droite est de dimension 1, une surface de dimension 2 et un volume de dimension 3.

Mais qu'en est-il pour les objets fractals, c'est un peu plus compliqué. Revenons à notre ensemble de Cantor, c'est un objet qui est un peu plus qu'un ensemble de points, mais qui n'est pas non plus vraiment une droite, un objet qui n'est ni de dimension 0, ni de dimension 1, mais de dimension intermédiaire exprimée sous forme d'une fraction.

De même, le contour d'une côte rocheuse est une ligne extrêmement irrégulière de telle façon qu'elle semblerait avoir une surface, ce ne serait donc plus vraiment une ligne à une dimension, ni tout à fait une surface à 2 dimensions mais, un objet dont la dimension est située entre 1 et 2. De la même façon, nous pouvons rencontrer des fractales dont la dimension se situe entre 2 et 3 (surface qui tend à remplir un volume), etc.

Les fractales ont donc des dimensions qui ne sont pas des nombres entiers mais fractionnels, appelées "dimensions fractales".

Ce qui caractérise les objets de la géométrie classique dont les dimensions sont entières c'est que toute courbe engendrée par les contours de ces éléments a une longueur finie. En effet, si on doit mesurer une ligne droite de 1m de longueur avec une règle de 20cm, le nombre de fois qu'on peut appliquer la règle sur la ligne est le nombre entier 5. Si on utilise une règle de 10cm, le nombre de fois d'application de la règle sera 10 fois, pour une règle de 5cm, le nombre sera 20 fois et ainsi de suite. Si on multiplie la longueur de la règle de mesure utilisée par le nombre de son utilisation on retrouvera la valeur 1m quelque soit la règle utilisée.

Ce résultat s'il est vrai pour les objets de la géométrie classique, il ne l'est pas pour les objets fractals. En effet, utilisons le même raisonnement pour mesurer une courbe fractale, avec une règle de 20cm, la longueur mesurée sera sous-estimée, avec une règle de 10cm, le résultat sera plus exact. Plus on utilise une règle courte plus la mesure sera précise. La longueur d'une courbe fractale dépend donc de la règle avec laquelle on fait la mesure : plus elle est petite, plus la longueur trouvée est grande.

C'est à cette conclusion qu'est arrivé *Mandelbrot* lorsqu'il essaya de mesurer la longueur de la côte de la Bretagne. Il a trouvé que la longueur mesurée dépend du niveau de détail pris en compte. En effet, la côte peut être parcourue par voiture, ou à pied pour en suivre mieux les détours, ou au pas d'une fourmis afin de contourner tous ses grains de sable. A chaque fois on obtiendra une longueur plus grande, en fonction inverse du pas utilisé pour le parcours.

A la question “qu’elle est la longueur de la côte de la Bretagne ?”, *Mandelbrot* répondait : “elle est de longueur infinie” puisque la longueur de la côte grandit au fur et à mesure que le pas de parcours diminue.

Cet agrandissement se fait selon une loi en puissance dont la forme a été trouvée empiriquement par *Richardson* :

$$L(\eta) \propto \eta^{-\alpha} \quad (\text{I.1})$$

Où L est la longueur de la côte, η est la longueur du pas utilisé, l’exposant α représente la dimension fractale de la côte.

III. APPROCHE théorique D’Estimation de la dimension fractale

La dimension fractale étant une mesure de la façon dont la fractale occupe l’espace, la déterminer c’est établir le rapport entre cette façon d’occupation d’espace et sa variation d’échelle.

Soit N le nombre de fois que l’on reporte l’étalon de longueur n sur un objet de longueur L et D la dimension fractale de l’objet, on a :

$$N = \left(\frac{L}{n} \right)^D \quad (\text{I.2})$$

D’où :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} \quad (\text{I.3})$$

Pour les objets fractals auto-similaires dit aussi à homothétie interne (semblables à eux même quelque soit le facteur d’agrandissement), L/n représente le facteur d’agrandissement et n/L le rapport d’homothétie (facteur de réduction), n correspond pour ces objets aux nombre d’objets similaires à l’original qui sont contenus dans l’objet de départ.

Cette dimension est souvent présentée comme la dimension de Hausdorff–Besicovitch. Ceci est vrai dans le cas des lignes et surfaces usuelles où les dimensions d’homothétie (fractale) et de Hausdorff–Besicovitch sont égales. Mais dans le cas général des objets fractals, la dimension de Hausdorff–Besicovitch a une expression plus compliquée.

Soit X un ensemble dénombrable des séquences de sous ensembles $\{X_i, i=1, 2, 3, \dots\}$ tel que $X \subseteq \bigcup_{i=1}^{\infty} X_i$ et $0 < \text{diam}(X_i) \leq \varepsilon$ pour tout i , où $\text{diam}(X_i)$ représente la plus grande distance entre deux points quelconque de X_i .

Pour chaque $p \in [0, \infty]$ la mesure de Hausdorff p -dimensionnelle de X est définie par :

$$H_p(X) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left(\inf_{H(\varepsilon)} \left\{ \sum_i [diam(X_i)]^p \right\} \right) \quad (I.4)$$

Il existe un nombre réel unique $D_H \geq 0$ tel que $H_p(x) = 0$ pour $P > D_H$ alors que $H_p(x) \rightarrow \infty$ pour $p < D_H$. Ce nombre spécifique D_H est la dimension de Hausdorff de X appelée aussi dimension de Hausdorff–Besicovitch [19,68].

Nous constatons à travers cette définition complexe que la dimension de Hausdorff–Besicovitch est très abstraite. Bien qu'elle soit la plus étudiée mathématiquement, et de façon générale la mieux connue à cause du fait qu'elle soit applicable à tout élément, elle est souvent trop difficile à calculer.

Pour les objets de la géométrie classique la dimension de Hausdorff–Besicovitch est égale à sa dimension topologique ce qui n'est pas le cas pour les objets fractals. Ceci a permis à *Mandelbrot* d'énoncer ce qui suit :

Un objet est fractal si sa dimension d'Hausdorff–Besicovitch est strictement supérieure à sa dimension topologique.

Pour mieux comprendre ceci et pour se fixer les idées, nous avons calculé la dimension fractale de quelques objets euclidiens et fractals et qui sont données dans l'annexe 2.

IV. APPROCHE expérimentale D'Estimation de la dimension fractale des objets naturels

Lorsqu'on essaye de déterminer la dimension fractale des objets naturels, on est souvent confronté au fait que l'application directe de l'équation (I.2) s'avère inefficace [69].

En effet, comme nous l'avons déjà mentionné, la plupart des objets fractals naturels qui existent dans notre monde réel ne sont pas auto-similaires mais plutôt auto-affins. Le facteur d'agrandissement et le rapport d'homothétie sont donc difficiles à obtenir puisqu'il n'y a pas une auto-similarité exacte. D'autres méthodes sont alors nécessaires pour estimer les dimensions fractales de ces objets.

En pratique, pour mesurer la dimension fractale, beaucoup de méthodes existent, les unes sont générales, d'autres sont applicables uniquement à certains types de fractales ou pour des cas spécifiques. La diversité de ces méthodes reflète la différence dans les objectifs et dans le type des données analysées.

Dans ce paragraphe, nous allons rappeler les méthodes les plus utilisées, il s'agit de la dimension de boîte (Box-counting dimension) et de la dimension de Minkowski–Bouligand

qui sont basées sur les grands travaux de Mandelbrot [70] et de Bouligand [71] et dont dérivent beaucoup d'autres algorithmes.

IV.1. La dimension de boîte ou de Box-counting

Cette méthode est basée sur le recouvrement de l'espace dans lequel est inclut l'objet dont on veut calculer la dimension fractale par une grille constituée de carrés (ou de "boîtes") de côté ε . Le nombre $N(\varepsilon)$ des carrés qui ont une intersection avec l'objet fractal est ensuite compté. La dimension de boîte est alors définie par :

$$D_B = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln[N(\varepsilon)]}{\ln(1/\varepsilon)} \quad (I.5)$$

En traçant pour différentes valeurs de ε , $\ln(N(\varepsilon))$ en fonction de $\ln(1/\varepsilon)$, on obtient un nombre de points $\{\ln(N(\varepsilon)), \ln(1/\varepsilon)\}$. La pente de la droite passant à travers ces points donne l'estimation de la dimension de boîte D_B .

La figure (I-1) donne un exemple qui illustre la méthode de dimension de boîte.

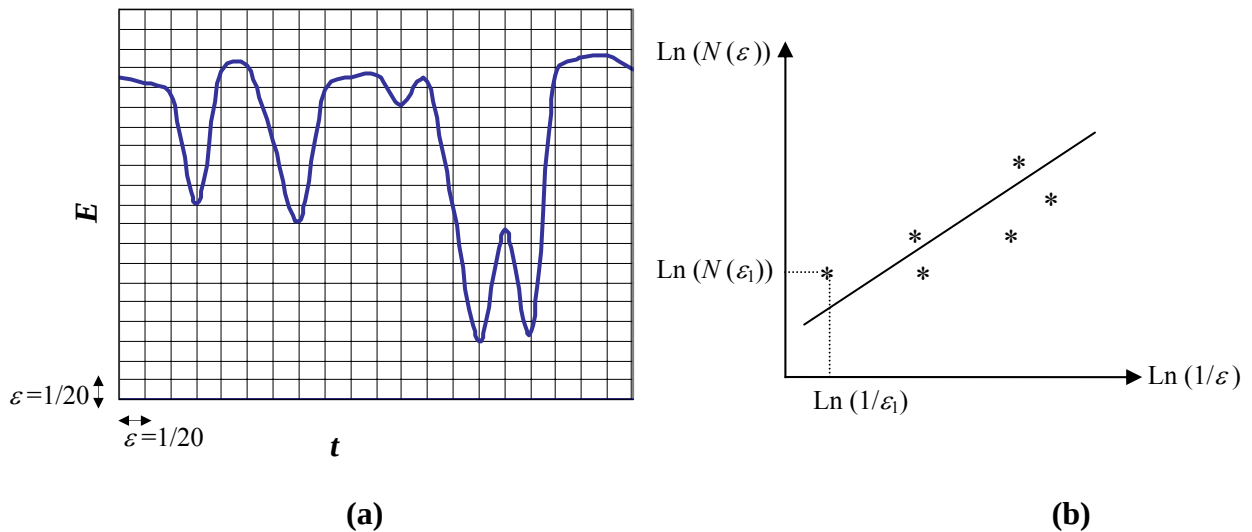


Figure I-1. Exemple illustrant la méthode de Box-counting
a) Recouvrement de la courbe par une grille de boîtes
b) Tracé de la droite log-log

L'objet E (une courbe) est couvert par une grille de carrés dont le côté $\varepsilon = 1/20$, le nombre total de carrés contenus dans la grille est $20^2 = 400$ et le nombre de carrés (boîtes) qui coupent la courbe E est 84 (Figure (I-1-a)).

Dans la figure (I-1-b), la pente de la droite ajustée par une régression linéaire constitue la dimension fractale de la courbe E .

IV.2. La dimension de Minkowski–Bouligand

Cette méthode est basée sur l'idée de Minkowski de dilater l'objet dont on veut calculer la dimension fractale par des disques de rayon ε et centrés sur E . L'union de ces disques forme alors le "recouvrement de Minkowski".

Soit $S(\varepsilon)$ l'aire de l'objet dilaté ou recouvert et D_M la dimension de Minkowski–Bouligand. Bouligand définit la dimension D_M comme suit :

$$D_M = 2 - \lambda(S) \quad (\text{I.6})$$

$\lambda(S)$ est appelé facteur de similitude et il représente l'ordre infinitésimal de la surface $S(\varepsilon)$. Il est défini par :

$$\lambda(S) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln[S(\varepsilon)]}{\ln(\varepsilon)} \quad (\text{I.7})$$

$\ln$ est le logarithme népérien.

En remplaçant $\lambda(S)$ par sa valeur dans la relation (I.6) on obtient :

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \left[2 - \frac{\ln[S(\varepsilon)]}{\ln(\varepsilon)} \right] \quad (\text{I.8})$$

Les propriétés du logarithme permettent de mettre la relation (I.8) sous la forme suivante :

$$D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln \left[\frac{S(\varepsilon)}{\varepsilon^2} \right]}{\ln \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)} \quad (\text{I.9})$$

On obtient la relation linéaire suivante :

$$\ln \left(\frac{S(\varepsilon)}{\varepsilon^2} \right) = D \ln \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) + \text{constante} \quad (\text{I.10})$$

avec $\varepsilon \rightarrow 0$

La dimension fractale représente alors la pente de la droite $\ln \left(\frac{S(\varepsilon)}{\varepsilon^2} \right) = f \left(\ln \left(\frac{1}{\varepsilon} \right) \right)$ ajustée par la méthode des moindres carrés.

La figure (I-2-a) représente le recouvrement de Minkowski $E(\varepsilon)$ composé de l'union de disques de rayon ε .

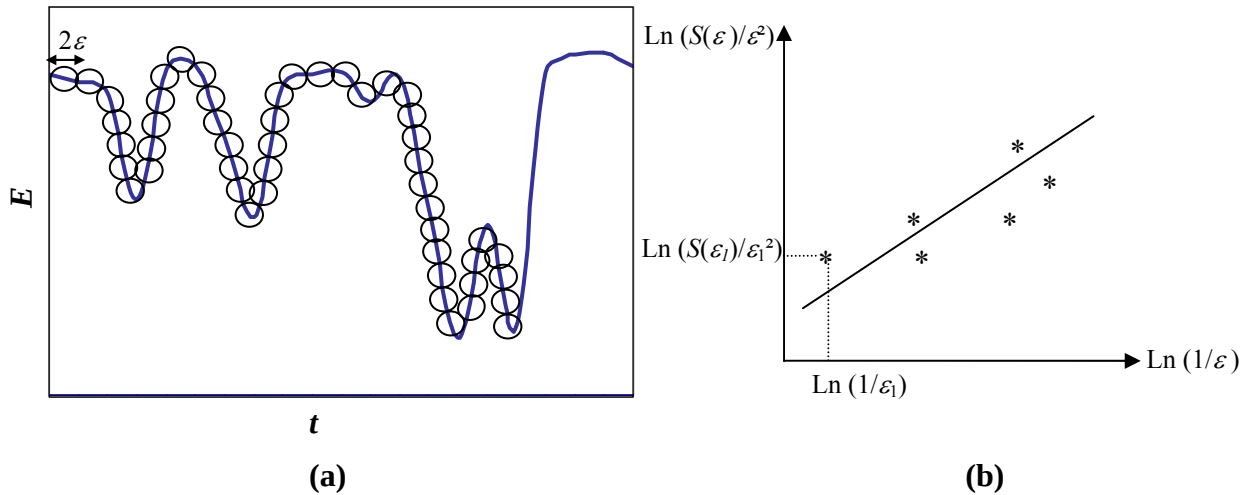


Figure I-2. Exemple illustrant la méthode de Minkowski–Bouligand

a) Le recouvrement de Minkowski

b) Tracé de la droite log–log

IV.3. Discussion sur les méthodes de Box–counting et de Minkowski–Bouligand

Selon l'analyse de Dubuc *et al.* [72], la dimension de boîte et la dimension de Minkowski–Bouligand sont mathématiquement équivalentes en limite donc $D_B = D_M$. Cependant, elles sont tout à fait différentes en pratique à cause de la différence dans la manière d'approcher leurs limites.

Les résultats expérimentaux publiés dans la littérature [72-74] ont montré que ces deux méthodes souffrent de l'imprécision et de l'incertitude. En effet, la précision d'estimation de la dimension fractale de ces deux estimateurs dépendent des facteurs suivant [74]:

IV.3.1. La valeur réelle de la dimension fractale D

Avec les valeurs élevées de D , l'erreur d'estimation de la dimension fractale est élevée. Ceci peut être expliqué par l'effet de résolution [75]. Lorsque la valeur de D augmente, son estimation ne peut pas refléter l'irrégularité de l'objet et une haute résolution est alors nécessaire.

IV.3.2. La résolution

Dans le cas des courbes temporelles, la résolution consiste en le pas d'observation de la courbe (minute, heure, journée...). Selon Tricot *et al* [76] la dimension fractale estimée diminue avec le pas d'observation. Ceci est dû au fait qu'une courbe tend à devenir un segment de ligne horizontale et apparaît plus régulière. Inversement, la dimension fractale

estimée tend à augmenter avec l'augmentation du pas d'observation car une courbe tend à devenir une série de segments de lignes verticaux et apparaît alors plus irrégulière.

IV.3.3. Effet des approximations théoriques

La mauvaise précision des méthodes de dimension de boîte et de Minkowski–Bouligand est aussi reliée à des contraintes imposées par des approximations théoriques de ces estimateurs. Par exemple, la dimension de boîte cause des discontinuités (Jumps) dans le tracé log-log [72] ce qui engendre la dispersion des points du tracé log-log par rapport à la ligne droite obtenue par la régression linéaire. En plus, la valeur de $N(\varepsilon)$ doit être entière dans cette méthode. L'imprécision de la méthode de Minkowski–Bouligand est due au fait que le recouvrement de Minkowski est trop épais. Dans ce cas le tracé log-log présente des courbures au lieu d'être une ligne droite [72].

IV.3.4. Choix de l'intervalle $[\varepsilon_0, \varepsilon_{max}]$

La valeur ε_{max} et en général l'intervalle $[\varepsilon_0, \varepsilon_{max}]$ à travers lequel est ajustée la droite du tracé log-log est un paramètre très important. En effet, la précision des estimateurs est beaucoup influencée par le choix de cet intervalle. Lorsque ε_0 est trop grand, la courbe est recouverte par peu d'éléments (boîtes ou boules). Inversement, lorsque la valeur ε_0 est trop petite, le nombre d'éléments qui couvrent la courbe est trop grand et chaque élément couvre peu de points ou de pixels. Les résultats publiés dans la littérature montrent que cet intervalle dépend de plusieurs paramètres : la valeur de D , la taille de la courbe (signal) et le type du signal fractal.

Quelques chercheurs ont essayé de choisir cet intervalle "optimal" afin de minimiser l'erreur d'estimation [72,75]. Par exemple, Liebovitch et al [77] ont proposé une méthode d'obtention de cet intervalle, Maragos et al ont établi une règle empirique pour déterminer ε_{max} dans le cas des signaux temporels [73]. En pratique, ces intervalles optimaux améliorent considérablement la précision de l'estimation pour certains cas mais pas dans tous les cas.

V. Mesure de la dimension fractale des signaux temporels

Beaucoup de processus naturels décrits par des séries temporelles (bruits, données économiques ou démographiques, signaux électriques...etc.) sont aussi des fractals dans le sens où leur graphes sont des ensembles fractals [73]. Ainsi, la modélisation des signaux fractals est d'un grand apport dans le traitement de signal.

Rappelons que la caractéristique la plus importante des fractales est leur dimension fractale. Cette dernière qui contient l'information sur leur structure géométrique est considérée comme un indice puissant de mesure de leur irrégularité.

Pour une courbe, la dimension fractale est située entre 1 et 2, elle se rapproche de 2 si elle est extrêmement irrégulière et tend vers 1 si elle l'est beaucoup moins. La dimension fractale peut alors être utilisée pour comparer la complexité géométrique de deux courbes.

Vu l'importance de cet indice et l'impact de son utilisation en pratique, la précision de son estimation est nécessaire. Les méthodes de Box-counting et de Minkowski-Bouligand s'avèrent alors inefficace dû au fait qu'elles souffrent de l'imprécision comme nous l'avons déjà mentionné. Inspiré de la méthode de Minkowski-Bouligand, une classe d'approches de mesure de la dimension fractale des signaux temporels appelée « les méthodes de recouvrement » est alors proposée par plusieurs chercheurs.

Ces méthodes consistent à créer des recouvrements à différentes échelles autour du graphe du signal. En effet, chaque recouvrement est constitué de l'union d'éléments géométriques spécifiés. Dans la méthode de Box-counting, l'élément géométrique utilisé est le carré ou boîte, celle de Minkowski-Bouligand utilise le disque.

Dubuc *et al.* [72,76] ont proposé une nouvelle méthode appelée "Variation method". Celle-ci critique les méthodes standards d'estimation de la dimension fractale à savoir : Box-counting et Minkowski-Bouligand. En effet, "Variation method" appliquée à différentes courbes fractales a montré une grande précision et robustesse.

Maragos et Sun [73] ont généralisé la méthode de Minkowski-Bouligand en proposant la méthode de recouvrement morphologique "Morphological covering method" qui utilise un recouvrement basé sur des éléments géométriques variables. Ainsi, cette méthode unifie et améliore les caractéristiques de beaucoup d'autres méthodes de recouvrement. Expérimentalement, "Morphological covering method" a présenté une bonne performance, puisque l'erreur d'estimation en moyenne (moyennée à travers plusieurs signaux de différentes tailles) a été de 2%-4% ou moins pour les signaux fractals discrets dont la dimension fractale est connue théoriquement [73]. Pour les signaux fractals déterministes (ces signaux seront détaillés plus loin dans ce chapitre) Maragos et Sun ont développé une méthode d'optimisation qui a montré une excellente performance puisque l'erreur d'estimation de la dimension fractale a été trouvée entre 0% et 0.07%.

Zeng *et al.* [74] ont proposé une nouvelle méthode d'estimation de la dimension fractale des courbes. Leur méthode est une procédure de correction basée sur la méthode de Box-counting. Cette procédure utilise la logique floue pour réduire les erreurs d'estimation. Elle a expérimentalement montré des résultats très satisfaisants.

V.2. Méthode du recouvrement rectangulaire

Afin de contribuer à améliorer l'estimation de la dimension fractale des signaux temporels discrets nous avons développé une méthode simple basée sur les mêmes principes que ceux de Minkowski-Bouligand et qu'on a appelé méthode du recouvrement rectangulaire.

La méthode consiste à recouvrir la courbe dont on veut calculer la dimension fractale par des rectangles. Le choix de ce type d'élément géométrique est dû au caractère discret des signaux étudiés. Ainsi, le rectangle permet de relier chaque point de l'axe des temps de la courbe au point correspondant de l'axe des ordonnées et réaliser ainsi le recouvrement de la courbe sans perte d'informations. Du point de vue mathématique, l'utilisation du rectangle comme élément géométrique de recouvrement est justifiée. En effet, Bouligand [70] a montré que D_M (dimension de Minkowski–Bouligand) peut être calculée en remplaçant les disques de l'ancien recouvrement par n'importe quels autres ensembles compacts de forme arbitraire qui possèdent une distance minimale et maximale non nulle à partir de leurs centres jusqu'à leurs limites.

Ainsi, comme le montre la figure (I-3) pour des intervalles de temps différents $\Delta\tau$ on calcule la surface $S(\Delta\tau)$ de la courbe recouverte comme suit :

$$S(\Delta\tau) = \sum_{n=0}^{N-1} \Delta\tau |f(t_n + \Delta\tau) - f(t_n)| \quad (\text{I.11})$$

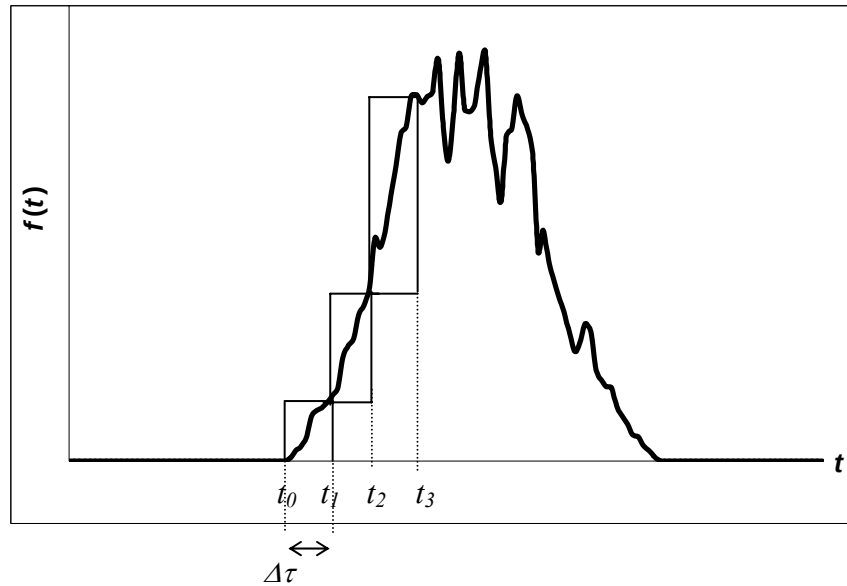


Figure I-3. Recouvrement d'une courbe temporelle par des rectangles

N représente la taille du signal à étudier (nombre d'échantillons du signal considéré), $f(t_n)$ est la valeur de la fonction représentant le signal à l'instant t_n et $|f(t_n + \Delta\tau) - f(t_n)|$ est la variation de la fonction pendant l'intervalle $\Delta\tau$.

La dimension fractale est alors déduite de l'équation (I.10) en remplaçant ε par l'intervalle de temps $\Delta\tau$ soit :

$$\ln\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right) = D \ln\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right) + \text{constante} \quad (\text{I.12})$$

avec $\Delta\tau \rightarrow 0$

Ainsi, pour déterminer la dimension fractale D qui représente la pente de la droite (I.12) ajustée par la méthode des moindres carrés, il faudrait utiliser différents intervalles de temps $\Delta\tau$ et mesurer les surfaces $S(\Delta\tau)$ correspondantes. On aura alors plusieurs points $(\Delta\tau_i, S(\Delta\tau_i))$ qui constituent la droite (I.12).

Une bonne estimation de la dimension fractale D nécessite un bon ajustement de la droite log-log définie par l'équation (I.12). Ainsi, le nombre de points constituant la droite est un paramètre très important. Ce nombre est fixé par $\Delta\tau_{max}$ qui est le pas de temps maximal à travers lequel est ajustée la droite log-log. $\Delta\tau_{max}$ nécessaire à une bonne estimation ne doit pas être trop faible pour ne pas biaiser l'ajustement de la droite, il ne doit pas également dépasser $N/2$.

Comme nous l'avons déjà mentionné la détermination de ce paramètre est effectuée d'une manière empirique. Aussi, comme première étape nous avons procédé à la détermination de ce paramètre d'une manière expérimentale. La procédure suivie est l'application de la méthode que nous venons de décrire aux signaux avec $\Delta\tau_{max} = 10$, c'est-à-dire un très petit intervalle, ensuite appliquer la méthode aux mêmes signaux en incrémentant à chaque fois $\Delta\tau_{max}$ de 1 jusqu'à atteindre $N/2$. Le $\Delta\tau_{max}$ choisi est celui qui donne une dimension fractale en accord avec l'observation.

Cette procédure basée sur un savoir faire expérimentale nécessite beaucoup de temps et souffre de précision puisqu'il faut se fier à l'observation des courbes. Aussi, nous avons élaboré une technique d'optimisation qui permet de déterminer l'intervalle de temps maximum $\Delta\tau_{max}$ le plus optimal.

- **Technique d'optimisation [82]**

Cette technique est basée sur la recherche de la droite log-log de l'équation (I.12) qui se rapproche le plus du nuage de points $\left(\ln\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right), \ln\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right) \right)$. Soit la figure (I-4) qui représente l'ensemble de points constituant une courbe log-log de l'équation (I.12).

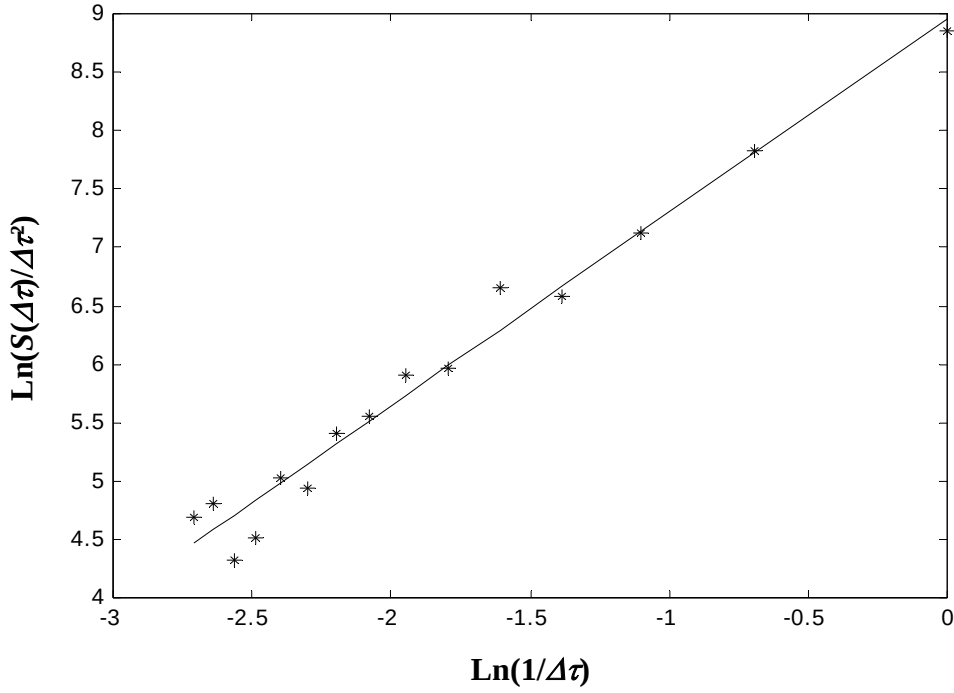


Figure I-5. Exemple de droite log–log ajustée par la méthode des moindres carrés

La méthode consiste à ajuster la droite log–log à l'aide de la méthode des moindres carrés en commençant par un nombre de points correspondant à un $\Delta\tau_{max}$ minimal à peu près 10, car le nombre de points constituant la droite ne doit pas être trop faible comme nous l'avons déjà signalé, puis en l'incrémentant jusqu'à $\Delta\tau_{max} = N/2$. Nous obtenons ainsi plusieurs droites log–log, la droite choisie est alors celle dont l'erreur quadratique de l'ensemble des points $\left(\text{Ln}\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right), \text{Ln}\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right) \right)$ est minimale.

L'erreur quadratique utilisée est définie par la relation suivante :

$$E_{quad} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} \quad (\text{I.13})$$

Dans cette relation n est le nombre de points utilisé pour l'ajustement de la droite, d_i représente la distance entre les points $\left(\text{Ln}\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right), \text{Ln}\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right) \right)$ et la droite log–log ajustée comme indiqué dans la figure (I-5).

Dans cette figure $\text{Ln}\left(\frac{1}{\Delta\tau}\right)$ est symbolisé par x et $\text{Ln}\left(\frac{S(\Delta\tau)}{\Delta\tau^2}\right)$ par y .

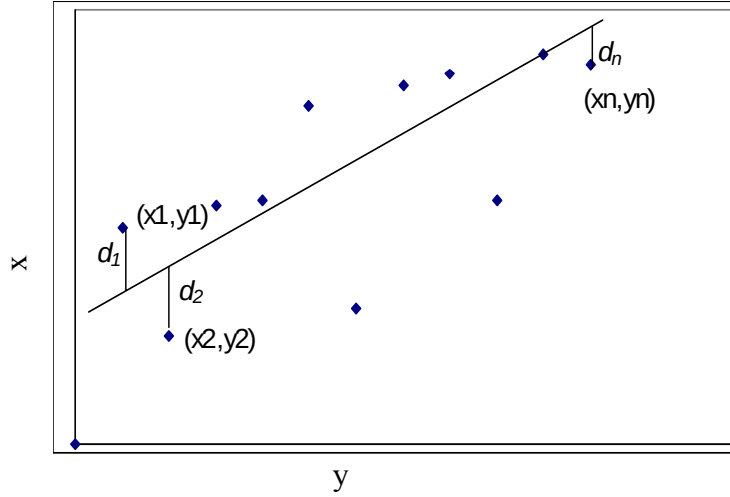


Figure I-5. Calcul des distances d_i entre les points réels de la droite (I.12) et la droite ajustée

V.2.2. Validation de la méthode

Afin de tester la validité et la précision de la méthode du recouvrement rectangulaire, nous l'avons appliqué à deux types de signaux fractals paramétriques dont la dimension fractale théorique est connue, il s'agit du signal de la fonction de Weierstrass (FW) qui est un signal déterministe et le signal aléatoire du mouvement Brownien fractionnaire (MBF). Ces signaux fractals que nous allons définir brièvement ci-dessous sont très utilisés dans des applications diverses.

- **La fonction de Weierstrass (FW)**

Elle est définie comme suit [18,83-84] :

$$W_H(t) = \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^{-kH} \cos(2\pi\gamma^k t) \quad (I.14)$$

$$0 < H < 1$$

Cette fonction est continue mais non différentiable en tout point, si γ est un entier, alors elle est périodique de période 1 [68]. Souvent dans la pratique γ est un entier supérieur à 1 fixé par l'expérimentateur lui permettant d'épouser au mieux la forme du signal, la dimension fractale de cette fonction est $D=2-H$.

Dans notre travail, nous avons généré des signaux temporels discrets à partir de la fonction (FW). Ces signaux sont constitués de 500 points équidistants dans l'intervalle de temps $[0, 1]$ en utilisant $\gamma=5$ et en limitant la série infinie de façon à ce que la sommation soit réalisée pour $0 < k < k_{max}$, k_{max} est déterminé à partir de l'inégalité $2\pi\gamma^k \leq 10^{12}$ [68].

La figure (I-6) montre trois signaux FW dont l'irrégularité augmente avec leurs dimensions fractales D .

- **Le mouvement Brownien fractionnaire (MBF)**

C'est l'un des modèles mathématiques les plus utilisés pour décrire les fractales auto-affines rencontrées dans la nature.

Le mouvement Brownien découvert par le botaniste anglais R. Brown est un processus aléatoire qui définit l'évolution des particules microscopiques d'un fluide sous l'impact des molécules du fluide. Mandelbrot et Wallis ont proposé une extension de ce mouvement : le mouvement Brownien fractionnaire.

Par définition un processus Brownien fractionnaire $B_H(t)$ est tout processus aléatoire dont les incréments sont stationnaires et ont une distribution gaussienne de variance :

$$\begin{aligned} \langle [B_H(t) - B_H(t_0)]^2 \rangle &= 2D(t - t_0)^{2H} \\ 0 < H < 1 \end{aligned} \quad (\text{I.15})$$

La dimension fractale D de $B_H(t)$ est $D = 2 - H$.

Pour générer les signaux MBF, plusieurs méthodes existent [85-88], on peut citer : la méthode de la décomposition de Choleski, l'algorithme de Durbin–Levinson, la méthode de la transformée de Fourier FFT et la méthode de la matrice circulante.

Dans notre travail nous avons généré les signaux MBF en utilisant la méthode de Durbin–Levinson, la figure (I-7) montre des signaux MBF générés de taille 500 et ceci pour différentes valeurs de D .

Les différents signaux FW et MBF générés ont servi de test pour valider la méthode du recouvrement rectangulaire que nous avons élaboré.

Les tableaux (I-1) et (I-2) montrent la dimension fractale estimée $\hat{D}$ et l'écart d'estimation $|D - \hat{D}|$ et ceci pour des valeurs différentes de D . Les $\Delta\tau_{max}$ optimaux qui ont servi à l'obtention de $\hat{D}$ sont aussi reportés dans ces tableaux.

Les résultats expérimentaux des tableaux (I-1) et (I-2) montrent que pour les signaux fractals FW et MBF la méthode du recouvrement rectangulaire présente une bonne performance pour l'estimation des dimensions $D \in [1.1, 1.9]$ puisque l'erreur d'estimation est inférieure ou égale à 6 % pour les signaux WF et à 7 % pour les signaux MBF.

En faisant varier la taille des signaux $N \in [100, 1000]$ avec un pas de 100 nous avons observé une performance similaire de cette méthode. Sur 99 combinaisons différentes de (D, N) la moyenne de l'erreur d'estimation de la méthode du recouvrement rectangulaire a été trouvée égale à 4 % pour les deux types de signaux.

Un échantillon des dimensions fractales et de leurs erreurs d'estimation trouvées en faisant varier la taille des signaux N est donné dans les tableaux (I-3) et (I-4). Nous constatons que

pour le signal FW l'erreur d'estimation de D diminue avec l'augmentation de N , ce qui n'est pas le cas en général pour le signal MBF où l'erreur d'estimation pour certaines D est plus faible pour $N=100$.

Globalement, on peut constater clairement à partir des résultats des tableaux (I-3) et (I-4) que notre méthode donne une bonne estimation de la dimension fractale des signaux testés pour $D \in [1.3, 1.8]$ quelque soit la taille du signal. Pour $D = 1.1$, $D = 1.2$ et $D = 1.9$ c'est-à-dire lorsque le signal devient très régulier ou très irrégulier une bonne estimation de la dimension fractale est obtenue pour des tailles élevées du signal. Ceci peut être expliqué par le fait que les signaux de petites tailles perdent quelques degrés d'irrégularité lors de leur discrétisation, puisque les signaux testés sont des signaux discrétisés.

Pour appuyer ces résultats nous avons représenté dans les figures (I-8), (I-9), (I-10) et (I-11) le tracé log-log de quelques exemples des signaux testés pour $N = 100$ et $N = 1000$. Nous remarquons que généralement les points se situent sur une ligne droite pour $N = 1000$ ce qui montre la bonne performance de la méthode. Cependant, nous observons quelques courbures dans le tracé pour $N = 100$ ce qui montre que l'estimation de la dimension fractale est meilleure pour des signaux de tailles élevées.

VI. conclusion

La dimension fractale est l'une des caractéristiques importantes des objets fractals. Elle est considérée comme l'indice universel du degré de leur irrégularité. Pour les signaux temporels, la dimension fractale quantifie le degré de leur fluctuation ce qui permet leur comparaison, classification et prédiction.

Plusieurs méthodes et algorithmes de mesure de la dimension fractale des signaux temporels basés sur des recouvrements divers ont été élaborés. La différence entre ces algorithmes réside dans le recouvrement de la courbe temporelle.

Afin d'améliorer la complexité et la précision de l'estimation de la dimension fractale des signaux temporels discrets, nous avons développé une méthode simple basée sur un recouvrement multi-échelle utilisant le rectangle comme élément géométrique de recouvrement.

Une technique d'optimisation a été associée à cette méthode afin de déterminer l'intervalle de temps $\Delta\tau_{max}$ le plus optimal à travers lequel est ajustée la droite log-log dont la pente représente la dimension fractale.

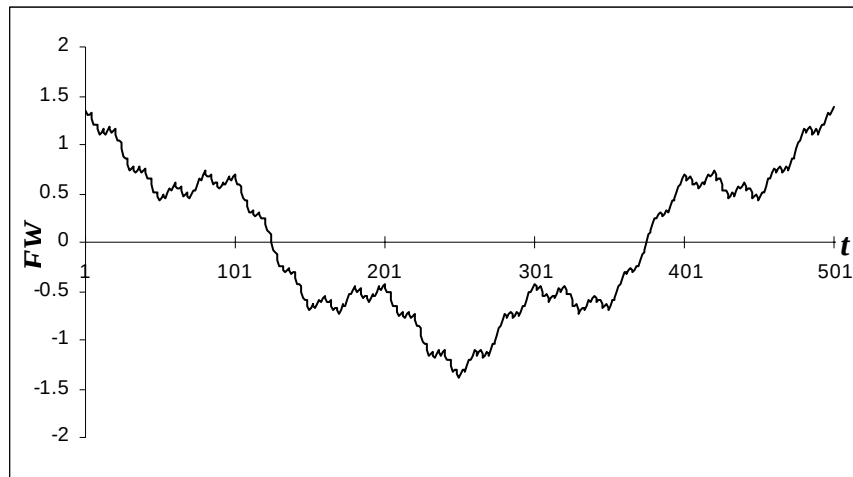
Cette technique d'optimisation a permis d'améliorer la précision et le temps de calcul de notre méthode puisque la recherche du $\Delta\tau_{max}$ se fait automatiquement à l'inverse de la plupart des méthodes existantes où la recherche du $\Delta\tau_{max}$ repose sur un savoir faire expérimentale.

Afin de mesurer la performance et la robustesse de la méthode proposée, nous l'avons appliqué à des signaux fractals paramétriques dont la dimension fractale théorique est connue à savoir la fonction de Weierstrass (FW) et le mouvement Brownien fractionnaire (MBF).

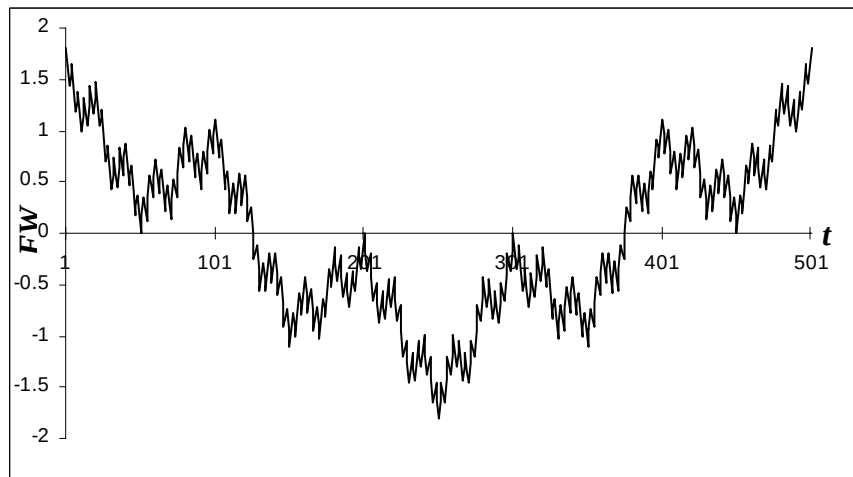
Les résultats expérimentaux obtenus ont montré que la méthode proposée présente une bonne précision puisque l'erreur d'estimation en moyenne sur 180 tests effectués sur des signaux fractals WF et MBF a été trouvée égale à 3.7 %.

L'une des applications diverses de la dimension fractale est son utilisation pour quantifier les fluctuations aléatoires des signaux d'éclairement solaire. Ceci permet de réaliser leur prédiction, leur simulation et leur classification par la suite.

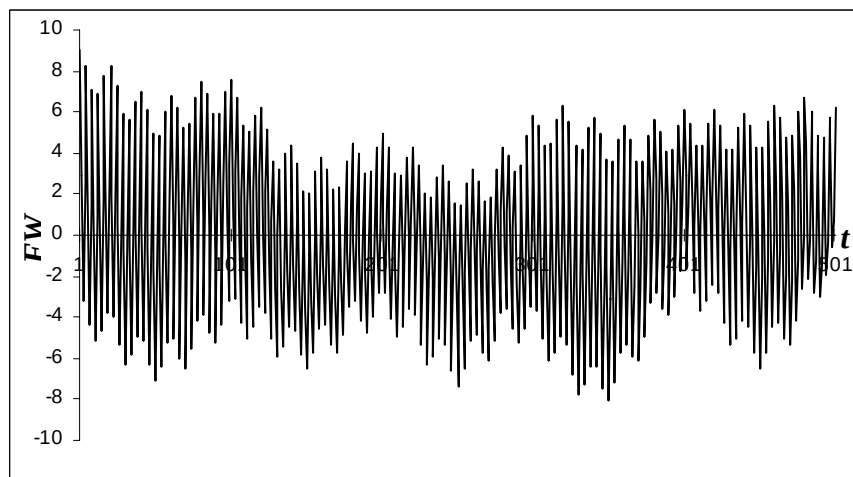
Aussi, nous proposons dans le chapitre suivant une nouvelle méthode de classification des signaux d'éclairement solaire basée sur l'analyse fractale.



(a)

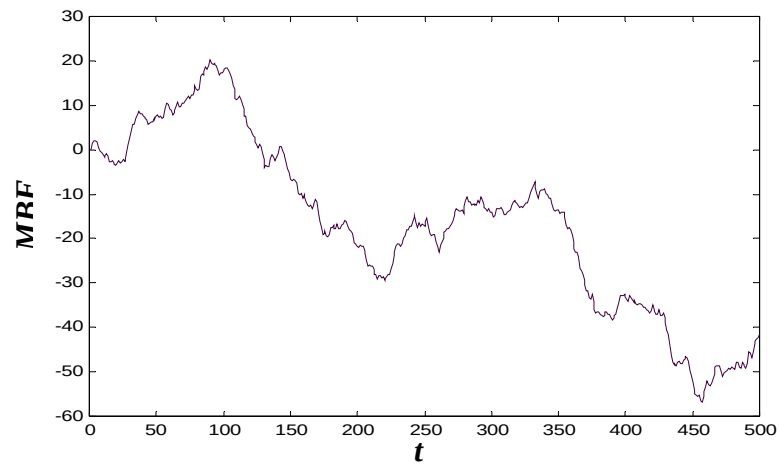


(b)

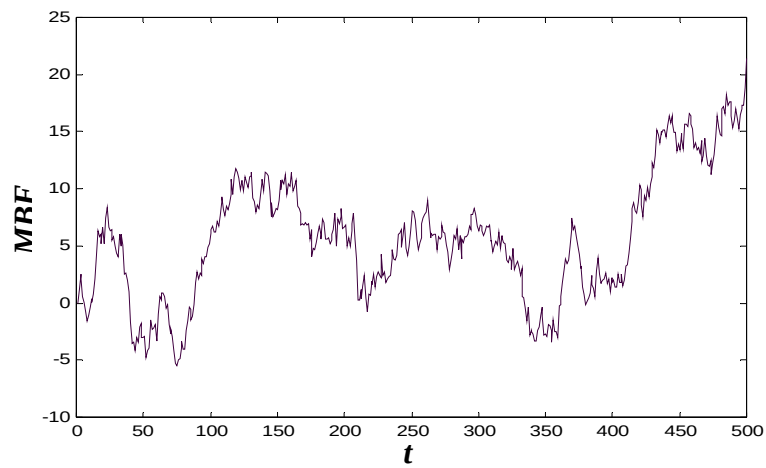


(c)

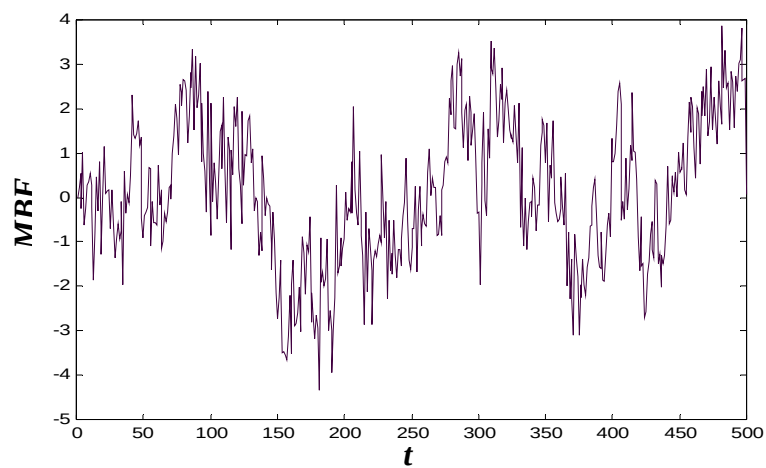
Figure I-6. Trois exemples de signaux générés par la fonction FW
a) $D=1.2$ b) $D=1.5$ c) $D=1.8$



(a)



(b)



(c)

Figure I-7. Trois exemples de signaux MBF
a) $D=1.2$ b) $D=1.5$ c) $D=1.8$

D réelle (D)	D estimée ($\hat{D}$)	Ecart $((D - \hat{D}).100)$	$\Delta\tau_{\max}$ optimal
1.1	1.16	6 %	13
1.2	1.22	2 %	13
1.3	1.30	0 %	11
1.4	1.39	1 %	13
1.5	1.48	2 %	13
1.6	1.59	1 %	14
1.7	1.69	1 %	14
1.8	1.78	2 %	14
1.9	1.86	4 %	13

Tableau I-1. Résultats d'estimation de la dimension fractale des signaux FW de taille 500 avec la méthode du recouvrement rectangulaire.

D réelle (D)	D estimée ($\hat{D}$)	Ecart $((D - \hat{D}).100)$	$\Delta\tau_{\max}$ optimal
1.1	1.17	7 %	10
1.2	1.28	8 %	10
1.3	1.27	3 %	11
1.4	1.41	1 %	10
1.5	1.51	1 %	13
1.6	1.62	2 %	11
1.7	1.75	5 %	11
1.8	1.75	5 %	14
1.9	1.92	2 %	12

Tableau I-2. Résultats d'estimation de la dimension fractale des signaux MBF de taille 500 avec la méthode du recouvrement rectangulaire.

$N \backslash D$	100		500		1000	
	$\hat{D}$	Ecart	$\hat{D}$	Ecart	$\hat{D}$	Ecart
1.1	1.23	13 %	1.16	6 %	1.16	6 %
1.2	1.30	10 %	1.22	2 %	1.22	2 %
1.3	1.38	8 %	1.30	0 %	1.30	0 %
1.4	1.46	6 %	1.39	1 %	1.40	0 %
1.5	1.55	5 %	1.48	2 %	1.50	0 %
1.6	1.62	2 %	1.59	1 %	1.61	1 %
1.7	1.68	2 %	1.69	1 %	1.71	1 %
1.8	1.73	7 %	1.78	2 %	1.82	2 %
1.9	1.70	20 %	1.86	4 %	1.91	1 %

Tableau I-3. Résultats d'estimation de la dimension fractale de signaux FW de différentes tailles N avec la méthode du recouvrement rectangulaire

$N \backslash D$	100		500		1000	
	$\hat{D}$	Ecart	$\hat{D}$	Ecart	$\hat{D}$	Ecart
1.1	1.35	25 %	1.17	7 %	1.09	1 %
1.2	1.36	16 %	1.28	8 %	1.2	0%
1.3	1.3	0 %	1.27	3 %	1.36	6 %
1.4	1.47	7 %	1.41	1 %	1.43	3 %
1.5	1.42	8 %	1.51	1 %	1.47	3 %
1.6	1.56	4 %	1.62	2 %	1.6	0 %
1.7	1.7	0 %	1.75	5 %	1.68	2 %
1.8	1.82	2 %	1.75	5 %	1.78	2 %
1.9	1.8	10 %	1.92	2 %	1.93	3 %

Tableau I-4. Résultats d'estimation de la dimension fractale de signaux MBF de différentes tailles N avec la méthode du recouvrement rectangulaire

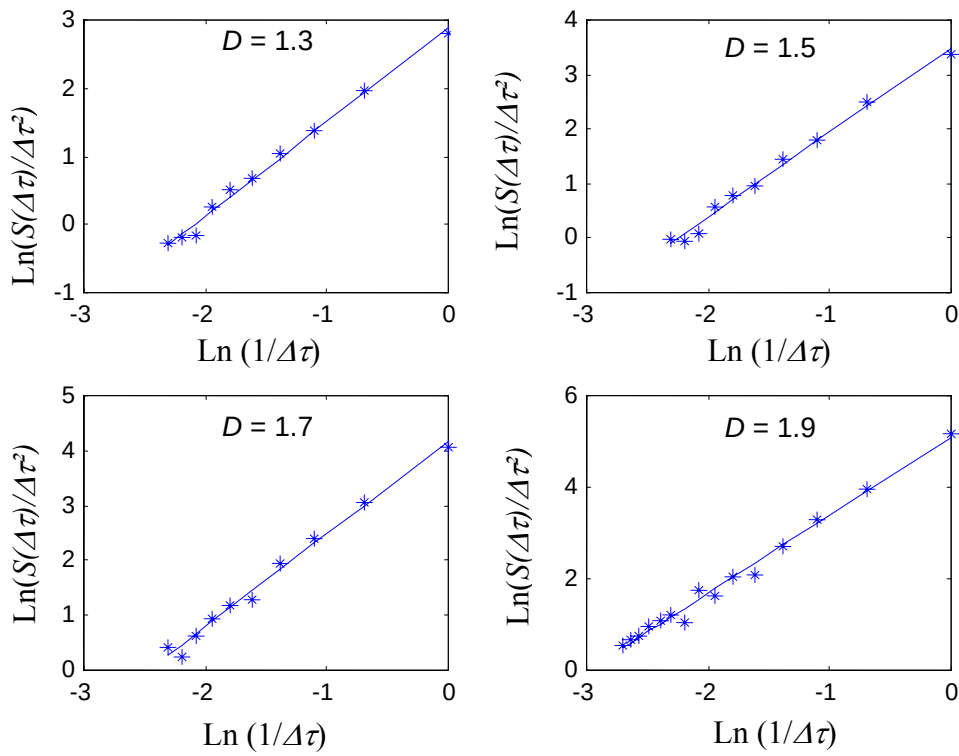


Figure I-8. Exemples de tracés log-log de signaux WF avec $N = 100$

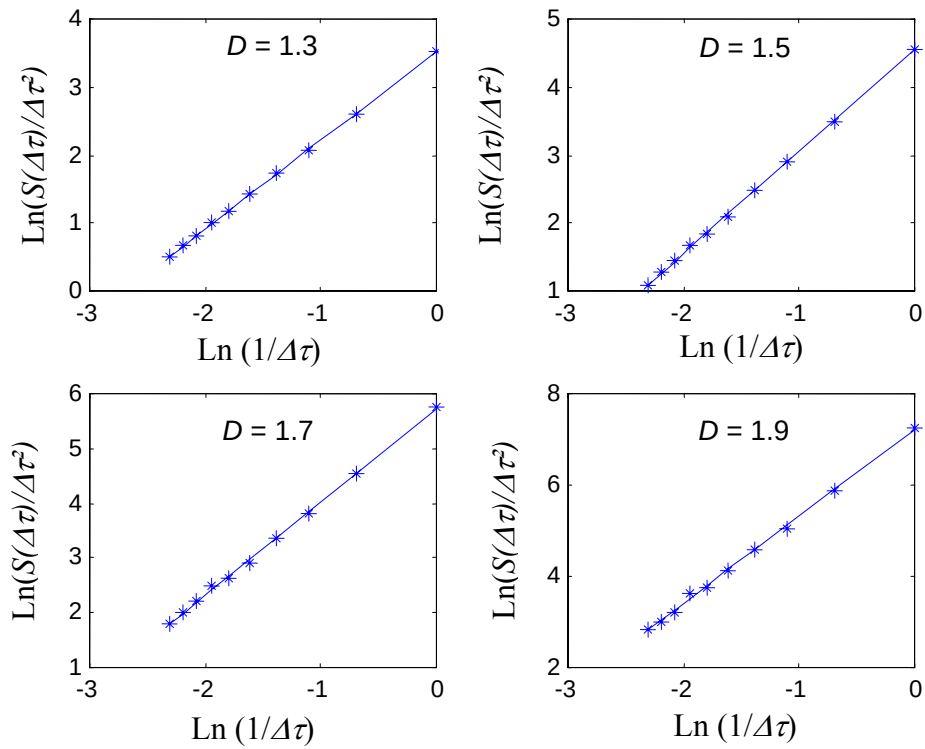


Figure I-9. Exemples de tracés log-log de signaux WF avec $N = 1000$

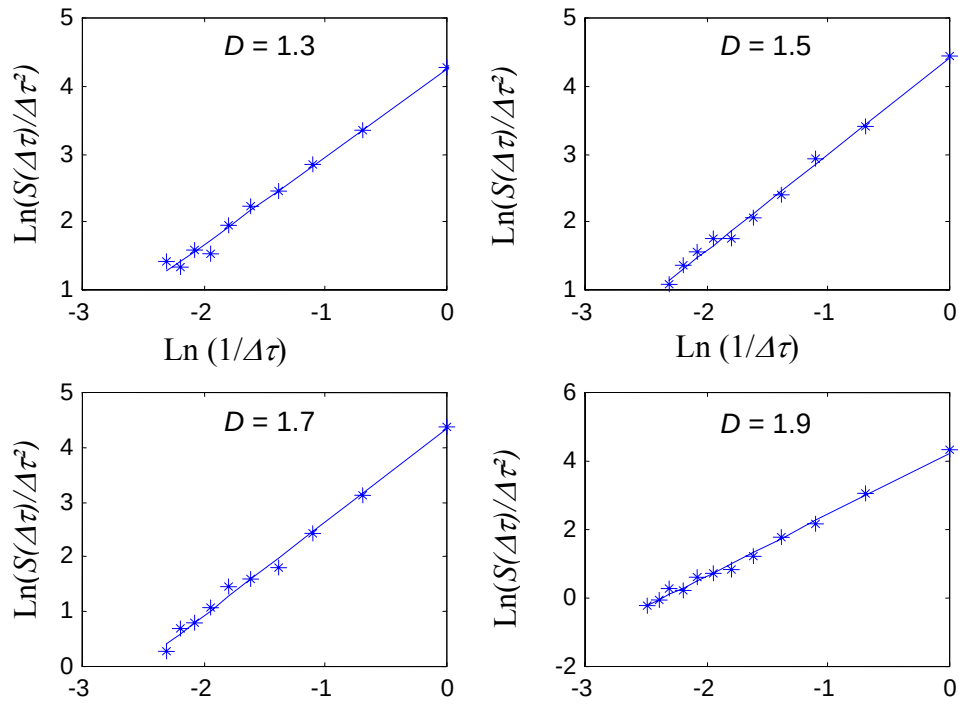


Figure I-10. Exemples de tracés log-log de signaux MBF avec $N = 100$

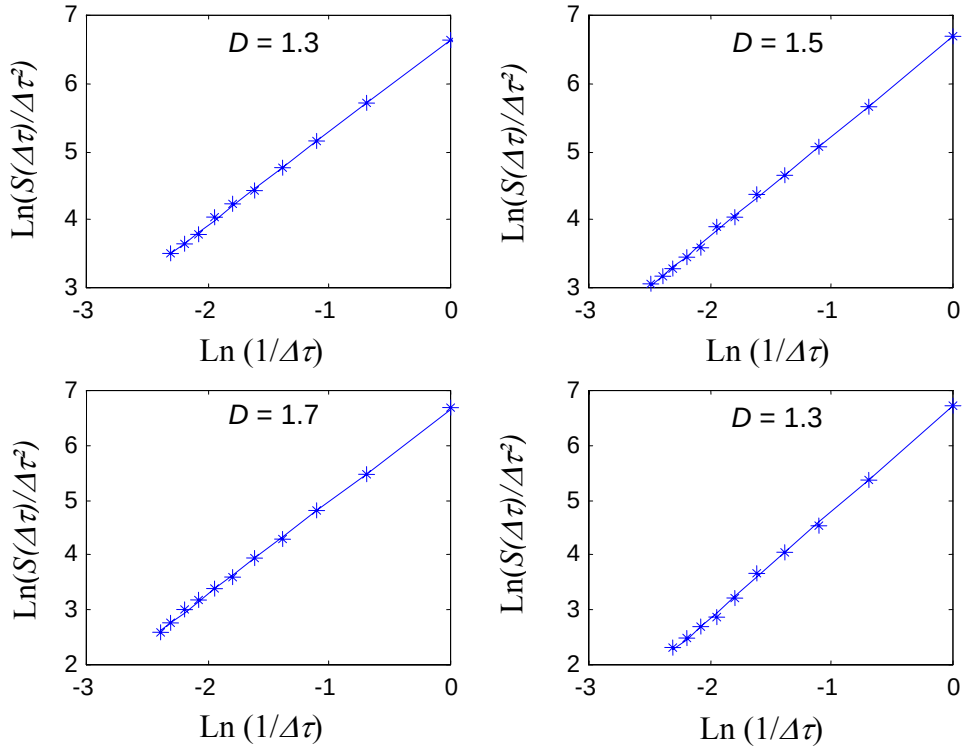


Figure I-11. Exemples de tracés log-log de signaux MBF avec $N = 1000$

CHAPITRE 2

CHAPITRE 2

CLASSIFICATION DES SIGNAUX D'ECLAIREMENTS SOLAIRES A L'AIDE DE L'ANALYSE FRACTALE

I. introduction

Les systèmes d'énergie solaire notamment ceux basés sur la conversion photovoltaïque nécessitent une bonne connaissance des fluctuations de l'éclairement solaire. Ceci peut être réalisé grâce à un groupement homogène des journées étudiées en des types de temps. Ces derniers permettront alors la réduction d'une longue série de données en des classes de journées typiques.

Ce chapitre est consacré à la classification des éclairements solaires en des types de temps. Après un aperçu sur les notions de base du rayonnement solaire, nous traiterons le problème de la classification en présentant une méthode de classification des éclairements solaires basée sur la dimension fractale. En effet, nous avons montré dans le chapitre précédent que les fluctuations du rayonnement solaire peuvent être quantifiées grâce à la dimension fractale. Aussi, en combinant ce paramètre à l'indice de clarté nous proposons la classification des éclairements solaires selon l'état du ciel.

La méthode élaborée sera appliquée à cinq sites de différents climats : Golden et Boulder (Colorado), Tahifet et Imehrou (Sud d'Algérie) et Palo Alto (San Francisco).

Aussi, nous présenterons la banque de données utilisée ainsi que les sites étudiés. A la fin, les résultats de la classification seront présentés et discutés.

II. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

La puissance rayonnée à la surface du soleil est à peu près égale à $3,79 \cdot 10^8$ W. Cependant cette puissance est considérablement atténuée avant son arrivée sur terre. Cette atténuation est due aux phénomènes atmosphériques suivants : l'absorption, la diffusion et la réflexion. Ces phénomènes sont détaillés dans l'annexe 3.

Ainsi, le rayonnement solaire est constitué des composantes suivantes:

Le rayonnement directe: c'est la partie qui a conservé une direction commune et son énergie propre [89].

Le rayonnement diffus: c'est le rayonnement qui a subi un changement de direction (diffusion) [89], c'est donc le rayonnement ré-émis par toutes les parties de l'atmosphère et du sol.

Le rayonnement global (total): c'est la somme des composantes directes et diffuses. Si la surface étudiée est inclinée par rapport à l'horizontal, le rayonnement global est la somme du rayonnement direct, diffus et le rayonnement réfléchi par le sol.

La figure (II-1) [90] schématise les différentes composantes du rayonnement solaire.

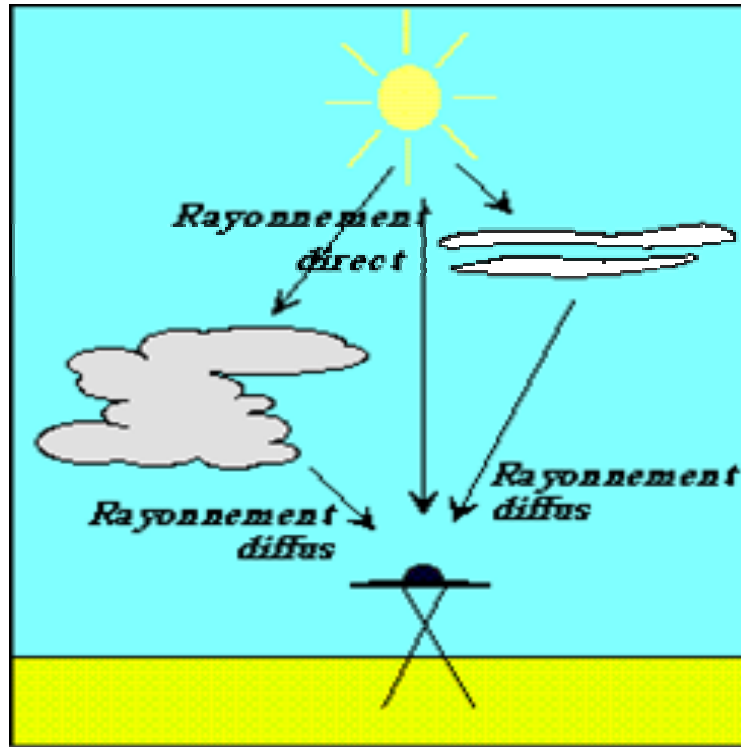


Figure II-1. Les composantes du rayonnement solaire

La puissance solaire est souvent exprimée en **éclairement** solaire, c'est la puissance captée à un instant donné par unité de surface (elle est exprimée en W/m^2).

Le rayonnement solaire est aussi exprimé en terme d'énergie, on l'appelle alors **Irradiation**. Celle-ci est l'énergie reçue pendant un intervalle de temps, elle est exprimée en J/m^2 ou Wh/m^2 .

Le rayonnement solaire en dehors de l'atmosphère est appelé **Irradiation hors atmosphère** ou **extraterrestre**. Cette irradiation solaire journalière reçue sur une surface horizontale exprimée en joules/ m^2 peut être donnée par [91-93]:

$$H_0(j) = \frac{24}{\pi} 3600 K_d(j) \left[\cos(\phi) \cos(\delta(j)) \sin(\omega_s(j)) + \left(\frac{\pi \omega_s(j)}{180} \right) \sin(\phi) \sin(\delta(j)) \right] \quad (II.1)$$

avec $1 \leq j \leq 365$ ou 366 jours.

ϕ représente la latitude du lieu, $K_d(j)$ donne la valeur corrigée de la constante solaire H_{cs} elle est exprimée par:

$$K_d(j) = H_{cs} [1 + 0.033 \cos(0.98 j)] \quad (\text{II.2})$$

ou $H_{cs} = 1367 \text{ W/m}^2$ est la constante solaire.

$\omega_s(j)$ qui est exprimé en degrés dans la relation (II.1), désigne l'angle horaire au coucher du soleil sur plan horizontal, sa valeur peut être calculée comme suit:

$$\omega_s(j) = \arccos [-\tan(\phi) \tan(\delta(j))] \quad (\text{II.3})$$

$\delta(j)$ représente la déclinaison solaire, exprimée en degrés. Elle vaut:

$$\delta(j) = 23.45 \sin[0.98(j + 284)] \quad (\text{II.4})$$

Pour un plan incliné par rapport à l'horizontal il a été montré que dans des conditions météorologiques idéales (ciel clair sans nébulosité) l'irradiation solaire journalière reçue par le capteur plan est constituée uniquement de la composante directe du rayonnement solaire $H_d(j)$, elle varie en fonction de l'inclinaison θ du capteur selon une loi du type [3], [94] :

$$H_d(j) = H_{d0} \left[\frac{\omega_{st}(j) \sin(\delta(j)) \sin(\phi - \theta) + \cos(\delta(j)) \sin(\omega_{st}(j)) \cos(\phi - \theta)}{\omega_s(j) \sin(\phi) \sin(\delta(j)) + \cos(\phi) \cos(\delta(j)) \sin(\omega_{st}(j))} \right] \quad (\text{II.5})$$

H_{d0} est l'irradiation directe reçue sur une surface horizontale, $\omega_{st}(j)$ représente l'angle horaire au coucher du soleil sur plan incliné, sa valeur peut être exprimée par :

$$\omega_s(j) = \arccos [-\tan(\phi) \tan(\delta(j))] \quad (\text{II.6})$$

Les conditions qui ont permis d'établir la loi (II.5) correspondent aux conditions hors atmosphère où le rayonnement n'est constitué que de la composante directe. Ceci permet d'utiliser l'équation (II.5) afin de calculer l'irradiation solaire hors atmosphère reçue sur plan incliné en remplaçant H_{d0} par H_0 donné par l'équation (II.1).

III. classification des éclairements solaires en des types de temps

Les méthodes de classification standard font partie de la statistique exploratoire multidimensionnelle. Elles ont pour but de construire une partition ou une suite de partitions qui permet de réduire une masse de données importantes. Les classes ainsi formées doivent être les plus homogènes possibles.

Les méthodes de classification statistiques peuvent être divisées en deux grands types, les méthodes de partitionnement et les méthodes hiérarchiques. Le choix de la bonne méthode dépend de la nature des variables, et de la problématique posée.

Plusieurs ouvrages traitant des bases fondamentales des méthodes de classification auxquelles nous ne pouvons que renvoyer le lecteur pour des préalables fondamentaux ont été publiés [95-108]. Les principes de base des méthodes les plus largement utilisées sont donnés dans l'annexe 4. Dans ce paragraphe nous allons nous intéresser à la classification des signaux d'éclairement solaire en des types de temps en utilisant l'analyse fractale.

III.1. Classification fractale des signaux d'éclairement solaire

L'obtention d'une classification objective des journées en des types de temps pour une région déterminée présente un intérêt considérable du point de vue climatologique. En effet, l'histoire d'une période peut être analysée à partir des groupements obtenus.

D'autre part, les systèmes de gestion des ressources énergétiques notamment solaires sont considérablement influencés par les signaux climatiques. L'évolution de ces paramètres obéit à des variations saisonnières auxquelles s'ajoute des fluctuations aléatoires. Il est alors nécessaire de quantifier ces fluctuations et réaliser leur classification en fonction de l'état du ciel (ciel clair, ciel couvert, ...etc.) afin d'adapter les systèmes énergétiques à toute variabilité climatique.

La modélisation des fluctuations aléatoires du rayonnement solaire a déjà fait l'objet de plusieurs études publiées dans la littérature. Ces dernières se basent pour la plupart, sur les processus aléatoires. Les approches Markoviennes en particulier, ont largement contribué à cette modélisation. En effet, elles ont permis la mise au point de modèles du rayonnement solaire capables de reproduire ses caractéristiques à travers le monde avec des précisions acceptables. A titre d'exemple, il y a lieu de citer les travaux de Brinkworth [109], de Bartoli *et al.* [110], de Lestienne *et al.* [1], de Aguiar *et al.* [2] et de Maafi [3]. Les travaux de ce dernier ont traité indirectement le problème de la classification des insolation et des irradiations journalières en les reliant aux états du ciel : ciel clair, ciel couvert, ...etc. [3-4].

Le problème de la classification des journées en des types de temps a été à son tour largement traité en commençant par les travaux de Barbaro *et al.* [111] et de Bida *et al.* [112]. Par la suite Aranovitch *et al.* [113] ont élaboré des classificateurs en utilisant 3 classes de journées: ciel clair, partiellement couvert et couvert (opaque) dans le but de générer des signaux d'irradiation globales journalières sur plan incliné et d'étudier les performances des systèmes PV dans la région d'Ispira (Italie). Les paramètres utilisés dans leur travail sont la moyenne mensuelle de l'irradiation globale horizontale, la température et la vitesse du vent.

Une étude menée à Trappes et Carpentras (France) [113], basée sur l'installation des systèmes PV dans les maisons a utilisé les paramètres décrits précédemment, en rajoutant la pression de la vapeur partielle, la direction du vent et la nébulosité du ciel. Ce travail a conduit à 10 classes. La méthodologie proposée est difficile à utiliser car elle demande plusieurs paramètres qui sont rarement mesurés.

Fabero *et al.* [113] ont constitué 9 périodes journalières "typiques" en décomposant chaque jour étudié en 3 périodes. Cette étude (Madrid, Espagne), utilisant l'irradiation horizontale globale enregistrée avec un pas de temps de 10 minutes, a étudié les transitions entre les périodes pour un jour donné dans le but d'évaluer le potentiel solaire.

Boullier et Le Chapellier [113] ont présenté une approche originale. Douze paramètres (irradiation horizontale, température de l'air, vitesse du vent, humidité, nébulosité pour les principaux paramètres) ont été utilisés pour étudier les transitions entre les périodes diurnes et nocturnes. Cette étude élaborée à Trappes (France) a conduit à la définition de 4 groupes (9 sous-classes) pour les périodes du jour et également 4 groupes (9 sous-classes) pour les périodes de nuit en combinant le caractère discriminant de chaque variable.

Enfin, une étude menée à Montpellier (France) [114], utilisant les paramètres antérieurs (de Boullier et Le Chapellier), a conclu que 2192 jours mesurés peuvent être groupés en 4 groupes à l'aide d'une méthode de l'analyse factorielle.

D'autres méthodes statistiques ont été utilisées pour la classification des journées en des cas types tel que la classification automatique [115], l'analyse des corrélations [13] et la méthode de WARD [113]. Dans ce dernier travail, Muselli *et al.* ont utilisé une méthode de classification basée sur la technique de WARD et l'analyse discriminante.

Des études plus récentes s'intéressent à la modélisation du caractère aléatoire du rayonnement solaire en utilisant les réseaux de neurones [9], [11]. En plus du caractère inédit de cette nouvelle approche, ces études visent à évaluer l'apport de ce formalisme dans la description du caractère fluctuant du rayonnement solaire.

Cependant, très peu de travaux traitant la classification des signaux du rayonnement solaire en utilisant l'analyse fractale ont été publiés [13-15], [116]. Aussi, nous allons ici examiner la contribution de l'analyse fractale dans la classification des signaux d'éclairement solaire dans le but d'aboutir à des types de temps utiles pour le dimensionnement et l'analyse des performances des systèmes énergétiques solaires. Pour cela, nous proposons une méthode de classification qui permet de quantifier les fluctuations du rayonnement solaire à partir de l'estimation de sa dimension fractale [117-119].

Notre méthode de classification est basée sur la détermination des seuils de la dimension fractale des signaux d'éclairement solaire pour aboutir à des groupements homogènes des journées selon l'état du ciel. Le choix d'une méthode de seuillage au lieu d'une méthode

statistique est dicté par le critère principal qui est la dimension fractale. En effet, les méthodes statistiques bien qu'elles diffèrent par les paramètres utilisés comme critères de classification, la plus part d'entre elles utilisent une distance métrique tel que la distance euclidienne afin d'établir l'écart d'homogénéité entre deux journées. Ceci ne peut être appliqué à la dimension fractale vue qu'une journée pluvieuse et une autre ensoleillée peuvent avoir la même dimension fractale comme il sera montré dans ce chapitre.

Notre méthode de classification présente aussi l'avantage de ne pas nécessiter la condition de stationnarité comme c'est le cas pour les approches Markoviennes cités plus haut. Ces méthodes recourent alors à d'autres techniques afin de rendre le rayonnement solaire stationnaire tel que la transformée gaussienne et l'utilisation des fractions de la variable solaire au lieu de la variable elle même.

III.2.1. Principe de la méthode

La méthode élaborée utilise la dimension fractale des signaux d'éclairement solaire comme critère de base pour réaliser la classification des éclairements et aboutir à des types de journées, c'est à dire, journée à ciel clair, journée à ciel couvert, journée à passage nuageux,...etc.

Rappelons que pour les signaux d'éclairement solaire la dimension fractale $\hat{D}$ quantifie leurs fluctuations qui sont reliées aux conditions climatiques et, par conséquent, à l'état du ciel. Une dimension fractale proche de 1 décrit un état de ciel clair sans nuages, tandis qu'une valeur de $\hat{D}$ proche de 2 un état de ciel perturbé avec des nuages. C'est pour cette raison que nous avons choisi la dimension fractale comme critère principal dans notre méthode.

Cependant, nos investigations ont montré que ce critère seul est insuffisant puisque nous avons pu détecter des journées à ciel couvert et des journées à ciel clair ayant la même dimension fractale. Ceci n'est pas en contradiction avec les résultats obtenus. Rappelons à cet effet, que $\hat{D}$ mesure le degré de fluctuations des éclairements et non la quantité d'énergie produite par ces derniers. Aussi, afin de mettre au point notre méthode de classification nous avons associé à $\hat{D}$, l'indice de clarté K_T défini par le rapport entre l'irradiation journalière et l'irradiation journalière hors atmosphère (extraterrestre) correspondante. Ensuite, nous avons établi l'algorithme de classification suivant qui se base sur des seuils de $\hat{D}$ et de K_T :

- Classe 1 / journée à ciel clair :

$$\hat{D} \leq \hat{D}_l \text{ et } K_T \geq (K_T)_l$$

- **Classe 2 / journée à ciel partiellement couvert :**

$$\hat{D}_1 < \hat{D} \leq \hat{D}_2 \quad \text{et} \quad K_T \geq (K_T)_1$$

- **Classe 3 / journée à ciel complètement couvert :**

$$\begin{cases} \hat{D} > \hat{D}_2 \\ \text{ou} \\ \hat{D} \leq \hat{D}_2 \quad \text{et} \quad K_T < (K_T)_1 \end{cases}$$

$\hat{D}_1$ et $\hat{D}_2$ sont les seuils de $\hat{D}$ des différentes classes.

Ainsi, les seuils de $\hat{D}$ sont de nouveaux paramètres à déterminer pour réaliser la classification des éclairements. La valeur 0.5 a été choisie pour $(K_T)_1$, cette valeur permet de distinguer la classe des journées à ciel couvert de la classe des journées à ciel clair. En effet, on peut trouver dans la classe 3 (journées à ciel couvert) des journées ayant des dimensions fractales proches de 1. Ceci est dû au fait que ces journées sont si couvertes que leur K_T est très faible (inférieur à 0.5) ce qui rend leur courbe d'éclairement une ligne régulière qui tend vers 0.

Pour déterminer les seuils de $\hat{D}$, nous avons utilisé une méthode empirique et une autre statistique. L'approche empirique consiste à construire pour chaque jour de l'année l'histogramme des éclairements. L'examen minutieux de l'ensemble des histogrammes obtenus permet de distinguer 3 types d'histogrammes prépondérants qui sont:

- les histogrammes en forme de L,
- les histogrammes en forme de U,
- les histogrammes en forme de J.

En identifiant les relations de classification établies plus haut à ces trois types d'histogrammes, nous pouvons déterminer les seuils de $\hat{D}$ correspondant aux trois classes.

La méthode statistique consiste à choisir les seuils $\hat{D}_1$ et $\hat{D}_2$ à partir de la fonction de distribution cumulative (FDC) $F(x)$ [120]. Cette dernière est définie comme étant la probabilité qu'à une variable pour prendre une valeur inférieure ou égale à x . Ainsi, les deux seuils de $\hat{D}$ correspondent respectivement aux dimensions fractales donnant les valeurs suivantes à la fonction de distribution cumulative $F(x)$:

$$F(x) = \frac{Max - Min}{3} \quad \text{et} \quad F(x) = \frac{2(Max - Min)}{3}$$

Max et Min sont le maximum et le minimum de $F(x)$ respectivement.

III.2.2. Banque de données

Afin de mettre en œuvre notre méthode de classification, nous avons utilisé une banque de données constituée des éclairements globaux enregistrés dans cinq sites différents : Tahifet (Tamanrasset), Imehrou (Illizi), Boulder et Golden (Colorado) et Palo Alto (San Francisco). Les coordonnées géographiques de ces sites sont données dans le tableau (II-1).

Site	Latitude	Longitude	Altitude (m)
TAHIFET	22°53'N	06°00'E	1400
IMEHROU	26°00'N	08°50'E	600
GOLDEN	39°74'N	105°18'W	1829
BOULDER	39°91'N	105°25'W	1855
PALO ALTO	37°42'N	122°15'W	12.192

Tableau II-1. Coordonnées géographiques des sites étudiés

Les éclairements expérimentaux de Tahifet et Imehrou sont mesurées grâce à un système d'acquisition de donnée le Data Logger "GRANT" installé par la Société Nationale de l'Electricité et Gaz (SONELGAZ) afin d'assurer le monitoring d'un système photovoltaïque autonome qui sera décrit dans le chapitre 3. La figure (II-2) montre le site de Tahifet.



Figure II-2. Image du site de Tahifet

Les données d'éclairement des sites de Tahifet et Imehrou ont été enregistrées au cours de l'année 1992 sur un plan incliné de 10° par rapport au plan horizontal. Ces données ont été mesurées au moyen d'une cellule photovoltaïque au silicium monocristallin, et enregistrées à l'aide d'une chaîne automatique de mesure avec un pas d'acquisition de 10 minutes. Ceci est effectué grâce à une prise de données toutes les 10 secondes et au bout de 10 minutes il y a une sommation pour aboutir à une moyenne sur 10mn qui elle est stockée.

Les données de Colorado (USA) sont fournies par MIDC (Measurement and Instrumentation Data Center) [121] dans deux sites : la station du laboratoire de recherche du rayonnement solaire SRRL « Baseline Surface Radiation Network (BSRN) » dans la ville de Golden et la station du centre national en technologie du vent (NWTC) M2 TOWER dans la ville de Boulder. Cette tour météorologique de 82 mètres est située dans le coté ouest de NWTC, à environ 11 km de l'ouest de Broomfield, et 8 km du sud de Boulder. Dans la figure (II-3) [122-123] nous avons représenté la chaîne d'acquisition de données de Golden et la tour de Boulder.



(a)



(b)

Figure II-3. Images des sites de Colorado

a) Chaîne d'acquisition de données de BSRN (Golden)

b) Tour de NWTC (Boulder)

Les éclairements de ces deux sites ont été enregistrés durant l'année 2003 sur plan horizontal grâce à un pyranomètre à précision spectrale PSP² (Precision Spectral pyranometer) à un pas de temps fin qui est 1 minute. Pour le site de Golden, les données sont prises chaque seconde puis moyennées sur 1 minute. Pour le site de Boulder, c'est à chaque 2 secondes que les éclairements sont enregistrés en délivrant à la sortie les données d'1 minute.

² Le pyranomètre à précision spectrale (PSP) est un radiomètre de 1^{ère} classe de l'organisation météorologique mondiale, il est conçu pour mesurer le rayonnement solaire total ou dans de larges bandes de longueurs d'ondes définies

Pour ces deux sites, nous avons extrait à partir des données d'1 minute les données de 10 minutes en prenant les éclairements mesurés à chaque 10 minutes.

Les éclairements solaires de Palo Alto (Sans Francisco-USA) font partie des paramètres résultant du monitoring d'un système photovoltaïque résidentiel relié au réseau et alimentant une maison. Ce système qui sera décrit en détail dans le chapitre 3 a été installé en Mai 2000 par CPAU (City of Palo Alto utilities) [124]. Grâce au système d'acquisition de données Le Data Logger "Campbell Scientific CR10X" les données d'éclairement solaire ont été prises à un pas de temps de 15 minutes durant l'année 2003 sur un plan incliné de 30° par rapport à l'horizontal. La figure (II-4) [124] montre le site de Palo Alto où est implantée le système PV étudié.



Figure II-4. Image du système PV en cours d'installation dans une maison à Palo Alto

Des exemples d'histogrammes des éclairements (E_{cl}) les plus fréquents obtenus avec les données de 10 minutes pour Tahifet et celles de la minute pour Golden sont représentés dans les figures (II-5) et (II-6).

A partir des éclairements mesurés nous avons calculé les irradiances journalières pour chaque site étudié. Pour cela, nous avons utilisé la méthode des trapèzes [125] pour intégrer les puissances solaires (éclairements) et aboutir à des énergies solaires (irradiances). Les figures (II-7) et (II-8) représentent pour chaque site la moyenne mensuelle sur l'année des irradiances journalières et leur histogramme annuel respectivement.

Afin de compléter notre banque de données, nous avons calculé l'indice de clarté journalier K_T à partir de l'irradiation globale journalière H et l'irradiation globale journalière hors atmosphère H_0 en utilisant la relation suivante :

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (\text{II.7})$$

H_0 est calculée en utilisant l'équation (II.1) pour l'irradiation reçue sur plan horizontal (Boulder et Golden) et l'équation (II.5) pour l'irradiation sur plan incliné (Tahifet, Imehrou et Palo Alto).

La figure (II-9) représente pour chaque site l'évolution annuelle de H et de H_0 .

III.2.3. Traitement fractal des signaux d'éclairement solaire

Pour estimer les dimensions fractales des signaux d'éclairement solaire des différents sites décrits ci-dessus, nous avons utilisé la méthode du "Recouvrement rectangulaire" présentée dans le chapitre 1.

Les éclairements solaires dont nous disposons sont mesurés à l'échelle de la minute (Golden et Boulder), de 10 minutes (Tahifet et Imehrou) et 15 minutes (Palo Alto). Afin d'étudier l'impact du pas d'acquisition des données d'éclairement sur la méthode du "Recouvrement rectangulaire", nous proposons d'estimer la dimension fractale des signaux d'éclairement solaire de Golden et Boulder en utilisant les données d'1 minute et celles de 10 minutes. Pour Tahifet, Imehrou et Palo Alto où nous ne disposons pas des données d'1 minute nous avons estimé la dimension fractale à l'échelle de 10 minutes pour les deux premiers sites et 15 minutes pour le dernier.

La figure (II-10) représente des exemples des tracés log-log qui ont permis l'estimation de la dimension fractale des courbes d'éclairement de l'ensemble des sites. On remarque que les points sont groupés autour de la droite ajustée ce qui démontre l'auto-affinité des signaux étudiés.

Une partie des dimensions fractales obtenues à partir des droites log-log est illustrée par la figure (II-11). Cette dernière représente pour chaque site trois courbes d'éclairements solaires de différents aspects avec leurs dimensions fractales $\hat{D}$. Pour les deux sites de Colorado : Golden et Boulder, $\hat{D}_{1m}$ et $\hat{D}_{10m}$ sont les dimensions fractales estimées en utilisant les données d'1 minute et de 10 minutes respectivement. La figure (II-11) montre qu'il y a concordance entre l'allure des signaux et la dimension fractale estimée qui leur correspond. Elle montre également que les dimensions fractales $\hat{D}_{1m}$ et $\hat{D}_{10m}$ sont très proches. Ce rapprochement montre que notre méthode du "Recouvrement rectangulaire" ne nécessite pas un nombre élevé de données. Ceci est très important en pratique où les données d'éclairement solaire mesurées à l'échelle de la minute sont rarement disponibles.

Les dimensions fractales obtenues pour l'ensemble des journées de chaque site étudié sont représentées dans la figure (II-12) où $\hat{D}$ désigne $\hat{D}_{1m}$ pour Golden et Boulder. Le tableau (II-3) regroupe les dimensions fractales minimales et maximales de chaque site.

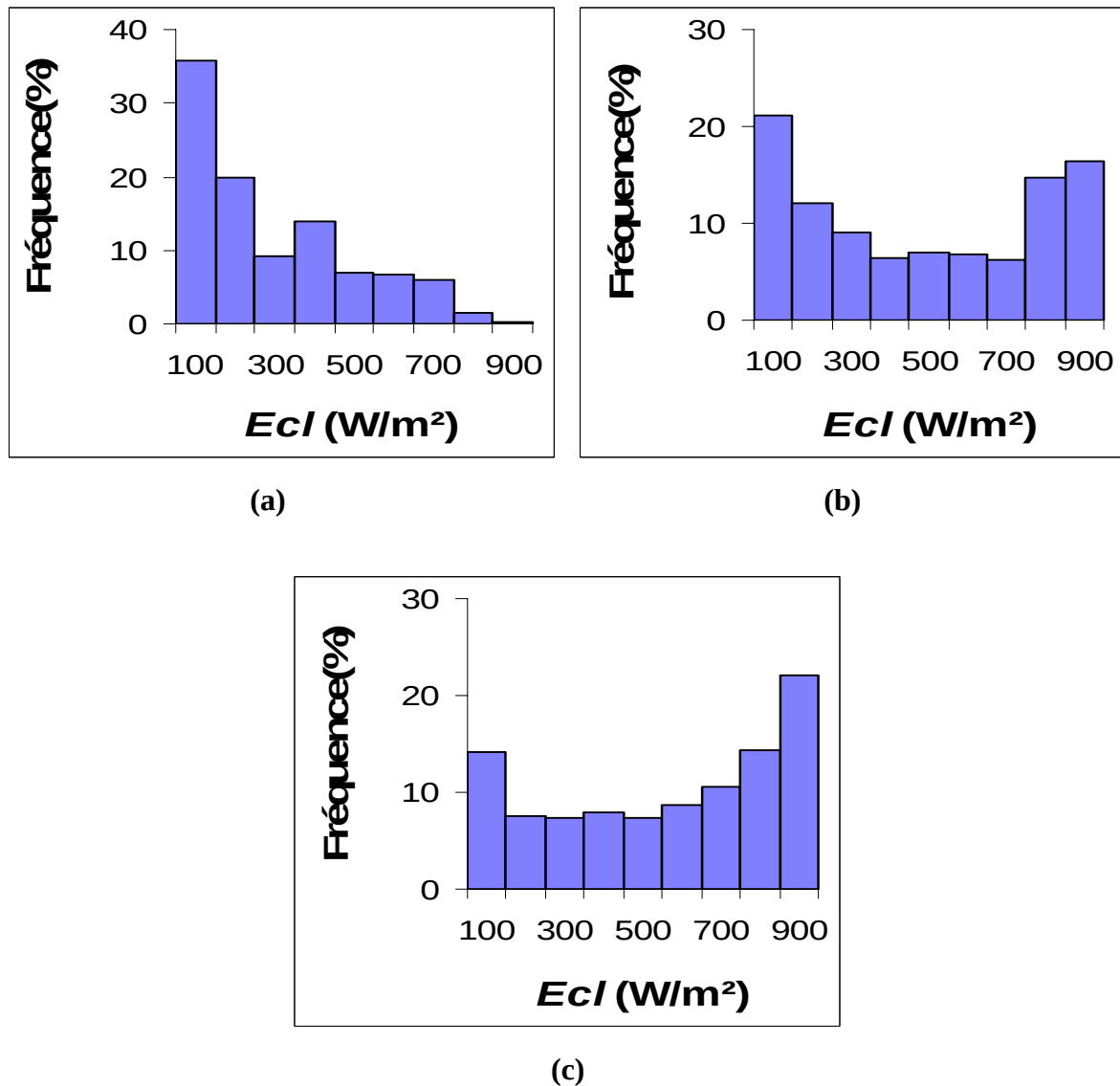


Figure II-5. Exemples d'histogrammes des éclairements de Tahifet

a) Journée du 20 Mars 1992

b) Journée du 28 Novembre 1992

c) Journée du 20 Juin 1992

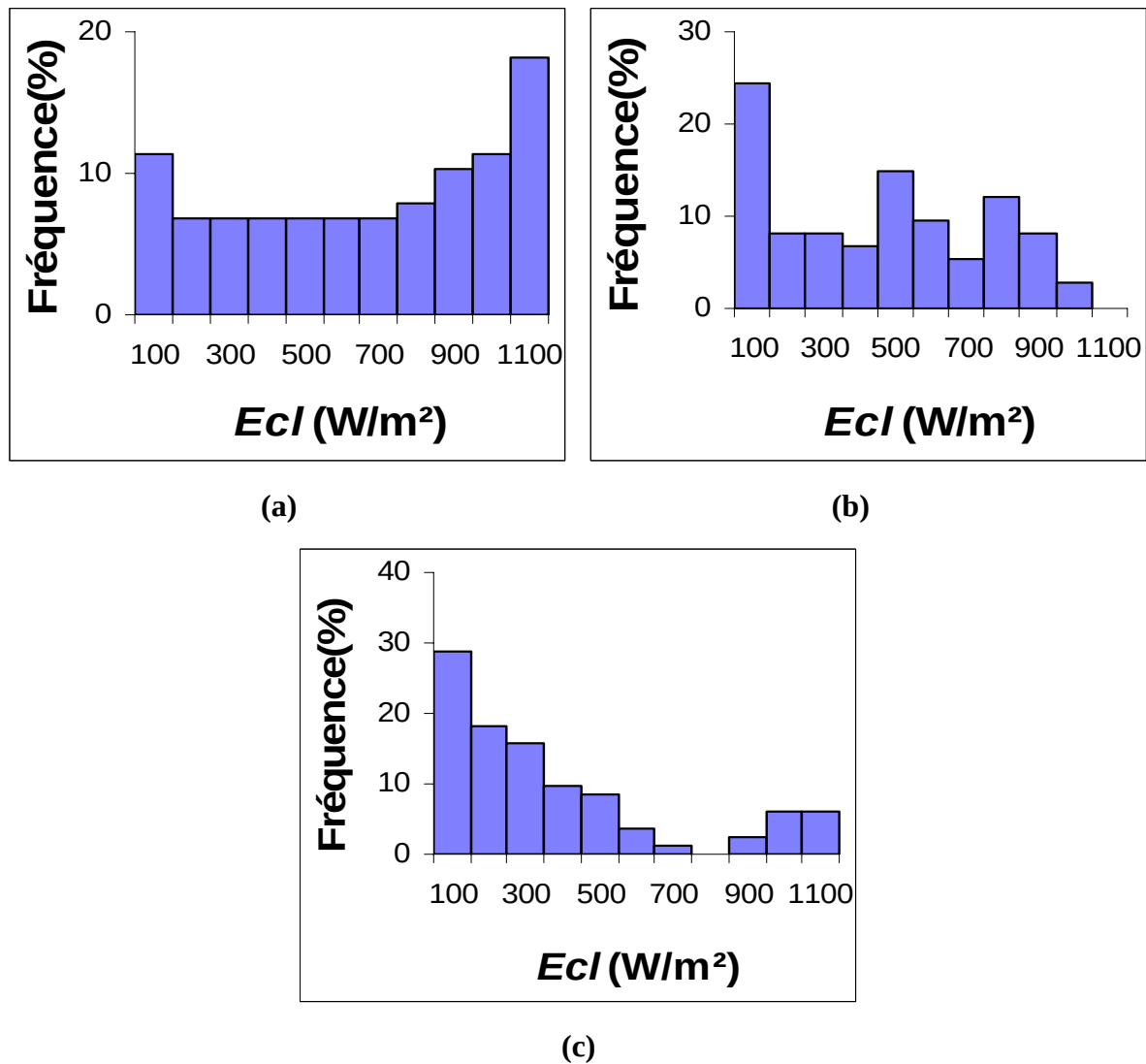


Figure II-6. Exemples d'histogrammes des éclairements de Golden

a) Journée du 09 Juillet 2003

b) Journée du 19 Mars 2003

c) Journée du 07 Mai 2003

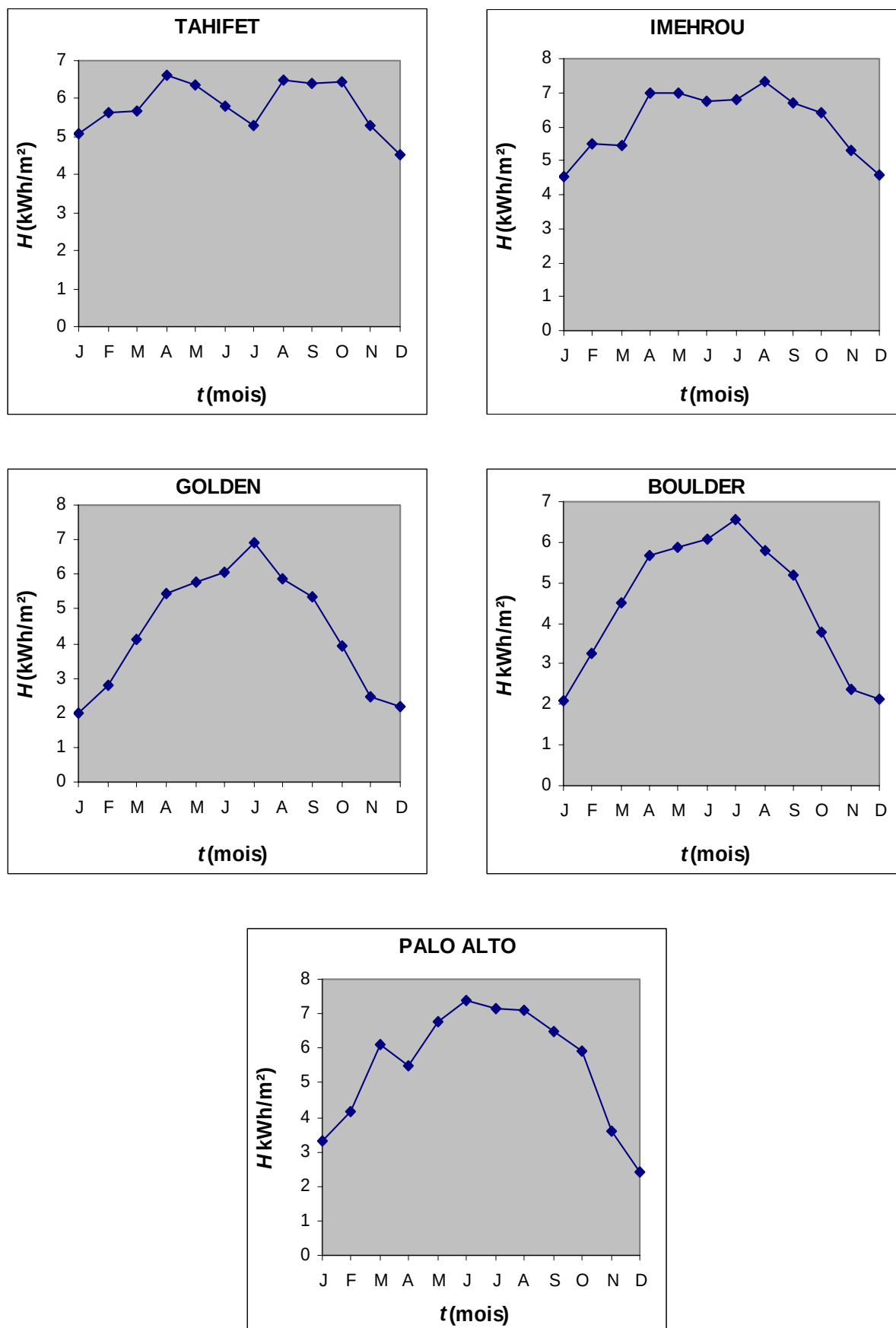


Figure II-7. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière des sites étudiés

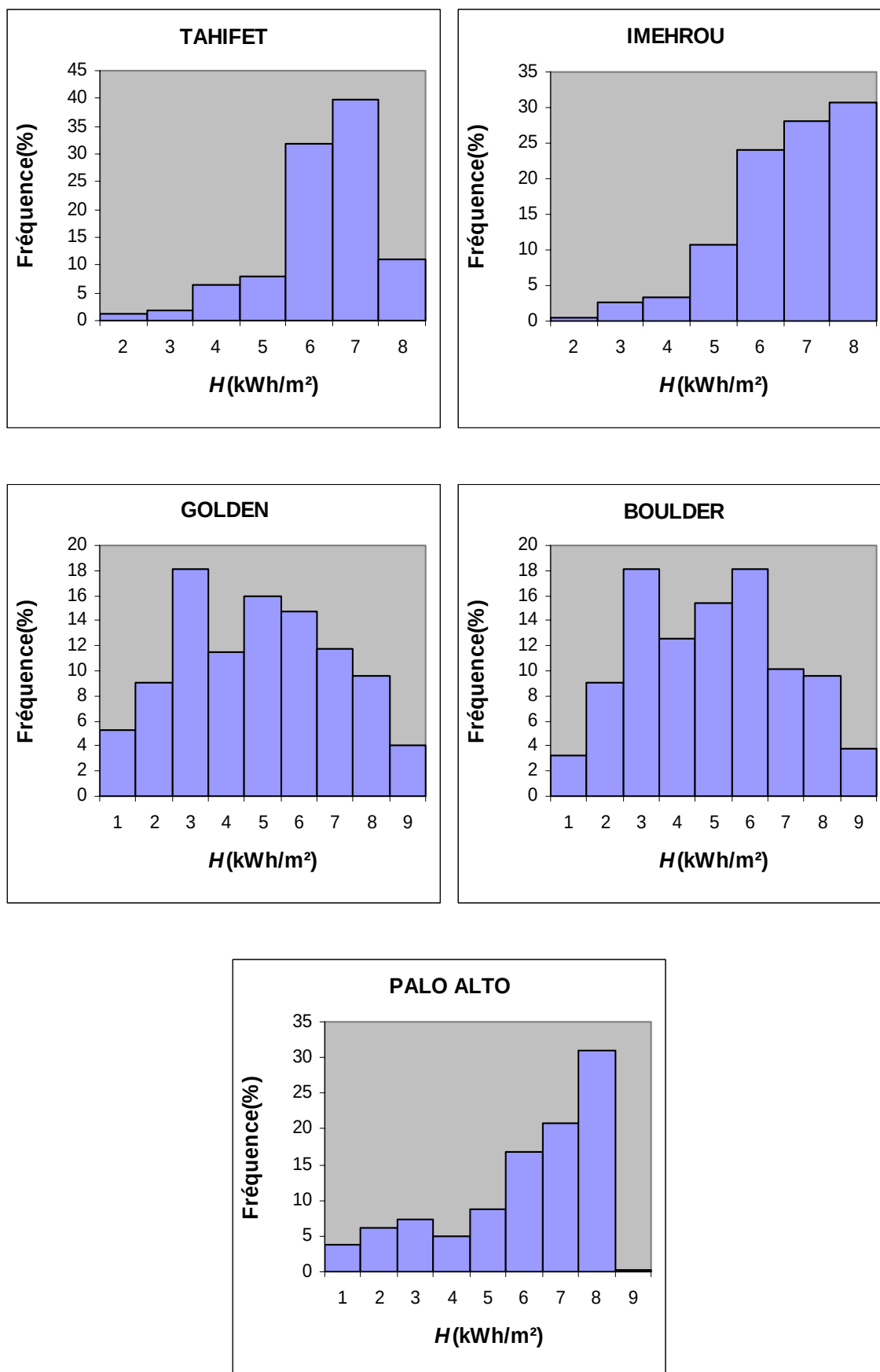


Figure II-8. Histogrammes annuels de l'irradiation journalière des sites étudiés

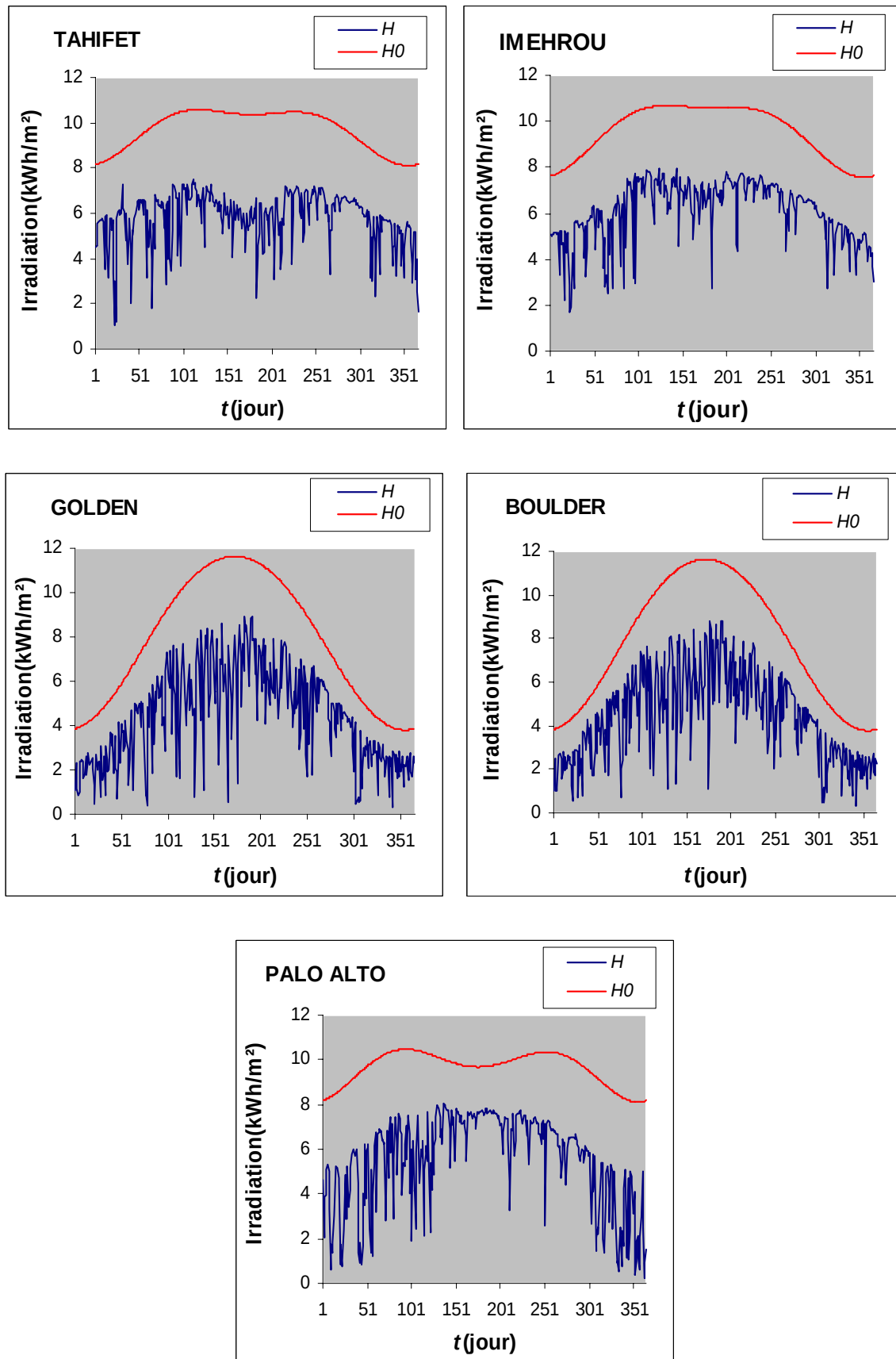


Figure II-9. Evolution annuelle de l'irradiation journalière H et de l'irradiation journalière hors atmosphère H_0 des sites étudiés

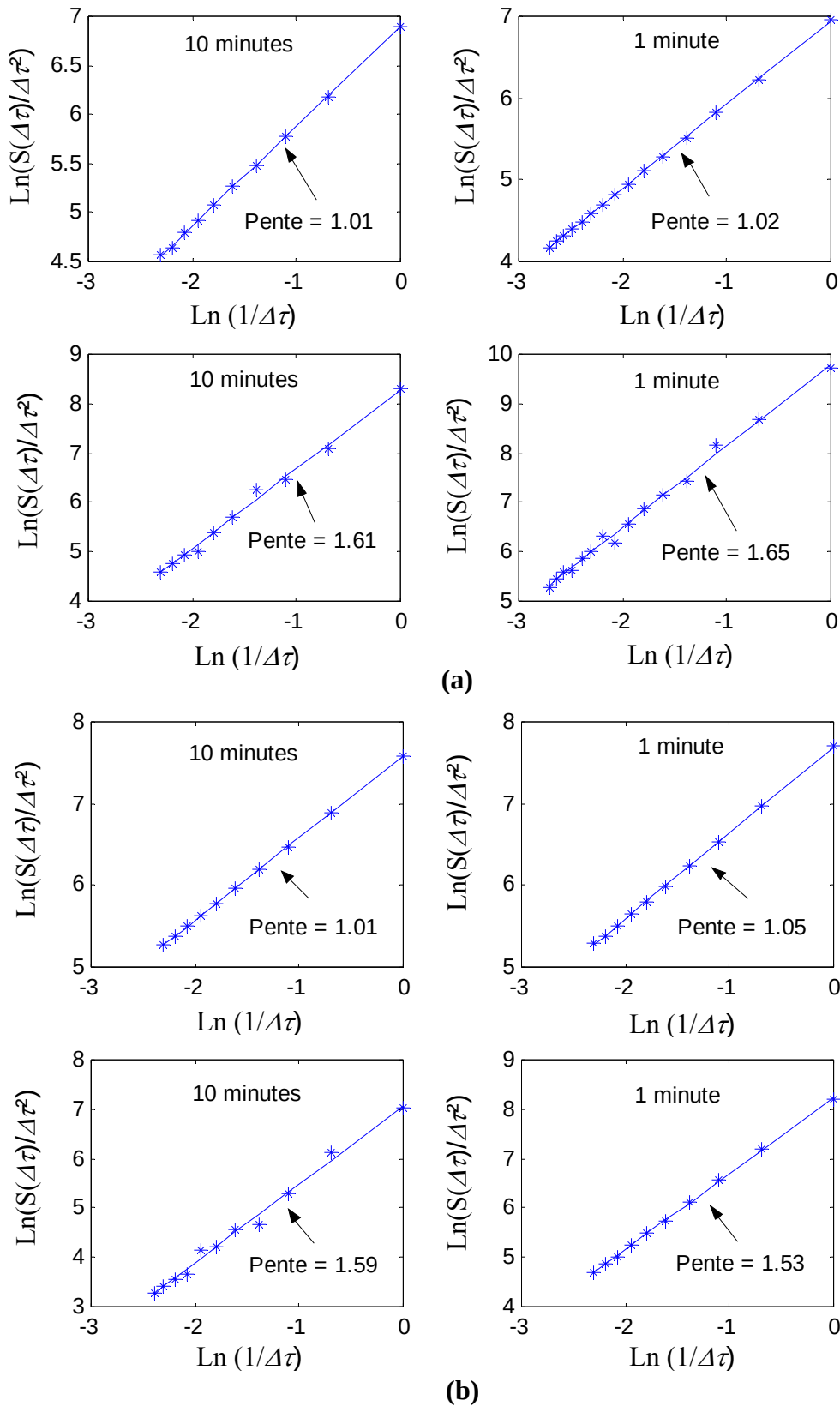


Figure II-10. Exemples de tracés log-log permettant l'estimation de $\hat{D}$ des signaux d'éclairements **a)** Golden **b)** Boulder

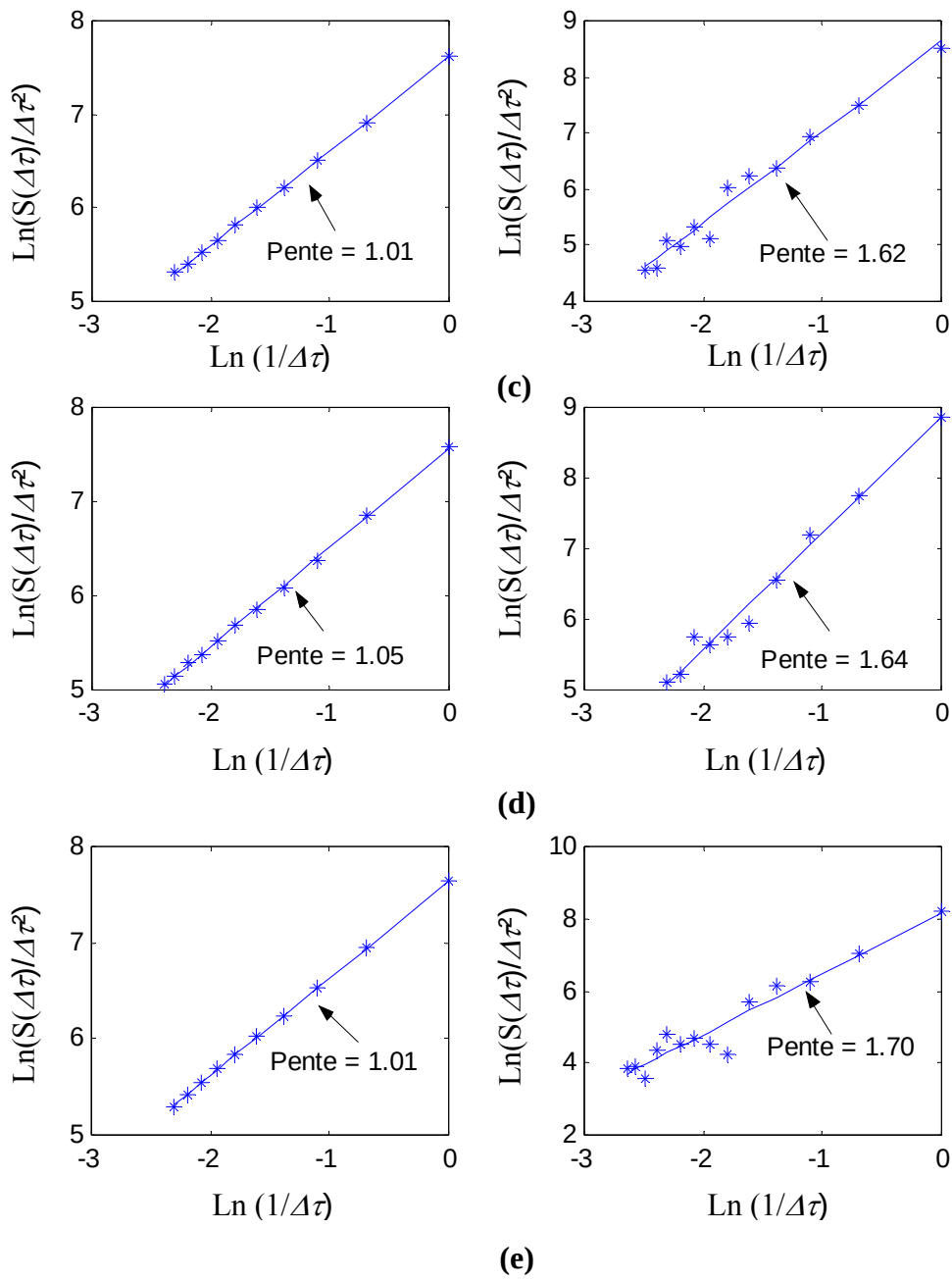


Figure II-10 (suite). Exemples de tracés log-log permettant l'estimation de $\hat{D}$ des signaux d'éclairements c) Tahifet d) Imehrou e) Palo Alto

Site	$\hat{D}_{min}$	$\hat{D}_{max}$
TAHIFET	1.00	1.79
IMEHROU	1.00	1.64
GOLDEN	1.00	1.78
BOULDER	1.01	1.87
PALO ALTO	1.00	1.84

Tableau II-3. Dimensions fractales minimales et maximales des sites étudiés

Nous remarquons que $\hat{D}$ varie de 1.00 à 1.87 traduisant ainsi l'existence de signaux d'éclairements journaliers réguliers et fluctuants.

Une analyse statistique sommaire de $\hat{D}$ permet d'observer son évolution moyenne au cours de l'année et de comparer les différents sites. En effet, la figure (II-13) donne l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle de $\hat{D}$ pour les sites étudiés.

Cette figure montre clairement que $\hat{D}$ fluctue. Afin de quantifier cette fluctuation nous avons calculé la moyenne annuelle $\langle \hat{D} \rangle$ de la dimension fractale et l'écart type correspondant σ , ces paramètres sont regroupés dans le tableau (II-4).

Site	$\langle \hat{D} \rangle$	σ (%)
TAHIFET	1.16	19
IMEHROU	1.13	17
GOLDEN	1.38	18
BOULDER	1.39	18
PALO ALTO	1.23	20

Tableau II-4. Moyennes annuelles $\langle \hat{D} \rangle$ et écarts types σ de la dimension fractale.

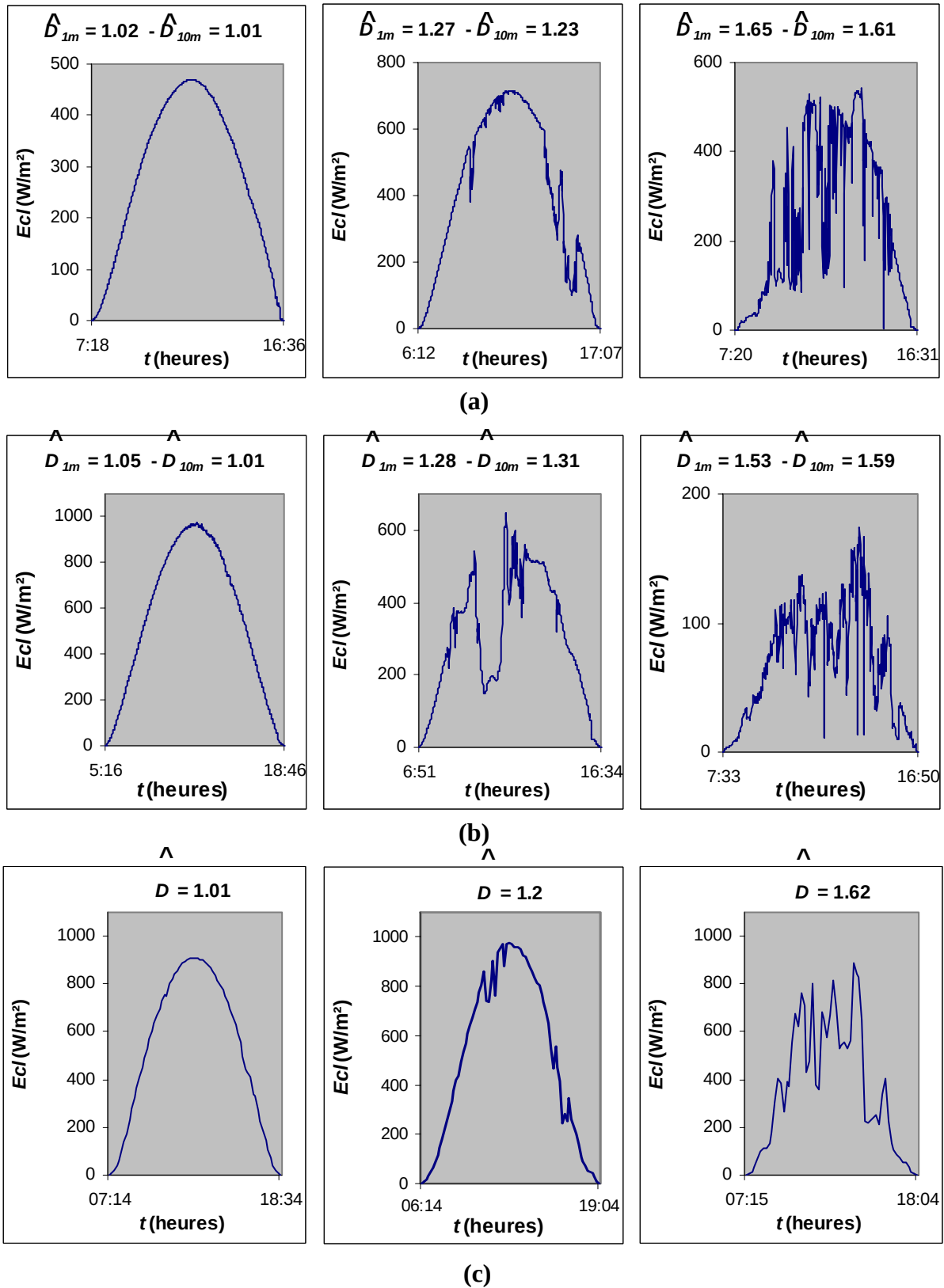


Figure II-11. Différents signaux d'éclairement avec leurs dimensions fractales
a) Golden, à gauche: 12 Janvier 2003, au centre: 19 Octobre 2003, à droite: 21 Décembre 2003
b) Boulder, à gauche: 15 Août 2003, au centre: 19 Novembre 2003, à droite: 22 Janvier 2003
c) Tahifet, à gauche: 05 Février 1992, au centre: 16 Avril 1992, à droite: 29 Décembre 1992

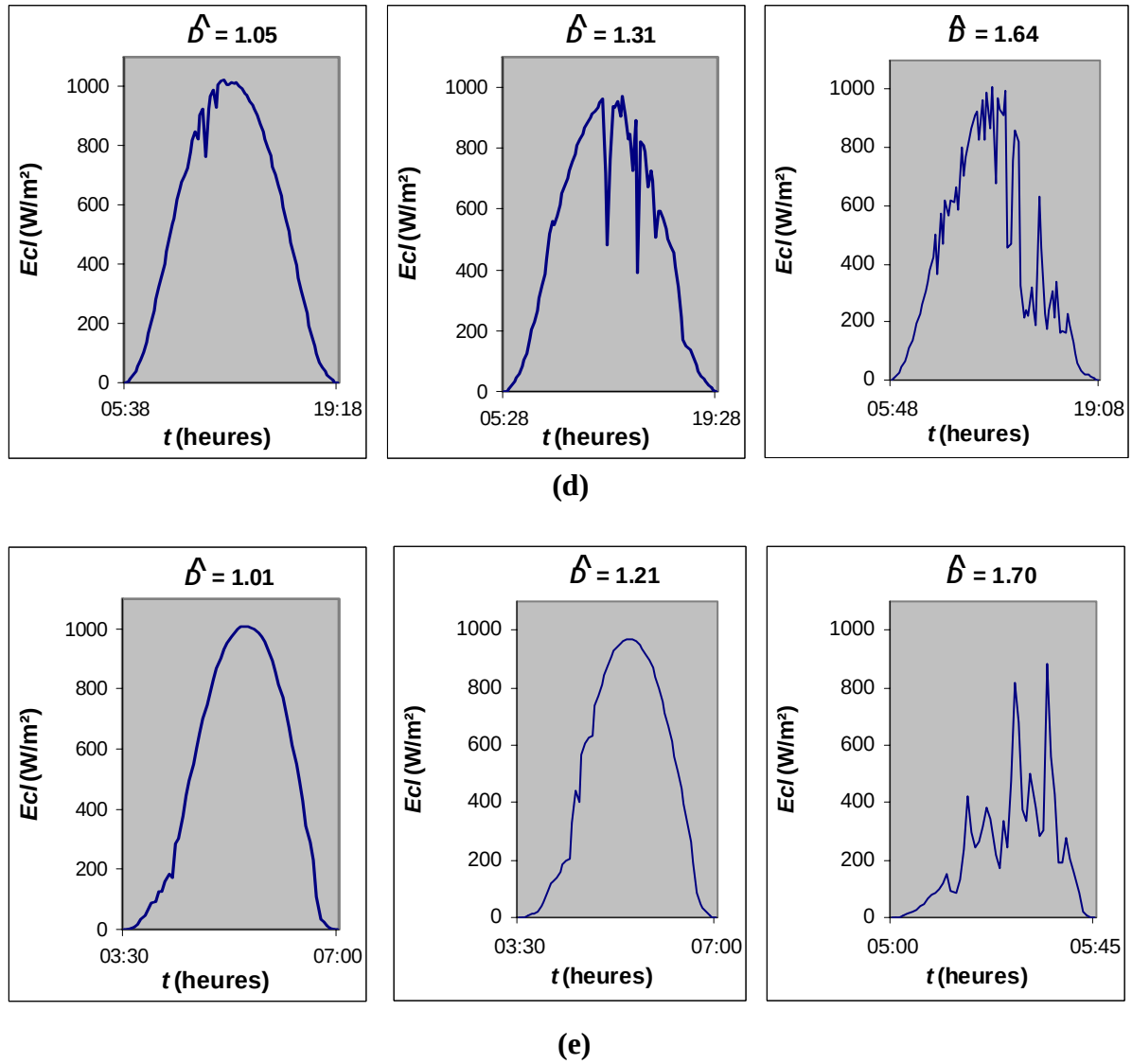


Figure II-11 (suite). Différents signaux d'éclairement avec leurs dimensions fractales
d) Imehrou, à gauche: 06 Mai 1992, au centre: 12 Juillet 1992, à droite: 27 Avril 1992
e) Palo Alto, à gauche: 31 Mai 2003, au centre: 13 Juin 2003, à droite: 22 Mars 2003

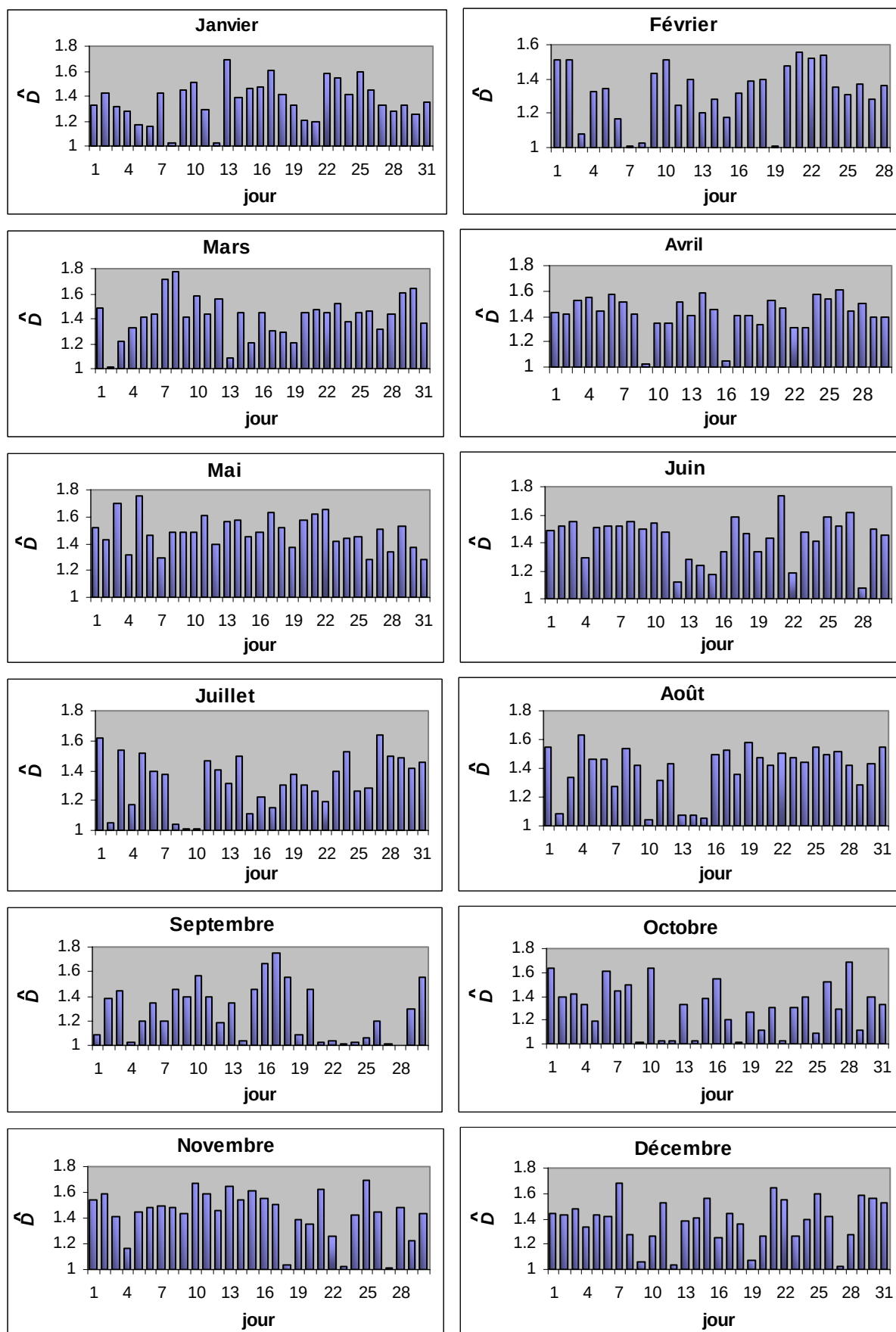


Figure II-12.a. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Golden

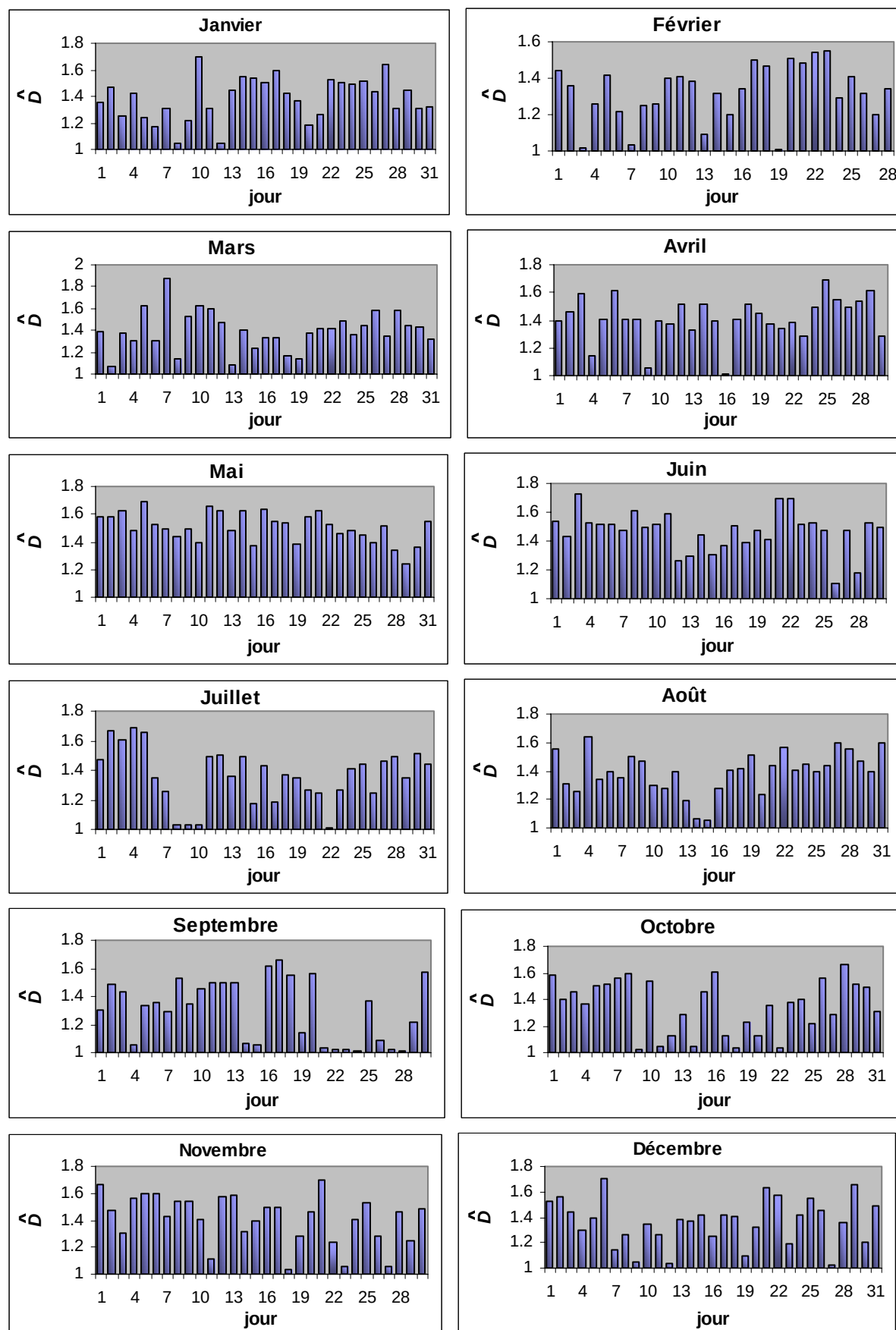


Figure II-12.b. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Boulder

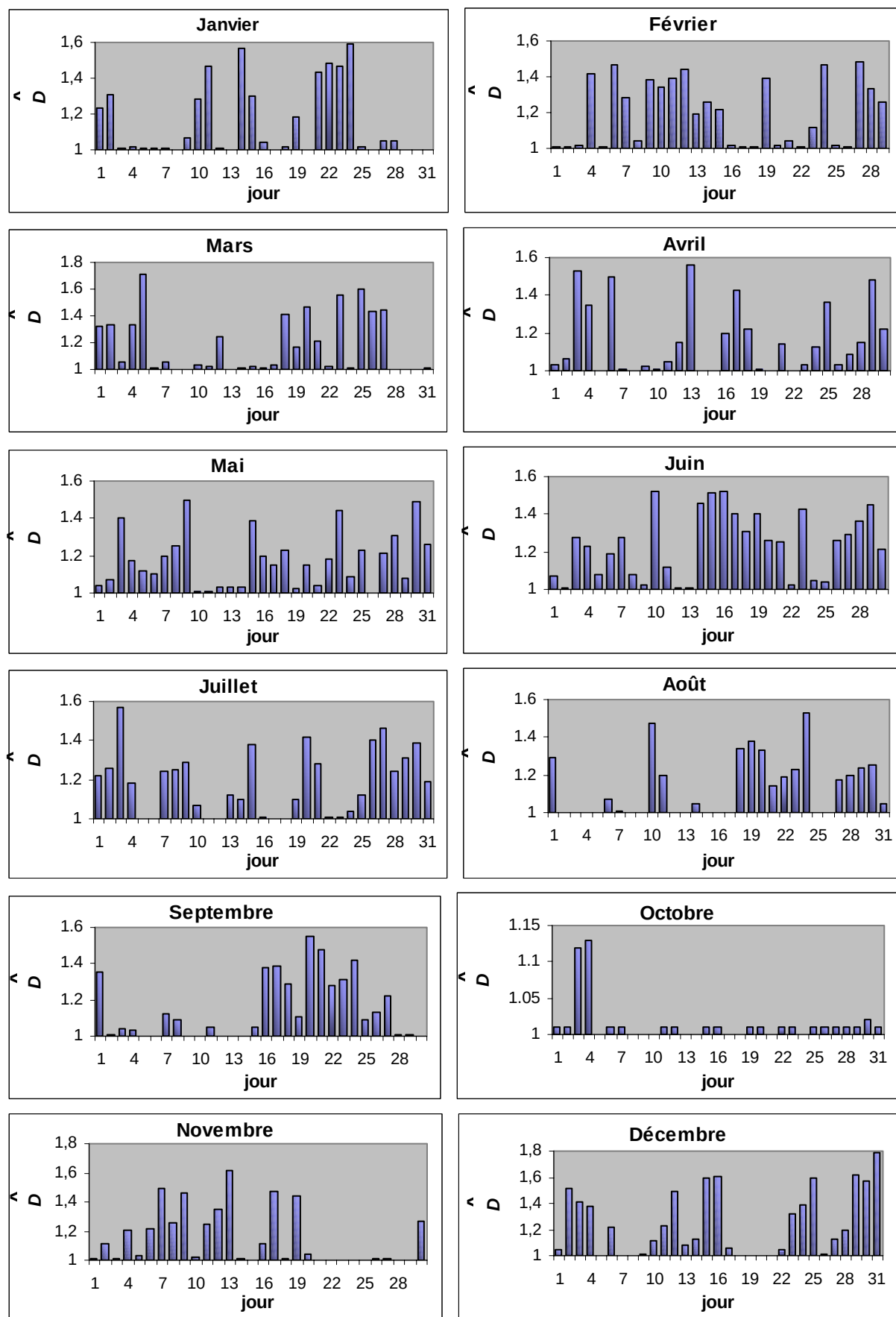
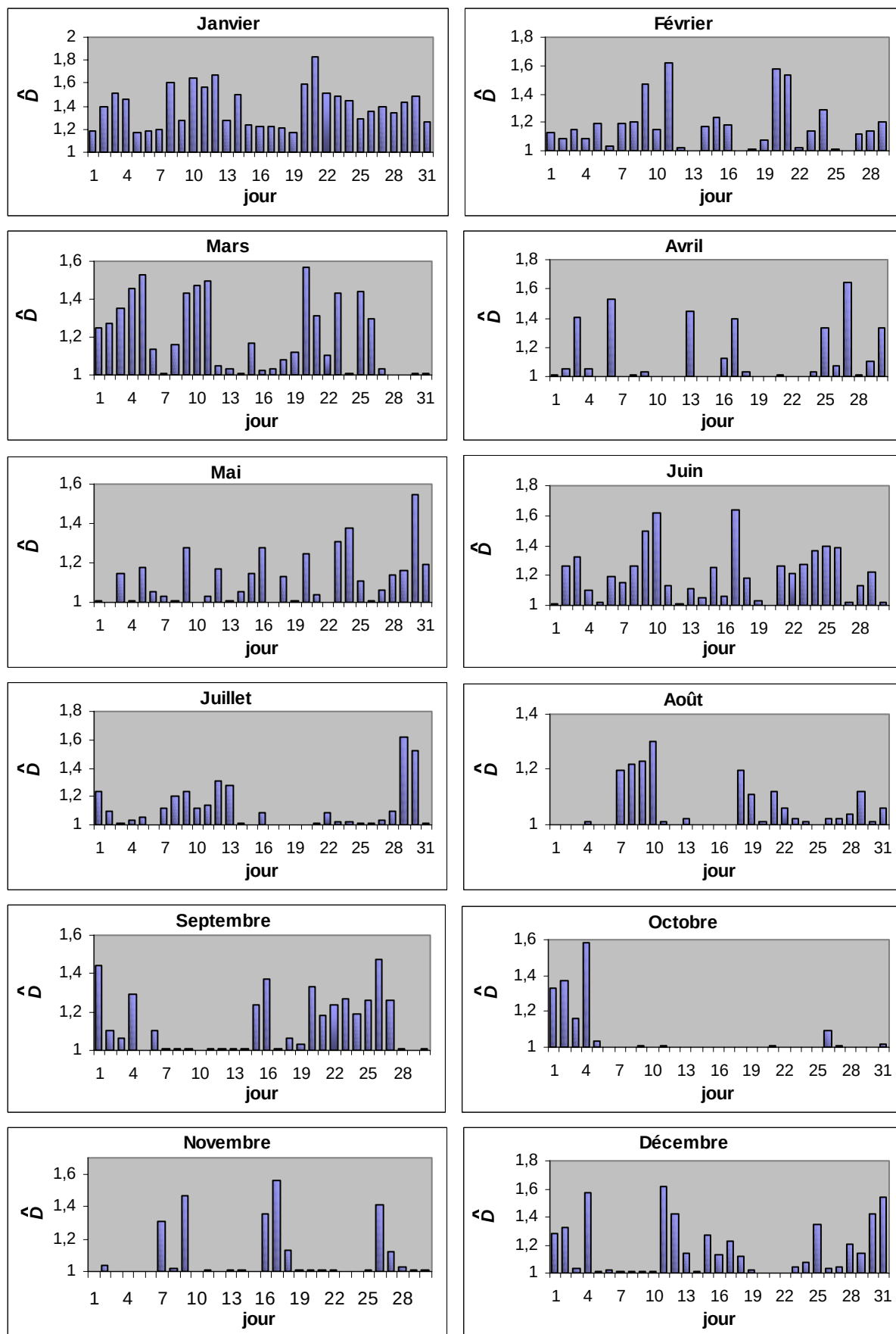


Figure II-12.c. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Tahifet



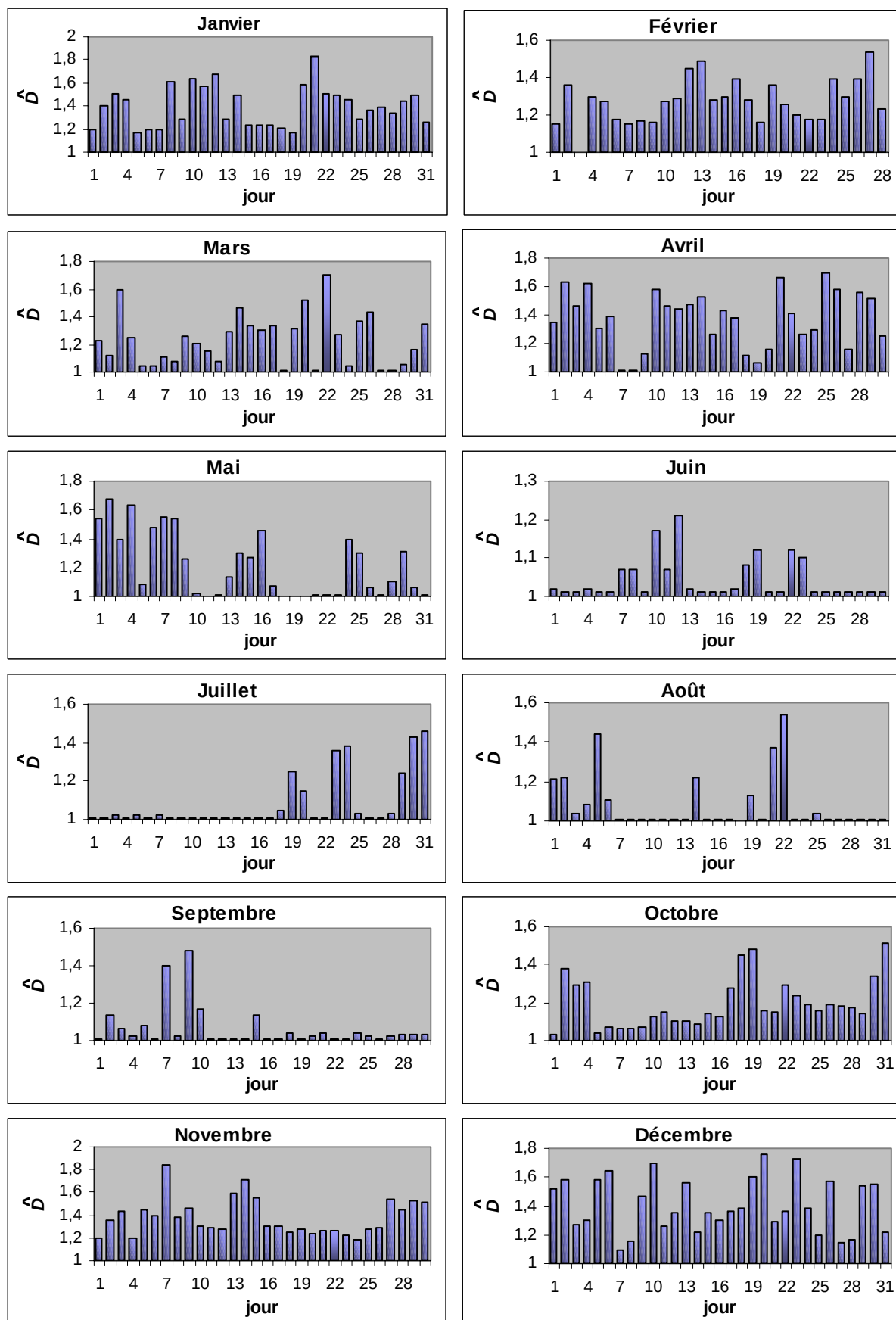


Figure II-12.e. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Palo Alto

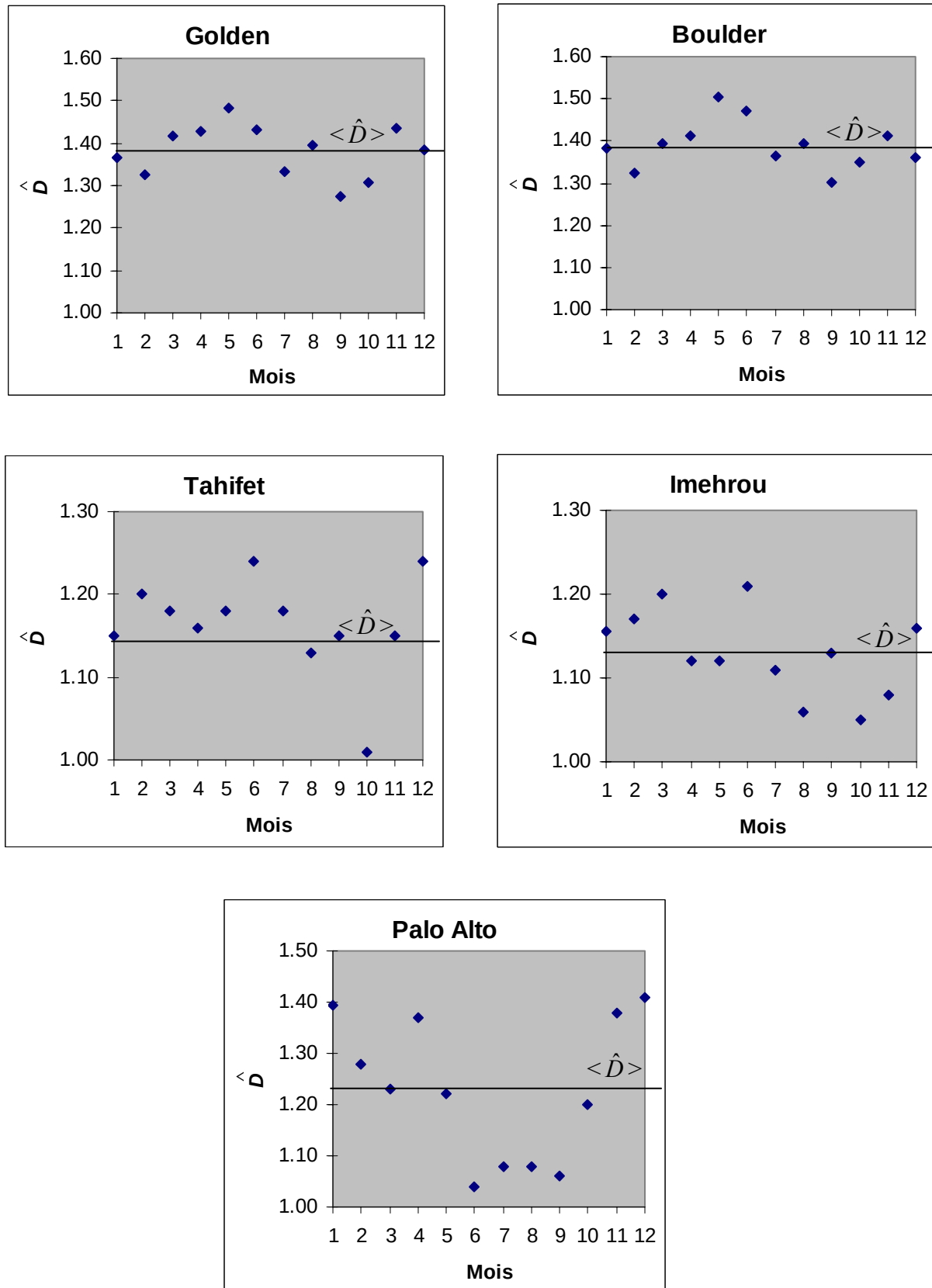


Figure II-13. Variation annuelle de la moyenne mensuelle de la dimension fractale estimée $\hat{D}$, la ligne droite représente la moyenne annuelle de la dimension fractale $\langle \hat{D} \rangle$

Ces valeurs nous permettent de dire que les éclairements solaires de Tahifet et d'Imehrou subissent les mêmes fluctuations ($\langle \hat{D} \rangle = 1.16$ pour Tahifet et 1.13 pour Imehrou). Même constatation pour Golden et Boulder ($\langle \hat{D} \rangle = 1.38$ pour Golden et 1.39 pour Boulder). Pour comparer le degré de fluctuation des éclairements solaires des différents sites on peut se référer aux valeurs de $\langle \hat{D} \rangle$, ces dernières nous permettent de conclure que les deux sites de Colorado (Golden et Boulder) sont les plus fluctuant, par contre ceux du sud algérien (Tahifet et Imehrou) fluctuent faiblement, ils sont pratiquement réguliers, à Palo Alto en outre les éclairements sont moyennement fluctuants.

Cependant, l'analyse de $\hat{D}$ mois par mois permet de détecter les mois où les fluctuations de l'éclairement sont les plus intenses -Juin et Décembre pour Tahifet, Mars et Juin pour Imehrou, Mai et Juin pour Golden et Boulder, Janvier et Décembre pour Palo Alto- et ceux où ces éclairements sont très réguliers -Octobre pour les deux sites Tahifet et Imehrou, Septembre pour Golden et Boulder, Juin pour Palo Alto-. Ces informations combinées aux moyennes mensuelles de K_T permettent d'affiner le dimensionnement des systèmes photovoltaïques. En effet, les anomalies dans le fonctionnement des systèmes photovoltaïques installés dans ces sites apparaissent au cours de ces mois. Il y a par exemple pour Tahifet excès d'énergie en Octobre et le stockage est sollicité beaucoup plus en Juin et Décembre comme il le sera montré dans le chapitre 3.

III.2.4. Mise en œuvre de la classification

La méthode de classification que nous avons élaborée a été appliquée aux éclairements solaires de notre banque de donnée. Pour cela, nous avons d'abord procédé à la détermination des seuils de la dimension fractale. A cet effet, les deux méthodes empiriques et statistiques ont été utilisées pour les sites de Tahifet et Imehrou, le tableau (II-5) regroupe les seuils obtenus avec les deux méthodes.

Nous remarquons que les seuils empiriques et statistiques sont très proches puisque l'écart maximum observé est de 9%. Vue que l'approche empirique est très fastidieuse et demande plus de temps puisqu'il faut construire des histogrammes et procéder à leur examen minutieux, nous avons opté pour les seuils statistiques pour classer les journées de l'année de l'ensemble des sites étudiés. Les seuils obtenus sont donnés dans le tableau (II-6).

Site	Tahifet		Imehrou	
	$\hat{D}_1$	$\hat{D}_2$	$\hat{D}_1$	$\hat{D}_2$
Méthode de FDC	1.14	1.34	1.12	1.27
Méthode empirique	1.10	1.25	1.10	1.25

Tableau II-5. Seuils de la dimension fractale des sites de Tahifet et Imehrou obtenus avec les 2 méthodes : la méthode FDC et la méthode empirique

Site	Golden	Boulder	Tahifet	Imehrou	Palo Alto
$\hat{D}_1$	1.35	1.35	1.14	1.12	1.19
$\hat{D}_2$	1.49	1.50	1.34	1.27	1.37

Tableau II-6. Seuils de la dimension fractale des sites étudiés obtenus avec la méthode FDC

Dans la figure (II-14), nous avons représenté des exemples de journées appartenant à chaque classe et ceci pour chaque site.

Afin d'analyser les résultats de notre classification, les fréquences des trois classes obtenues ont été calculées. Le tableau (II-7) donne la répartition des classes pour l'année.

Site	Classe 1(%)	Classe 2(%)	Classe 3(%)
Golden	24.38	22.19	53.42
Boulder	25.75	21.92	52.33
Tahifet	57.92	15.85	26.23
Imehrou	62.30	16.39	21.31
Palo Alto	48.90	17.31	33.79

Tableau II-7. Pourcentage des journées constituant chaque classe

Ainsi, la classe 3 (journées fortement perturbées) est prépondérante pour les deux sites de Colorado (53.4 % pour Golden et 52.3 % pour Boulder), les classes 1 et 2 ont par contre des fréquences d'apparition moins importantes. Ces résultats montrent que ces deux sites sont caractérisés par un climat perturbé puisque les journées fortement perturbées sont prépondérantes. Nous remarquons que ces résultats ne sont pas en bon accord avec ceux déduits à partir de l'analyse statistique de $\hat{D}$ (paragraphe III.2.3), puisque l'éclairement à Golden se présente comme étant le plus perturbé, 75.61% de journées partiellement ou totalement couvertes contre 74.25% pour Boulder alors que la moyenne mensuelle de la dimension fractale a été trouvée 1.38 pour Golden et 1.39 pour Boulder. Ceci est dû à l'introduction de l'indice de clarté comme un deuxième critère de classification.

Pour les deux sites du sud algérien la classe 1 est prépondérante (57.92 % pour Tahifet et 62.30 % pour Imehrou), la classe 2 est la même pour les deux sites alors que la classe 3 est plus importante pour Tahifet. Ceci traduit la prééminence des journées à ciel clair dans les deux sites. Les journées faiblement et fortement perturbées par ailleurs ont des fréquences de se produire plus faibles.

A Palo Alto par contre, nous remarquons que les classes 1 et 3 sont prédominantes quoi que la classe 1 est plus importante (48.9% des journées de la classe 1 contre 33.79% de celles de la classe 3). Ces résultats montrent que le site de Palo Alto est caractérisé par un climat moyennement perturbé.

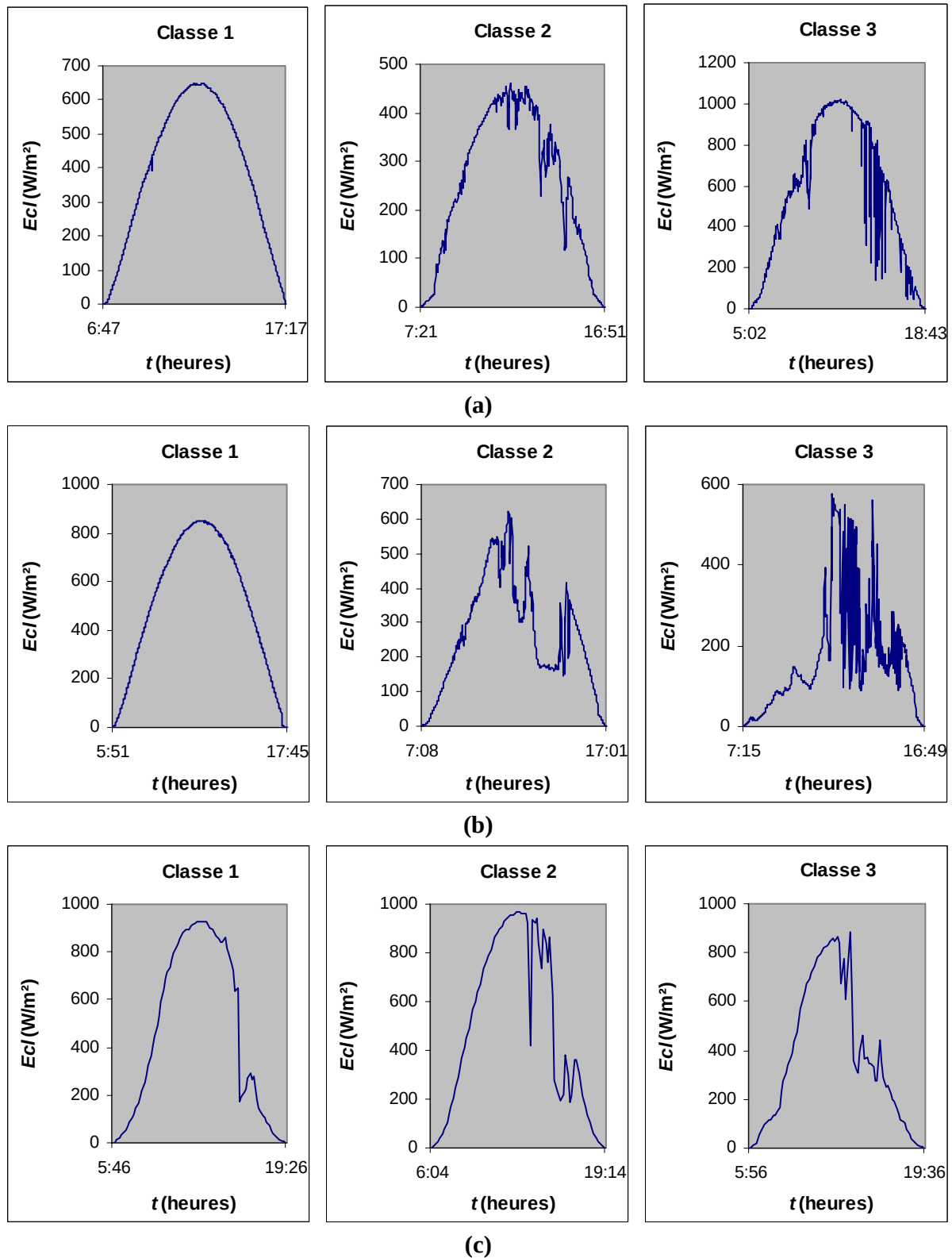
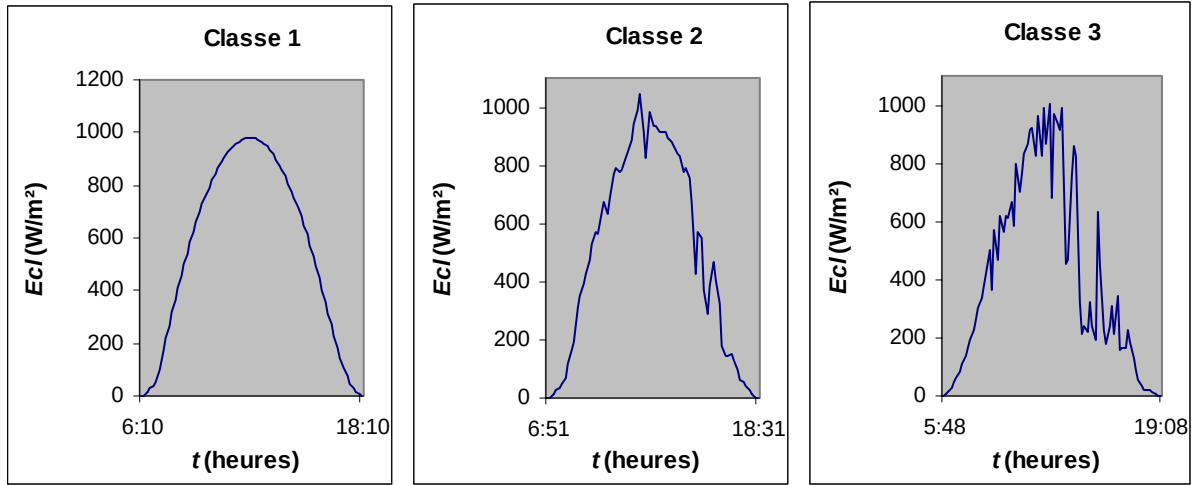


Figure II-14. Exemples de signaux d'éclairement appartenant aux 3 classes obtenues

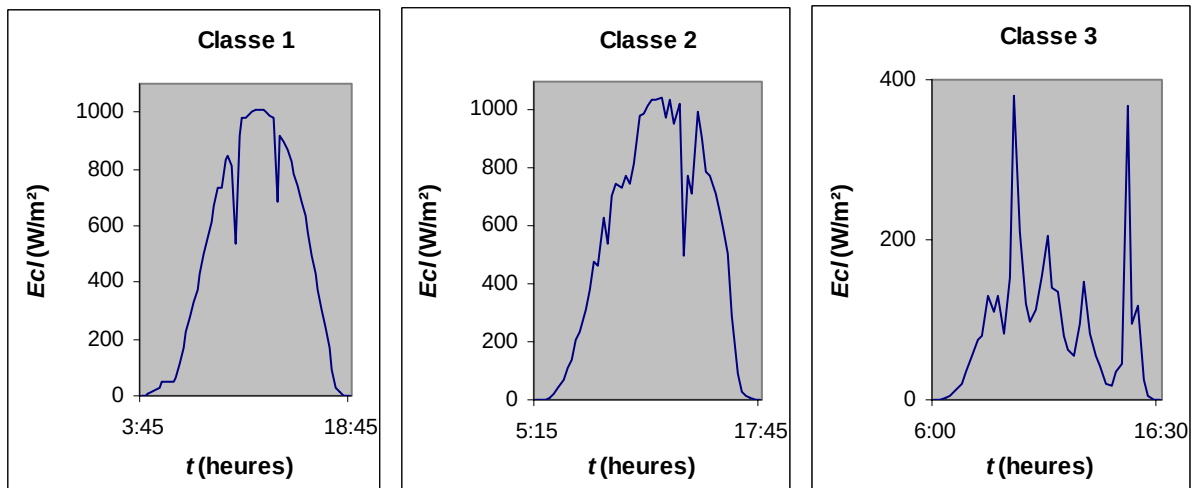
a) Golden, à gauche: 19 Février, $\hat{D}=1.01$, au centre: 14 Janvier, $\hat{D}=1.39$, à droite: 26 Avril, $\hat{D}=1.61$

b) Boulder, à gauche: 21 Septembre, $\hat{D}=1.03$, au centre: 19 Janvier, $\hat{D}=1.36$, à droite: 10 Janvier, $\hat{D}=1.70$

c) Tahifet, à gauche: 29 Mai, $\hat{D}=1.08$, au centre: 30 Avril, $\hat{D}=1.22$, à droite: 04 Juillet, $\hat{D}=1.18$



(d)



(e)

Figure II-14 (suite). Exemples de signaux d'éclairement appartenant aux 3 classes obtenues

d) Imehrou, à gauche: 10 Octobre, $\hat{D}=1.00$, au centre: 16 Février, $\hat{D}=1.18$, à droite: 27 Avril, $\hat{D}=1.64$

e) Palo Alto, à gauche: 13 Mai, $\hat{D}=1.13$, au centre: 04 Mars, $\hat{D}=1.25$, à droite: 20 décembre, $\hat{D}=1.76$

Afin de mieux caractériser les trois classes obtenues nous avons poussé notre analyse statistique à l'échelle mensuelle. Dans les tableaux (II-8) et (II-9) nous avons reporté les résultats mensuels concernant la fréquence de chaque classe, les moyennes et les écart-types des deux paramètres : $\hat{D}$ et K_T et ceci pour chaque site étudié. Ces tableaux montrent que la répartition des classes diffère d'un site à un autre.

Pour Golden et Colorado la classe 3 présente des fréquences d'apparition élevées pour la plus part des mois, elles atteignent le maximum en Mai et Juin (77.4-70% à Golden et 80.6-63.3% à Boulder), ces fréquences régressent cependant en Septembre où la classe 1 est prépondérante (50% à Golden et 46.7% à Boulder), même constatation pour le mois d'Octobre à Golden et le mois de Février à Boulder où la classe 1 représente 51.6% et 39.3% respectivement.

A Tahifet et Imehrou, la classe 1 présente des fréquences élevées pour tous les mois, ces fréquences atteignent le maximum en Octobre (100% à Tahifet et 87.1% à Imehrou) et le minimum en Mai-Juin (36.7-41.9% à Tahifet et 36.7-51.6% à Imehrou).

A Palo Alto en revanche nous remarquons une répartition saisonnière des journées. En effet, la classe 1 présente de fortes valeurs en hiver (Janvier, Février, Novembre et Décembre) où le maximum est détecté en Décembre (77.4%) et la classe 3 de fortes valeurs en été (Juin - Septembre) où elle atteignent 96.7% en Juin.

Nous remarquons que ces résultats globalement sont en bon accord avec ceux déduits à partir de l'analyse statistique de $\hat{D}$ (paragraphe III.2.3), les légères différences dans les mois où l'intensité de fluctuation des éclairements solaires atteint le maximum et le minimum sont dues à l'introduction de l'indice de clarté comme un deuxième critère de classification.

D'autre part et afin de valider la classification établie, nous avons calculé pour chaque classe les moyennes $\langle \hat{D} \rangle$ et $\langle K_T \rangle$ et les écart-types $\sigma(\hat{D})$ et $\sigma(K_T)$ sur l'ensemble de l'année étudiée, ces paramètres sont résumés par le tableau (II-10).

	Site	Golden			Boulder			Tahifet			Imehrou			Palo Alto		
	Classe	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Janvier																
	Freq.(%)	19.4	25.8	54.8	19.4	22.6	58.0	64.5	12.9	22.6	58.1	12.9	29.0	12.9	22.6	64.5
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.20	1.44	1.39	1.16	1.45	1.43	1.02	1.25	1.47	1.02	1.17	1.42	1.18	1.25	1.49
	$\sigma(\hat{D})$	0.15	0.03	0.16	0.10	0.05	0.14	0.23	0.06	0.10	0.03	0.02	0.12	0.01	0.05	0.14
	$\langle K_T \rangle$	0.60	0.58	0.36	0.65	0.62	0.40	0.69	0.60	0.34	0.66	0.60	0.39	0.59	0.59	0.28
	$\sigma(K_T)$	0.05	0.05	0.14	0.07	0.04	0.16	0.15	0.05	0.15	0.03	0.05	0.15	0.06	0.03	0.13
Février																
	Freq.(%)	21.4	14.3	64.3	39.3	25.0	35.7	48.3	17.2	34.5	44.8	34.5	24.1	25.9	25.9	48.1
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.13	1.43	1.37	1.21	1.43	1.37	1.03	1.26	1.40	1.04	1.17	1.41	1.16	1.27	1.35
	$\sigma(\hat{D})$	0.16	0.04	0.13	0.13	0.04	0.16	0.23	0.05	0.07	0.04	0.03	0.19	0.01	0.05	0.10
	$\langle K_T \rangle$	0.66	0.65	0.41	0.68	0.66	0.42	0.69	0.62	0.49	0.66	0.64	0.52	0.63	0.60	0.25
	$\sigma(K_T)$	0.07	0.06	0.14	0.12	0.11	0.18	0.15	0.02	0.13	0.03	0.05	0.09	0.03	0.05	0.14
Mars																
	Freq.(%)	12.9	35.5	51.6	19.4	29.0	51.6	54.8	12.9	32.3	45.2	12.9	41.9	45.2	32.3	22.6
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.13	1.43	1.48	1.19	1.42	1.45	1.01	1.24	1.43	1.04	1.19	1.39	1.07	1.29	1.47
	$\sigma(\hat{D})$	0.10	0.03	0.16	0.11	0.04	0.19	0.01	0.07	0.18	0.04	0.06	0.15	0.05	0.06	0.15
	$\langle K_T \rangle$	0.69	0.66	0.43	0.72	0.70	0.50	0.65	0.61	0.39	0.67	0.57	0.41	0.68	0.62	0.38
	$\sigma(K_T)$	0.02	0.04	0.23	0.09	0.08	0.21	0.04	0.03	0.11	0.04	0.04	0.12	0.04	0.04	0.12
Avril																
	Freq.(%)	13.3	30.0	56.7	16.7	30.0	53.3	60.0	16.7	23.3	76.7	0.00	23.3	20.0	13.3	66.7
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.19	1.42	1.48	1.17	1.41	1.49	1.03	1.19	1.46	1.02		1.44	1.08	1.28	1.48
	$\sigma(\hat{D})$	0.18	0.02	0.10	0.15	0.04	0.11	0.04	0.04	0.08	0.03		0.11	0.06	0.02	0.14
	$\langle K_T \rangle$	0.76	0.64	0.49	0.74	0.66	0.51	0.67	0.63	0.51	0.70		0.53	0.68	0.65	0.46
	$\sigma(K_T)$	0.07	0.08	0.19	0.10	0.09	0.18	0.03	0.01	0.10	0.04		0.17	0.07	0.09	0.13
Mai																
	Freq.(%)	3.23	19.3	77.4	6.50	12.9	80.6	41.9	38.7	19.4	51.6	29.0	19.4	54.8	16.1	29.0
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.34	1.43	1.50	1.29	1.42	1.54	1.04	1.21	1.39	1.02	1.17	1.32	1.03	1.30	1.52
	$\sigma(\hat{D})$	0.00	0.04	0.13	0.07	0.06	0.09	0.04	0.05	0.15	0.02	0.04	0.14	0.04	0.02	0.10
	$\langle K_T \rangle$	0.73	0.66	0.49	0.68	0.67	0.50	0.65	0.60	0.53	0.68	0.64	0.60	0.76	0.65	0.52
	$\sigma(K_T)$	0.00	0.10	0.17	0.03	0.08	0.17	0.03	0.04	0.07	0.05	0.04	0.09	0.06	0.10	0.15
Juin																
	Freq.(%)	16.7	13.3	70.0	13.3	23.3	63.3	36.7	26.7	36.7	36.7	40.0	23.3	96.7	3.30	0.00
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.22	1.46	1.48	1.21	1.44	1.53	1.05	1.25	1.42	1.04	1.21	1.46	1.04	1.21	
	$\sigma(\hat{D})$	0.11	0.02	0.14	0.09	0.04	0.10	0.04	0.04	0.09	0.04	0.05	0.13	0.04	0.00	
	$\langle K_T \rangle$	0.60	0.59	0.49	0.65	0.61	0.47	0.59	0.57	0.52	0.68	0.63	0.57	0.77	0.56	
	$\sigma(K_T)$	0.08	0.06	0.20	0.10	0.09	0.16	0.03	0.05	0.07	0.02	0.04	0.06	0.03	0.00	

Tableau II-8. Caractéristiques mensuelles de chaque classe obtenue pour les différents sites (1^{er} semestre)

	Site	Golden			Boulder			Tahifet			Imehrou			Palo Alto		
	Classe	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Juillet																
	Freq.(%)	35.5	22.6	41.9	25.8	22.6	51.6	48.4	3.20	48.4	71.0	9.70	19.4	80.6	9.70	9.70
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.16	1.41	1.43	1.14	1.44	1.44	1.04	1.19	1.33	1.03	1.19	1.34	1.02	1.28	1.42
	$\sigma(\hat{D})$	0.12	0.04	0.16	0.13	0.06	0.11	0.05	0.00	0.11	0.04	0.05	0.19	0.03	0.07	0.04
	$\langle K_T \rangle$	0.69	0.61	0.54	0.67	0.62	0.51	0.60	0.52	0.42	0.69	0.64	0.48	0.77	0.66	0.49
	$\sigma(K_T)$	0.08	0.07	0.12	0.09	0.07	0.11	0.03	0.00	0.09	0.03	0.02	0.14	0.03	0.07	0.19
Août																
	Freq.(%)	22.6	29.0	48.4	29.0	22.6	48.4	58.1	29.0	12.9	83.9	12.9	3.20	80.6	12.9	6.50
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.13	1.45	1.49	1.23	1.43	1.48	1.02	1.25	1.40	1.02	1.21	1.30	1.02	1.26	1.49
	$\sigma(\hat{D})$	0.12	0.03	0.10	0.11	0.03	0.11	0.04	0.06	0.13	0.04	0.02	0.00	0.03	0.08	0.07
	$\langle K_T \rangle$	0.70	0.61	0.49	0.68	0.61	0.48	0.67	0.59	0.47	0.71	0.64	0.68	0.72	0.65	0.55
	$\sigma(K_T)$	0.07	0.08	0.11	0.08	0.06	0.11	0.02	0.05	0.09	0.02	0.03	0.00	0.03	0.08	0.04
Septembre																
	Freq.(%)	50.0	16.7	33.3	46.7	16.7	36.7	66.7	10.0	23.3	60.0	20.0	20.0	90.0	0.00	10.0
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.09	1.43	1.48	1.10	1.46	1.49	1.04	1.27	1.41	1.03	1.23	1.36	1.04		1.30
	$\sigma(\hat{D})$	0.09	0.04	0.17	0.11	0.06	0.12	0.05	0.05	0.09	0.03	0.03	0.08	0.04		0.25
	$\langle K_T \rangle$	0.74	0.68	0.20	0.74	0.65	0.47	0.67	0.57	0.55	0.70	0.63	0.58	0.65		0.45
	$\sigma(K_T)$	0.02	0.07		0.03	0.07	0.14	0.04	0.05	0.11	0.01	0.03	0.09	0.05		0.19
Octobre																
	Freq.(%)	51.6	9.70	38.7	38.7	16.1	45.2	100	0.00	0.00	87.1	3.20	9.70	67.7	19.4	12.9
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.15	1.41	1.50	1.14	1.42	1.50	1.01			1.01	1.16	1.43	1.12	1.29	1.46
	$\sigma(\hat{D})$	0.13	0.04	0.13	0.11	0.06	0.11	0.03			0.02	0.00	0.13	0.05	0.03	0.06
	$\langle K_T \rangle$	0.73	0.64	0.47	0.71	0.68	0.48	0.68			0.71	0.63	0.61	0.63	0.58	0.46
	$\sigma(K_T)$	0.04	0.07	0.21	0.05	0.03	0.20	0.02			0.02	0.00	0.07	0.02	0.02	0.14
Novembre																
	Freq.(%)	20.0	20.0	60.0	23.3	20.0	56.7	63.3	16.7	20.0	80.0	3.30	16.7	0.00	40.0	60.0
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.13	1.44	1.53	1.16	1.45	1.50	1.02	1.24	1.47	1.01	1.13	1.42		1.26	1.46
	$\sigma(\hat{D})$	0.14	0.04	0.11	0.12	0.05	0.13	0.03	0.03	0.09	0.02	0.00	0.10		0.03	0.16
	$\langle K_T \rangle$	0.70	0.63	0.46	0.68	0.65	0.41	0.68	0.61	0.42	0.69	0.63	0.48		0.59	0.28
	$\sigma(K_T)$	0.07	0.08	0.22	0.07	0.08	0.18	0.02	0.04	0.13	0.02	0.00	0.11		0.02	0.14
Décembre																
	Freq.(%)	25.8	29.0	45.2	32.3	22.6	45.2	51.6	6.50	41.9	54.8	19.4	25.8	9.70	12.9	77.4
	$\langle \hat{D} \rangle$	1.16	1.42	1.50	1.16	1.43	1.48	1.04	1.28	1.49	1.03	1.19	1.44	1.13	1.28	1.46
	$\sigma(\hat{D})$	0.12	0.03	1.50	0.11	0.04	0.14	0.05	0.11	0.17	0.03	0.06	0.12	0.04	0.06	0.17
	$\langle K_T \rangle$	0.68	0.62	0.46	0.67	0.61	0.45	0.66	0.42	0.42	0.65	0.59	0.51	0.58	0.58	0.21
	$\sigma(K_T)$	0.08	0.05	0.46	0.06	0.05	0.17	0.02	0.09	0.10	0.04	0.04	0.09	0.06	0.02	0.12

Tableau II-9. Caractéristiques mensuelles de chaque classe obtenue pour les différents sites (2^{ème} semestre)

Site	Golden			Boulder			Tahifet			Imehrou			Palo Alto		
Classe	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
Moyenne															
$\langle \hat{D} \rangle$	1.147	1.430	1.469	1.167	1.433	1.482	1.027	1.236	1.420	1.023	1.189	1.401	1.056	1.273	1.457
$\langle K_T \rangle$	0.697	0.628	0.462	0.692	0.645	0.468	0.661	0.598	0.454	0.686	0.625	0.501	0.704	0.611	0.335
Ecart type															
$\sigma(\hat{D})$	0.124	0.032	0.140	0.118	0.044	0.135	0.037	0.051	0.126	0.033	0.045	0.136	0.060	0.047	0.146
$\sigma(K_T)$	0.072	0.069	0.179	0.078	0.077	0.197	0.038	0.041	0.117	0.036	0.043	0.131	0.071	0.055	0.168

Tableau II-10. Paramètres statistiques annuels de la dimension fractale et de l'indice de clarté des classes obtenues pour les différents sites

Ces propriétés statistiques montrent que la méthode de classification présentée a permis d'aboutir à des groupements homogènes des journées étudiées vue que les écart-types de $\hat{D}$ et de K_T sont faibles par rapport à leurs moyennes. En effet, dans tous les sites $\sigma(K_T)$ est inférieur à 10% pour toutes les classes et à l'exception de Golden et Boulder nous constatons la même chose pour $\sigma(\hat{D})$ seulement pour les classes 1 et 2. La valeur un peu plus importante de cet écart-type pour la classe 3 (plus de 10%) est due au fait que cette classe contient des journées pluvieuses dont le signal d'éclairement a une forme régulière donc une dimension fractale proche de 1 comme déjà expliqué. A titre d'exemple, la figure (II-15) représente l'évolution de l'éclairement journalier d'une journée pluvieuse. La dimension fractale estimée $\hat{D}$ pour cet exemple vaut 1.11 et l'indice de clarté K_T est égal à 0.37 pour cette journée. En utilisant uniquement $\hat{D}$, l'éclairement de cette journée appartiendra à la classe 1. A l'aide de K_T , il serait classé dans la classe 3.

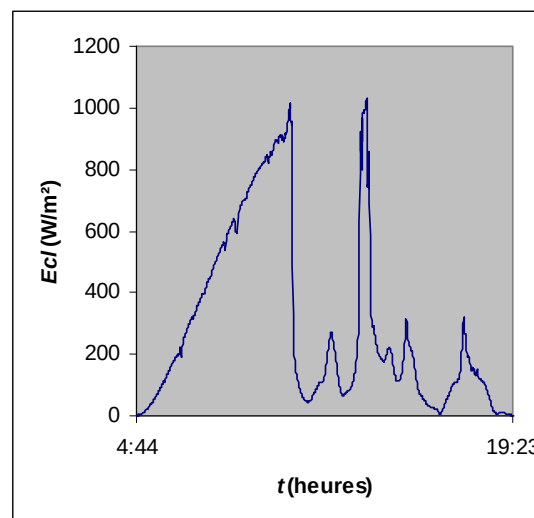


Figure II-15. Exemple de journée pluvieuse avec une allure assez régulière (15 Juillet 2003 à Golden)

Les valeurs relativement élevées de $\sigma(\hat{D})$ de la classe 1 dans les deux sites de Colorado s'explique par la valeur élevée du seuil 1 dû au caractère très fluctuant des éclairements de ces sites.

Ces résultats ont été confirmés par la probabilité de transition entre les journées d et $d+1$. En effet, dans la figure (II-16) nous avons représenté pour chaque site la probabilité de transition appelée aussi la probabilité conditionnelle i/j de la classe j au jour $d+1$ quand au jour d la classe était i . Nous remarquons que l'effet de persistance est dominant dans la plupart des sites puisque la somme des probabilités de transition des classes 1/1, 2/2 et 3/3 est majoritaire. Le pourcentage des journées où la classe au jour $d+1$ est identique à la classe au jour d est 70.42% à Tahifet, 57.81 à Imehrou et 66.67% à Palo Alto. A Golden et Boulder par contre ce pourcentage est plus faible, 42.03% à Golden et 41.2% à Boulder, ceci est expliqué par le climat de ces deux sites qui est très fluctuant (instable) ce qui favorise les autres transitions.

IV. conclusion

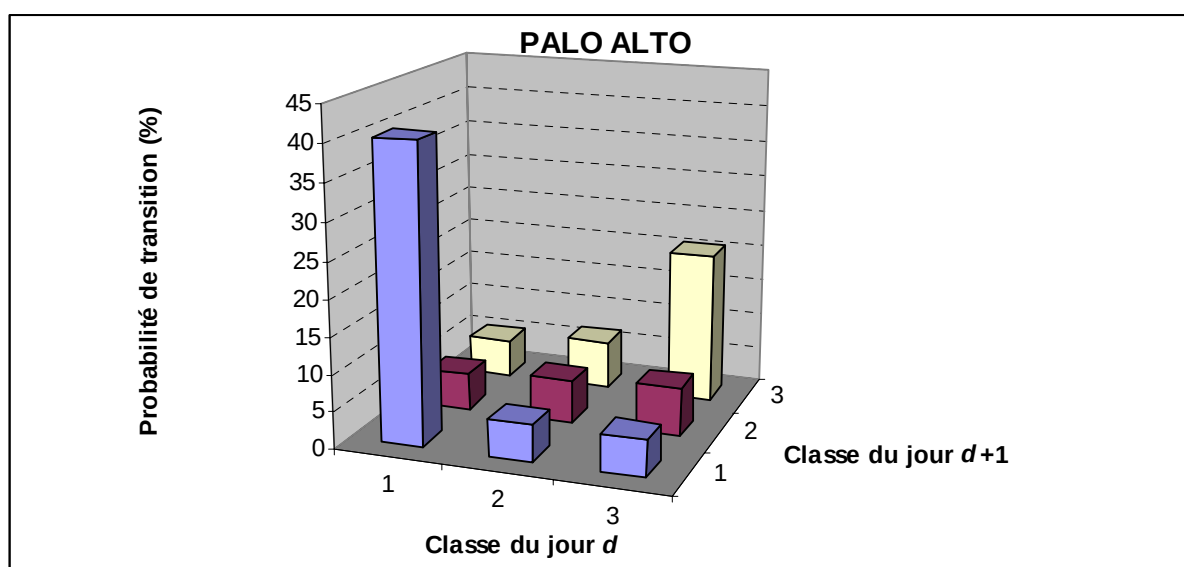
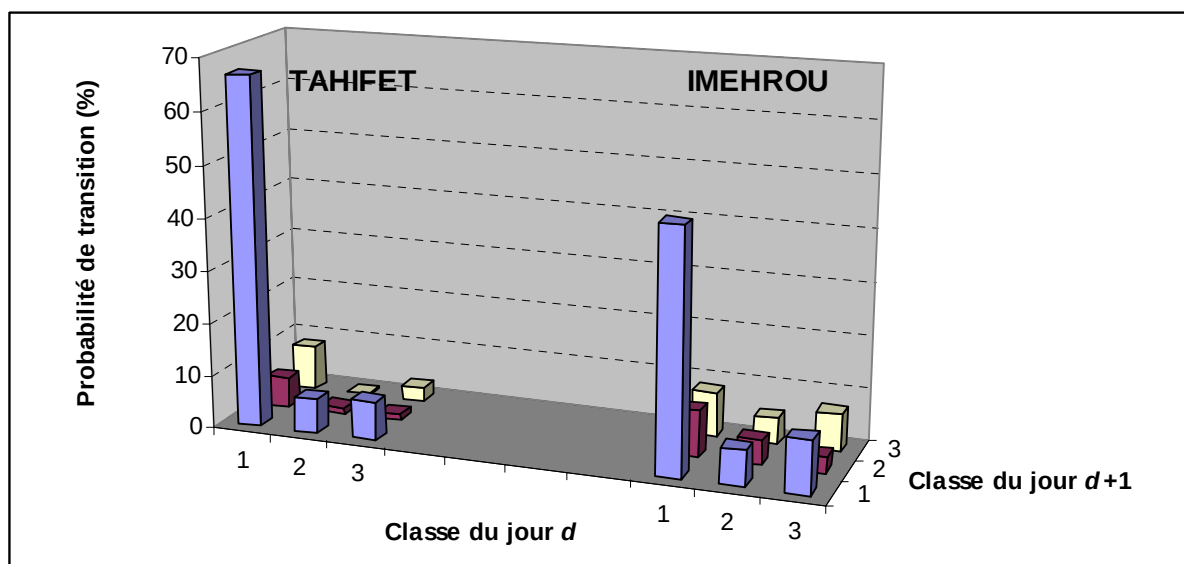
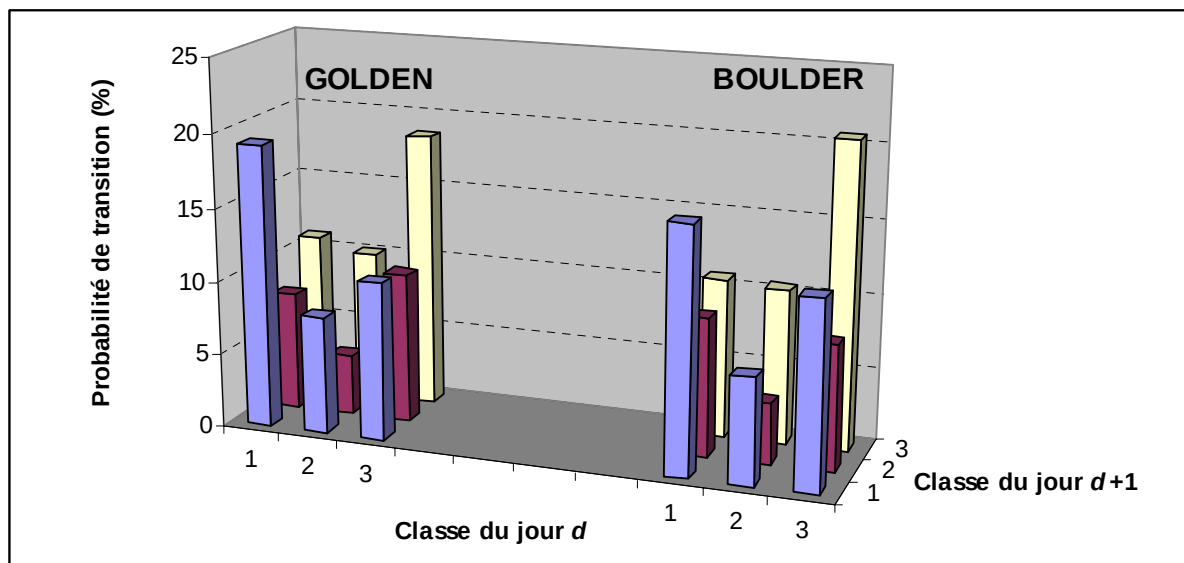
Nous avons montré dans ce chapitre qu'il est possible de réaliser une classification intéressante des éclairements solaires en 3 types de temps à l'aide de l'analyse fractale. La méthode élaborée a été appliquée à cinq sites de différents climats.

Les résultats de cette classification ont montré que le paramètre K_T permet de distinguer deux classes uniquement et c'est grâce à $\hat{D}$ qu'une 3ème classe a été définie comme l'a montré l'exemple de la figure (II-15). Aussi, la complémentarité entre $\hat{D}$ et K_T est très importante, ce n'est qu'en utilisant les deux paramètres que l'on arrive à affiner le classement.

La validation de la méthode de classification a été réalisée d'abord en confrontant, chaque jour, le résultat de la classification et l'observation, une bonne concordance a été obtenue.

Ensuite, en analysant les propriétés statistiques des classes obtenues en utilisant les paramètres de classification, à savoir la dimension fractale et l'indice de clarté, les écart types observés dans chaque classe sont relativement faibles par rapport à la manière d'utilisation de ces paramètres dans la méthode de classification. Finalement, la probabilité de transition entre les journées a été calculée et a montré que l'effet de persistance est dominant dans la plupart des sites.

La classification des journées en des types de temps ainsi réalisée peut être alors utilisée pour réduire l'étude de performance des systèmes photovoltaïques ainsi que leur dimensionnement, ceci fera l'objet du chapitre suivant.

Figure II-16. Probabilité de transition entre les journées d et $d+1$

CHAPITRE 3

CHAPITRE 3

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES SYSTÈMES PV À L'AIDE DE L'ANALYSE FRACTALE

I. introduction

La conversion photovoltaïque est de nos jours d'une grande utilisation notamment en électrification rurale. En effet, l'énergie solaire étant disponible, sa conversion sous forme électrique est une solution avantageuse et économique pour satisfaire les besoins urgents en électricité surtout dans les zones rurales où les réseaux classiques de distribution d'électricité n'y pénètrent que de façon limitée pour des raisons de coût.

Actuellement, beaucoup de régions dans le monde comptent un potentiel d'énergie solaire très important, ce qui a encouragé à l'installation de systèmes photovoltaïques. Pour une bonne efficacité de ces systèmes et une exploitation optimale de l'énergie solaire, il est indispensable de procéder à l'analyse de leur performance.

Ce chapitre est consacré à l'étude de la performance des systèmes photovoltaïques. Cette dernière a fait l'objet de plusieurs travaux [126-132]. Ainsi, plusieurs méthodes utilisant des critères différents ont été élaborées. Cependant, pour une bonne étude de la performance des systèmes PV, il est nécessaire d'avoir une banque de données à un pas de temps fin [133-135]. Or, de telles données ne sont pas toujours disponibles, surtout dans les sites isolés à cause des coûts économiques engendrés par l'acquisition de telles données. Peu de travaux alors traitant l'analyse expérimentale de la performance des systèmes PV ont été menés [15, 136-140].

Dans le but de réduire ces coûts et simplifier l'analyse de la performance des systèmes PV, nous proposons dans ce chapitre une approche basée sur les résultats de la classification établie dans le chapitre précédent. Cette approche permet la construction de journées types pour chaque classe, ce qui réduira l'étude de performance aux cas types obtenus. Afin d'apprécier la performance des systèmes PV étudiés et valider la méthode proposée, le rendement du générateur et les indices de performance seront utilisés.

Nous commencerons ce chapitre par la description des systèmes PV utilisés dans notre étude, il s'agit des systèmes dont les sites ont déjà été présentés dans le chapitre 2 : Tahifet, Imehrou et Palo Alto. La banque de données issues du monitoring de ces systèmes sera également détaillée. Par la suite, notre approche d'évaluation de la performance des systèmes

PV sera appliquée à ces systèmes. Nous terminerons ce chapitre par la présentation et la discussion des résultats obtenus.

II. ETUDE REDUITE DE LA PERFORMANCE DES SYSTEMES PV

II.1. Principe de la méthodologie

Pour analyser et optimiser les performances d'un système PV, il est utile de connaître la moyenne à long terme de l'énergie générée sous toutes les conditions climatiques. Pour cela l'approche classique consiste à étudier la performance du système en utilisant toutes les journées c'est à dire jour par jour au fil du temps. Cette étude pourrait être menée d'une manière plus simple si on arrivait à réduire le nombre de journées à étudier.

Ainsi, notre idée consiste à retrouver les principaux résultats déjà obtenus en étudiant la performance à l'aide de la banque de données sur toute une année, en utilisant uniquement des données représentant des situations typiques. Pour cela, les résultats de la classification établis dans le chapitre 2 seront utilisés. Dans le cas de l'obtention d'un bon accord des résultats, la classification mènera alors à une compression des données, puisque l'étude de la performance des systèmes PV sur toute une année sera réduite à une simple étude de cas types. Par conséquent, les coûts économiques engendrés par l'étude classique de la performance des systèmes PV sera énormément réduite.

La mise en œuvre de notre méthodologie consiste d'abord à utiliser toute la banque de données pour étudier la performance des systèmes PV, ensuite mener cette étude en utilisant uniquement les cas types issus de la classification établie précédemment (Chapitre 2), pour cela une journée type sera construite pour chaque classe.

Pour pouvoir comparer les résultats de l'étude de performance obtenus avec les journées types et ceux déterminés pour une longue période (en utilisant les journées constituant chaque classe), les indices de performance et le rendement de conversion du générateur PV seront utilisés.

II.2. Description et fonctionnement des systèmes PV étudiés

Notre approche d'évaluation de la performance des systèmes PV sera appliquée à trois systèmes PV dont les éclairissements solaires ont déjà été classés dans le chapitre précédent en 3 types de classes, il s'agit des systèmes PV implantés à Tahifet, Imehrou et Palo Alto.

II.2.1. Systèmes PV installés à Tahifet et Imehrou

► Description

Deux systèmes PV prototypes ont été installés par la SONELGAZ (Société National de l'Electricité et Gaz) dans le sud algérien. Le premier est situé dans le village de Tahifet dans la wilaya de Tamanrasset, le deuxième se trouve à Imehrou dans la wilaya de Illizi. Rappelons que ces deux sites ont déjà été détaillés dans le chapitre précédent.

Les deux systèmes sont identiques, leur générateur PV est d'une puissance de 720 Watts-crête et il a une surface totale de 6m². Il est orienté vers le sud et est incliné d'une surface égale à 10° par rapport au plan horizontal [141].

Ce générateur est prévu pour alimenter une habitation de Tahifet (qui représente une mosquée) par énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie solaire. La demande énergétique représente essentiellement l'éclairage, la réfrigération et la ventilation [15,141]. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de recourir à une configuration utilisant un stockage d'énergie électrique, afin d'assurer à l'installation une autonomie et une continuité d'alimentation. Pour cette raison, le système photovoltaïque de Tahifet est un système autonome utilisant un générateur photovoltaïque avec stockage électrique.

Dans les figures (III-1) et (III-2) nous avons représenté respectivement l'image réelle du système en cours d'expérimentation à Imehrou et le schéma synoptique de l'installation.

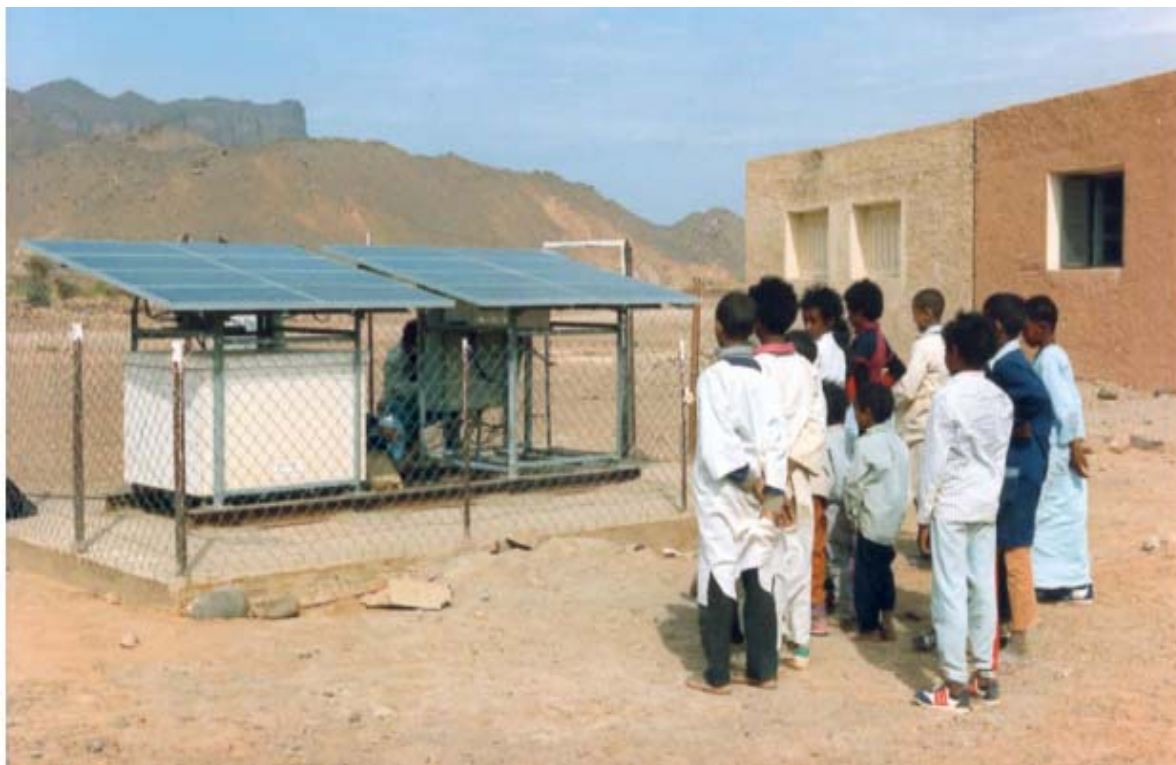


Figure III-1. Système en phase d'expérimentation à Imehrou – Illizi – 1992/1997

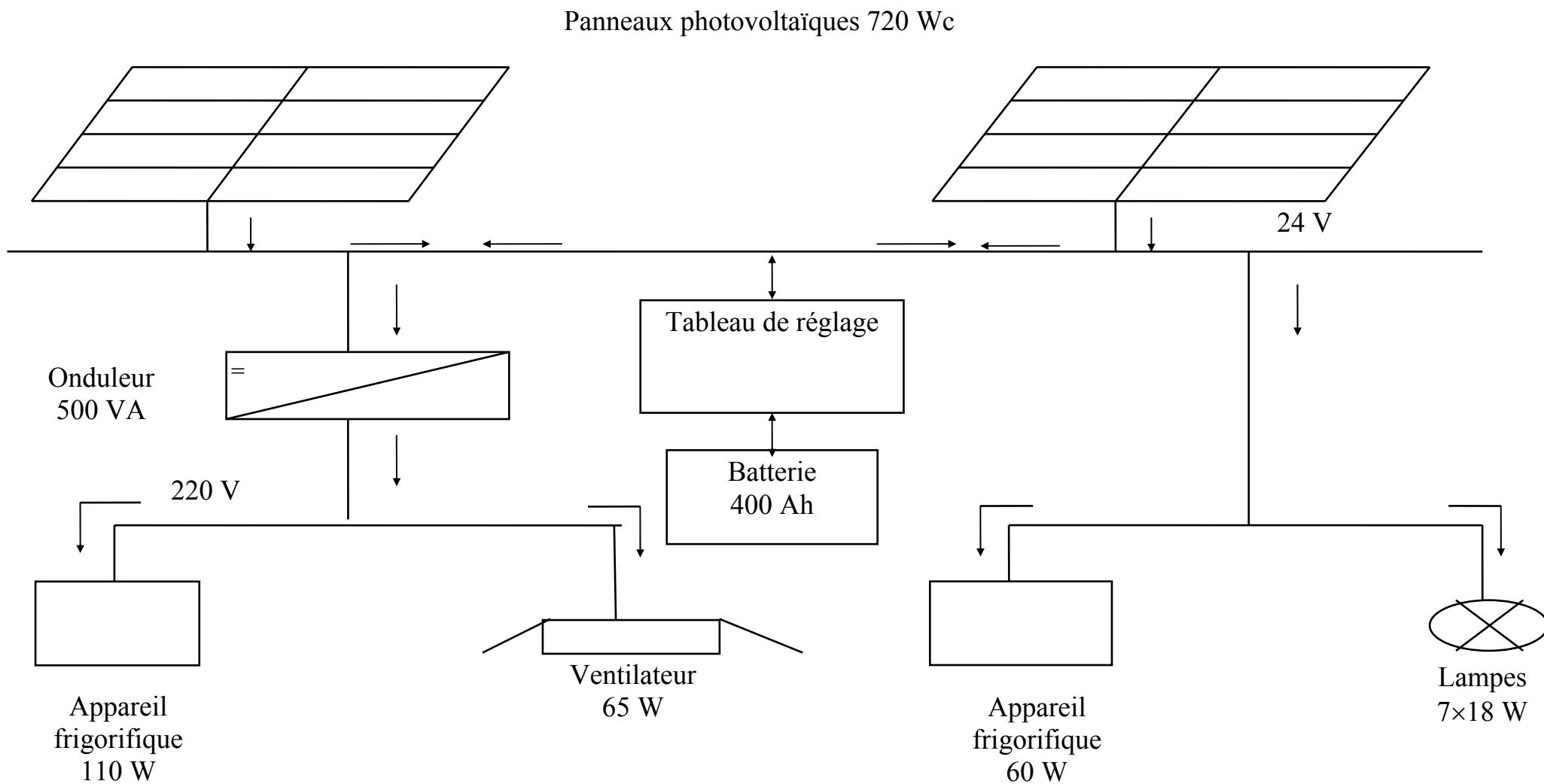


Figure III-2. Schéma synoptique de l'installation de Tahifet

Cette dernière comprend:

- Le champ photovoltaïque
- Le tableau de réglage
- La batterie
- L'onduleur
- Les appareils utilisateurs

- **Le champ photovoltaïque**

Le champ photovoltaïque est constitué de 16 modules solaires de type ITALSOLAR (ex PRAGMA) reliés électriquement entre eux dans une boîte de couplage en parallèle.

Chaque module a une puissance de 45Wc ce qui donne une puissance totale de 720Wc pour le champ PV. La tension maximale de ce dernier est de 40V et son courant maximum est de 20A [141]. Les modules sont à base de cellules au silicium monocristallin qui assurent la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire en énergie électrique.

- **Le tableau de réglage**

Le tableau de réglage contient les appareils électriques en mesure de régler automatiquement d'une part le courant provenant des modules solaires, et d'autre part celui qui va aux appareils utilisateurs de manière à garantir un fonctionnement correct de la batterie. Pour cela, la régulation est pilotée par un microprocesseur qui au 1^{er} stade (seuil haut de la batterie) déconnecte la moitié des modules et au 2^{ème} stade la moitié de ce qui reste.

Ce tableau contient aussi des appareils de sectionnement, protection et mesure qui sont les suivants:[141]

- Un voltmètre pour la mesure de la tension de la batterie.
- Un système complet d'acquisition de données pour installations photovoltaïques (GMF) comprenant des compteurs pour l'énergie produite, l'énergie utilisée, le rayonnement solaire, le temps de fonctionnement, le nombre de décrochements, le temps de non utilisation et ceci pour les deux lignes de charge.
- Un système d'acquisition de données "Data Logger *GRANT*".

- **La batterie**

La batterie est constituée de 12 accumulateurs au plomb de type FIMM, de 2 Volts chacun, reliés en série pour assurer une tension nominale de 24V.

Grâce à une capacité de 400Ah, la batterie permet le stockage de l'énergie produite durant les heures d'ensoleillement, puis la restituer à tout moment sur demande pour la distribuer aux appareils utilisateurs pendant les heures d'obscurité et les périodes de faible ensoleillement

(nuit et périodes de mauvais temps). Notons que la batterie d'accumulateurs est enterrée dans un caisson en bois phénolique, peint en blanc et placé sous les modules, ce qui permet de réduire les écarts de température.

- **Les lignes électriques de distribution**

Pour la distribution de l'énergie électrique entre les différents éléments, deux lignes électriques sortent du tableau électrique de réglage, la principale est celle qui sert aux appareils fonctionnant en courant continu, la seconde sert à l'alimentation des appareils fonctionnant en courant alternatif et ceci grâce à un onduleur qui assure la conversion du courant continu en courant alternatif.

- **Les appareils utilisateurs**

La charge électrique est constituée d'appareils alimentés en courant continu et en courant alternatif. Aussi, un appareil frigorifique de 110 watt et un ventilateur de 65 watts sont alimentés en courant alternatif alors qu'un autre appareil frigorifique de 60 watts et sept lampes à basse consommation et haut rendement de 10 watts chacune sont alimentés en courant continu. L'installation prévoit aussi l'alimentation en continu d'un téléviseur qui n'a pas été encore installé à défaut d'émetteur TV [141].

► **Fonctionnement [141]**

Le fonctionnement de l'installation est complètement automatique. L'énergie solaire incidente, c'est à dire, celle qui frappe les modules photovoltaïques est convertie en énergie électrique par effet photovoltaïque, cette énergie charge la batterie et alimente les appareils utilisateurs en même temps, grâce au tableau de réglage. Le schéma de principe du fonctionnement de l'installation est donné par la figure (III-3).

Durant les périodes d'ensoleillement intense, l'énergie produite dans le champ photovoltaïque peut être excessive par rapport à la consommation, cet excès d'énergie est emmagasiné dans la batterie jusqu'à ce que celle-ci dépasse la valeur de 28 V. Dans ce cas un dispositif de réglage intervient dans le tableau enclenchant les quatre relais 'R1', 'R2', 'R3', 'R4' pour déconnecter progressivement les différentes parties du champ photovoltaïque. Par contre, durant les périodes de faible ensoleillement ou de consommation importante d'énergie, la batterie se décharge, dans ce cas le dispositif de réglage intervient pour débrancher automatiquement d'abord l'onduleur, en ouvrant le relais 'R_{UCA}'. Si après une minute de l'ouverture de 'R_{UCA}' la batterie reste toujours sous le seuil minimum de 22,2 V le dispositif de réglage intervient de nouveau pour débrancher la ligne « utilisateur du courant continu » par l'ouverture du relais 'R_{UCC}'.

Lorsque la charge de la batterie redevient normale en atteignant la valeur de 25,2 V grâce à l'apport de l'énergie solaire, ces deux charges sont automatiquement rebranchées en fermant 'R_{UCA}' et 'R_{UCC}'.

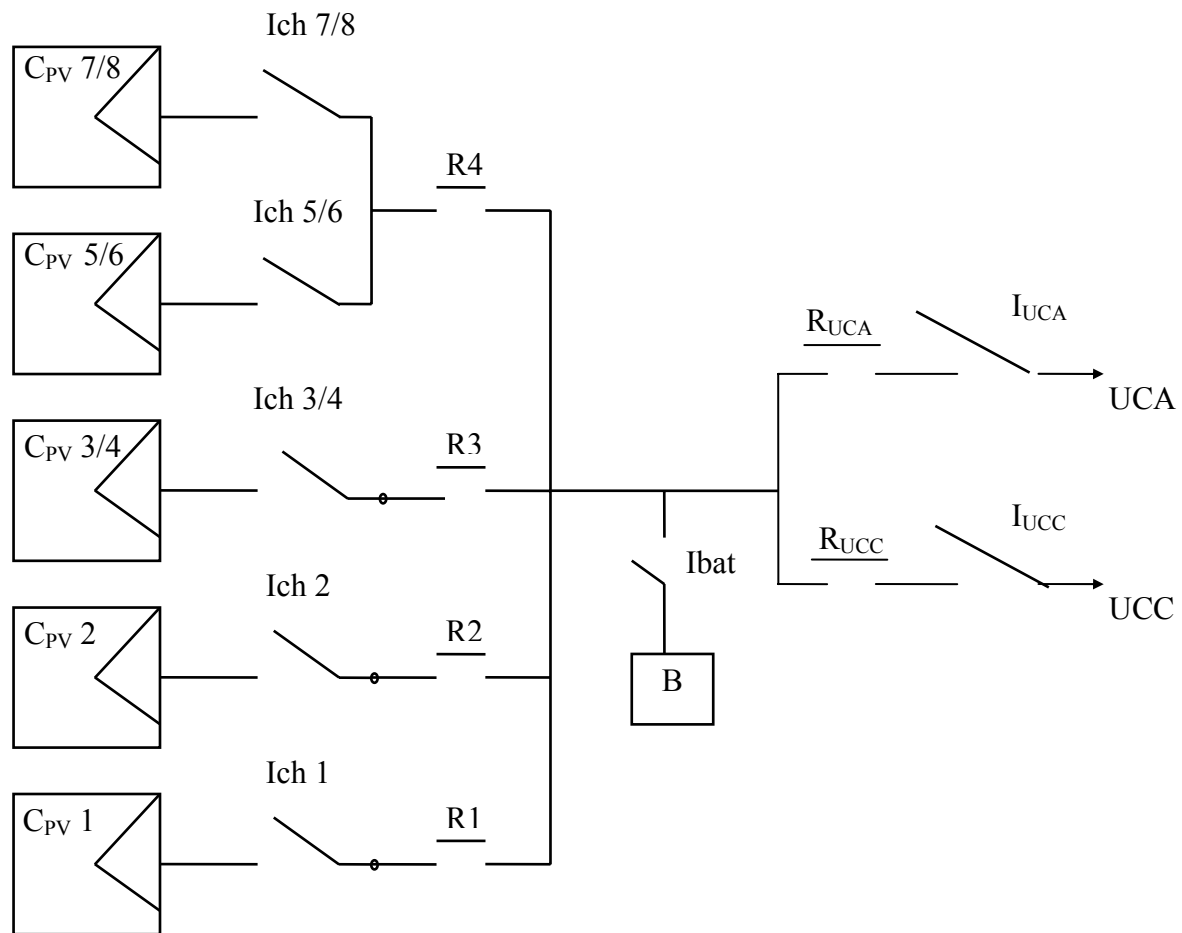


Figure III-3. Schéma de principe de l'installation

Où :

C_{PV} : Champ photovoltaïque

Ich : Interrupteur en chaîne

Ri : Relai demi-champ

R_{UCC} : Relai appareils utilisateurs courant continu

I_{UCA} : Interrupteur onduleur

► Monitoring

Le monitoring d'un système PV consiste à suivre son fonctionnement à travers des mesures fines effectuées à l'aide d'une chaîne automatique de mesure.

Le monitoring du système PV de Tahifet et Imehrou a été effectué grâce au Data Logger *GRANT*. Celui-ci est un système d'enregistrement de données qui peut fonctionner avec une alimentation en courant continu de 9V ou bien avec 6 piles de 1,5V chacune. Il permet l'enregistrement de différentes mesures (tensions, courants, températures, position des contacts, etc.) avec un temps d'acquisition qui peut être fixé par programme à quelques secondes et pourrait atteindre plusieurs heures.

Les données acquises sont mémorisées dans une RAM et sont déchargées par lecture au moyen d'une calculatrice reliée à la porte série RS232 du système.

La capacité de mémoire des *GRANT* est de 170000 données, l'autonomie de mémoire dépend donc du nombre de données enregistrées à chaque lecture et de la fréquence avec laquelle ces lectures sont effectuées. Dans notre cas, avec un temps d'enregistrement de 10 minutes, la mémoire devrait suffire pour plus de 5 mois et 18 jours environs, il est de toute façon préférable de décharger le système une fois tous les deux mois.

Les données dont nous disposons prises grâce au système d'acquisition le *GRANT* sont étalées sur une durée d'une année (1992) mesurées à un pas de temps fin qui est de 10 minutes. Pour chaque jour de l'année on a les mesures des 7 grandeurs suivantes :

- Température ambiante (°C)
- Température du caisson de batterie (°C)
- Tension de la batterie (V)
- Courant généré (A)
- Courant utilisé (A)
- Rayonnement solaire (W/m²)
- Tension de champ photovoltaïque (V)

Les valeurs enregistrées directement sont exclusivement des tensions et des températures, les courants étant transformés en tensions par des shunts. Pour l'acquisition de températures, le système est équipé de sondes dont le signal est transformé automatiquement par le *GRANT* en °C, par contre en ce qui concerne les tensions, il n'est pas possible d'avoir une lecture directe des valeurs car celles ci ont été transformées pour rester dans la gamme des valeurs du *GRANT*, c'est pour cette raison que nous avons des diviseurs et des dérivateurs sur les tensions et courants.

Dans le tableau (III-1) nous donnons un échantillon des mesures acquises pour la journée du 1 Janvier dans le site de Imehrou sur une période qui s'étale de 11:01 à 12:01.

Jour/Heure	Ta	Tc	Vb	Ig	Iu	Ecl	Vc
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
01/11:01	13.25	12.15	24.5	15.15	9.05	713.33	23.96
01/11:11	13.5	11.7	24.56	15.45	8.65	728.33	24
01/11:21	13.3	11.7	24.54	15.5	9.15	726.67	23.92
01/11:31	13.5	11.85	24.74	16.4	8.55	771.67	23.68
01/11:41	13.65	11.9	25.52	16	2.9	756.67	23.96
01/11:51	14.1	12.05	25.26	16.05	5.95	758.33	23.92
01/12:01	14.4	12.1	24.6	15.05	9.25	705	23.24
*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

Tableau III-1. Exemple de mesures réalisées par la chaîne d'acquisition le 1 Janvier à Imehrou

Avec :

T_a : Température ambiante exprimée en degré Celsius (°C)

T_c : Température du caisson de batterie exprimée en degré Celsius (°C)

V_b : Tension de la batterie exprimée en Volt (V)

I_g : Courant généré exprimé en Ampère (A)

I_u : Courant utilisé exprimé en Ampère (A)

E_{cl} : Eclairement solaire incident exprimé en Watt par mètre carré (W/m²)

V_c : Tension du champ PV exprimée en Volt (V)

A partir des données brutes enregistrées nous avons procédé à la détermination des paramètres énergétiques journaliers : L'irradiation solaire H , l'énergie générée par le champ PV E_g et l'énergie consommée par la charge E_c . L'irradiation solaire a déjà été calculée dans le chapitre précédent par intégration de l'éclairement solaire. Pour le calcul de E_g et E_c , nous avons procédé à l'intégration de la puissance générée par le champ PV P_g et celle consommée par la charge P_c . Ces puissances étant calculées comme suit :

$$P_g = I_g * V_c \quad (III.1)$$

$$P_c = I_u * V_b \quad (III.2)$$

La figure (III-4) représente l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'énergie E_g et ceci pour les deux sites Tahifet et Imehrou.

Si on compare cette figure à celle de l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'irradiation (Figure (II-7)), nous signalons une anomalie : l'énergie générée est minimale lorsque l'irradiation est maximale alors que l'énergie extraite du générateur PV est normalement proportionnelle au rayonnement incident. En effet, à Tahifet par exemple pour le mois d'Octobre où l'irradiation est maximale on constate une chute de l'énergie générée. Ceci peut être expliqué par la saturation de la batterie due au fort ensoleillement reçu pendant ce mois-ci et la faible consommation de la charge comme montrée dans la figure (III-5), qui représente l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'énergie consommée journalière. Lorsque la batterie est surchargée, le dispositif de réglage est enclenché pour déconnecter quelques modules solaires ce qui a pour effet de chuter l'énergie générée par le champ PV.

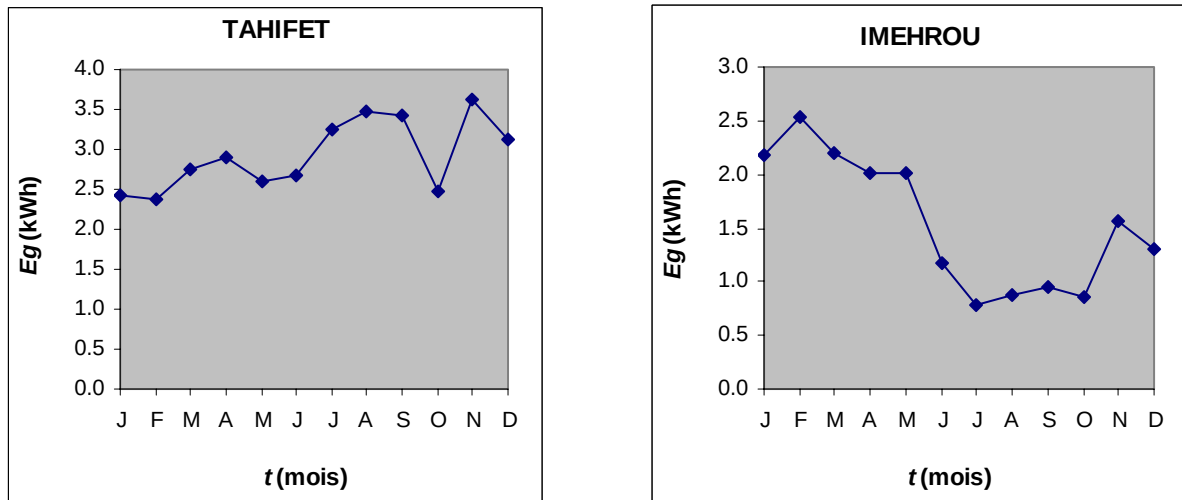


Figure III-4. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de E_g

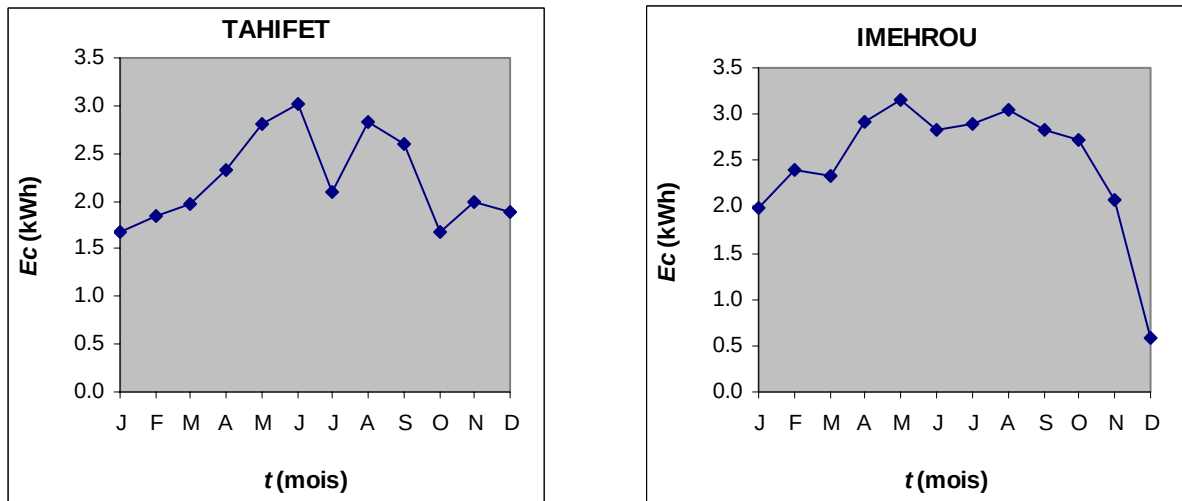


Figure III-5. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de E_c

II.2.2. Système PV installé à Palo Alto

► Description

Un système PV situé dans la cité de Palo Alto à Sans Francisco (USA) a été installé en Mai 2000 par CPAU (City of Palo Alto utilities). Ce système résidentiel relié au réseau est prévu pour alimenter une maison et un véhicule électrique.

La figure (III-6) [124] montre l'image du système PV de Palo Alto à sa phase finale d'installation sur le toit d'une maison.



Figure III-6. Samedi 05/06/2000, le système PV de Palo Alto atteint la phase finale de son installation

Cette installation comprend [142]:

- **Le champ photovoltaïque**

Il est constitué de 24 modules de types Astropower AP 1206 d'une surface totale de 23.38m². Chaque module a une puissance de 120 Watts-crête ce qui donne une puissance totale de 2880Wc. Les modules sont à base de cellules au silicium mono-cristallin, ils sont montés sur le toit de la maison, orientés vers le Sud-Ouest et inclinés d'un angle de 30° par rapport au plan horizontal. La figure (III-7) montre l'image des modules utilisés.



Figure III-7. Module Astropower AP1206

- **Le convertisseur**

Le convertisseur ou onduleur utilisé dans cette installation est de type Xantrex SW4048 d'un rendement de 95%. La figure (III-8) représente l'image de ce convertisseur.



Figure III-8. Convertisseur SW4048

- **La charge électrique**

La consommation de cette installation consiste en l'énergie électrique alimentant les appareils utilisateurs à l'intérieur de la maison et celle alimentant un véhicule électrique. La figure (III-9) [143] représente le véhicule en cours de chargement dans une station électrique à travers les panneaux solaires installés sur le toit de la maison de Palo Alto.



Figure III-9. Véhicule électrique en cours d'alimentation grâce à l'énergie solaire

► **Fonctionnement**

Le système photovoltaïque de Palo Alto est un système relié directement au réseau, il ne contient pas de batterie. Durant les journées de fort ensoleillement, l'excès de l'énergie produite par le champ PV est injecté dans le réseau. Par contre, la nuit ou au cours des journées nuageuses, la charge électrique est alimentée à partir du réseau.

► **Monitoring**

Le monitoring de cette installation photovoltaïque a été effectué grâce au système d'acquisition de données Le Data Logger 'Campbell Scientific CR10X'. Ce système contient une batterie pour le maintien de l'acquisition en cas de défaillance, des capteurs de données (Un pyranomètre pour la mesure de l'éclairement solaire global, des thermistances pour la

mesure de température, un anémomètre pour mesurer la vitesse du vent), un modem relié à une ligne téléphonique permettant ainsi la collecte des données via Internet. Le système d'acquisition contient également un dispositif pour mesurer l'énergie consommée par le véhicule électrique.

La figure (III-10) [144] donne un schéma global de l'installation PV de Palo Alto ainsi que son système d'acquisition CR10X.

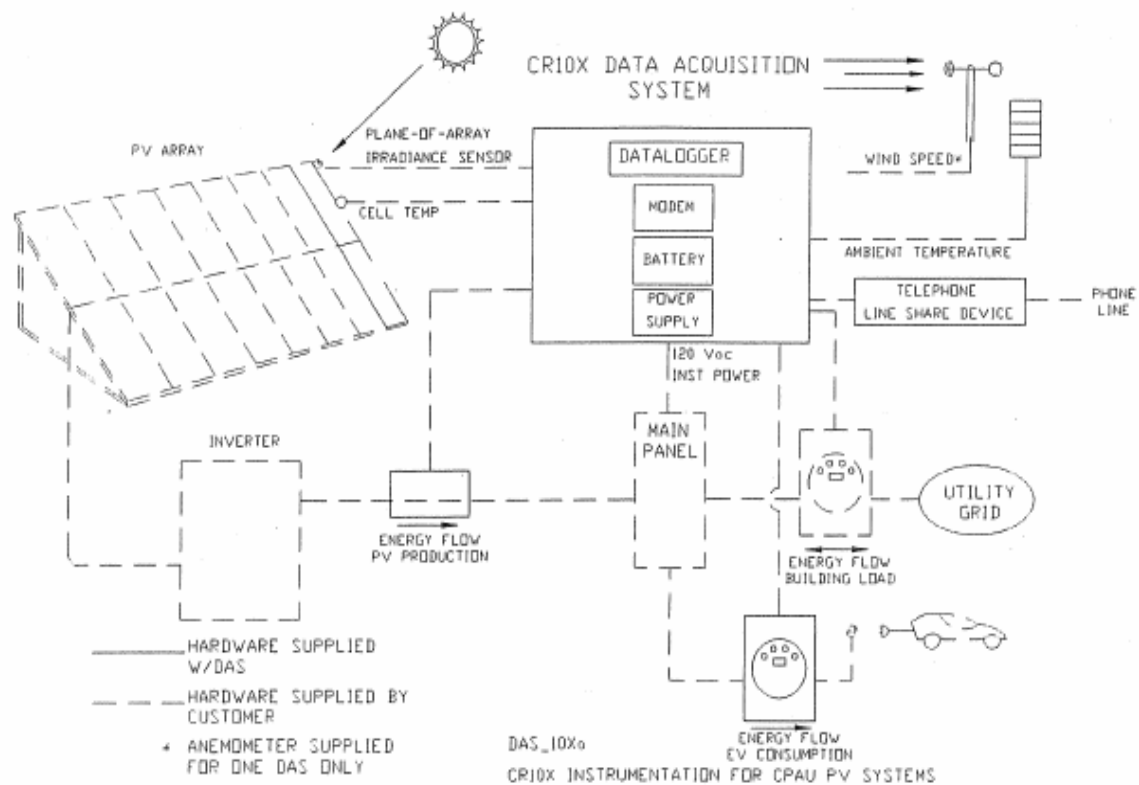


Figure III-10. Schéma global de l'installation PV de Palo Alto.

Les données acquises sur le système PV de Palo Alto et utilisées dans notre travail sont enregistrées au cours de l'année 2003 à un pas d'acquisition de 15 minutes. Pour chaque jour de cette année on a les mesures des 9 paramètres suivants :

- Température ambiante T_a (°C)
- Température cellule T_{cel} (°C)
- Eclairement solaire E_{cl} (W/m²)
- Vitesse du vent W_s (m/s)
- Puissance générée par le champ PV P_g (KW)
- Puissance consommée par le véhicule électrique P_{ve} (KW)
- Puissance extraite du réseau P_{gridin} (KW)
- Puissance injectée dans le réseau $P_{gridout}$ (KW)

A partir de l'intégration des puissances ci-dessus nous avons calculé les énergies journalières correspondantes: L'irradiation solaire H qui a déjà été calculé dans le chapitre précédent, l'énergie générée par le champ PV E_g et l'énergie consommée par la charge E_c . Celle-ci étant l'intégration de P_c qui représente la somme de la puissance consommée par la charge électrique installée dans la maison et celle délivrée au véhicule électrique. Elle est calculée comme suit :

$$P_c = P_g + P_{gridin} - P_{gridout} \quad (III.3)$$

La figure (III-11) représente l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle des énergies E_g et E_c .

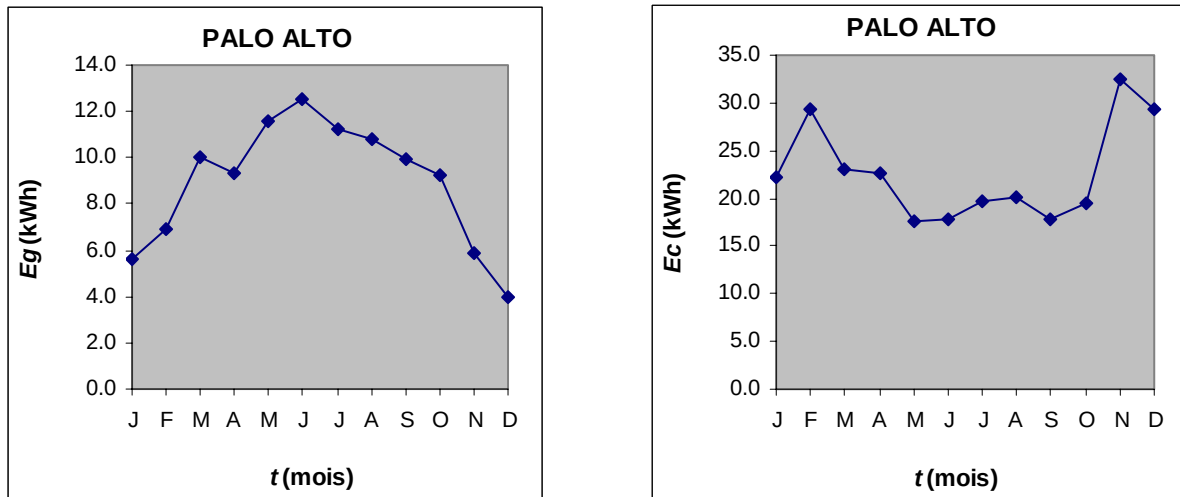


Figure III-11. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de E_g et E_c

Nous remarquons que l'énergie convertie par le champ PV E_g est exactement proportionnelle à l'irradiation globale (Figure (II-7)). Ceci est dû au fait que le système de Palo Alto est un système relié au réseau et non un système autonome. En effet, dans le cas où il y a excès d'énergie, il n'y aura pas de déconnection de panneaux solaires pour éviter la surcharge de batterie comme pour le cas des systèmes autonomes de Tahifet et Imehrou mais l'excès d'énergie sera injectée dans le réseau. La figure (III-12) qui représente les moyennes mensuelles de E_g en fonction de celles de H confirme la proportionnalité de l'énergie générée par le champ PV à l'irradiation globale.

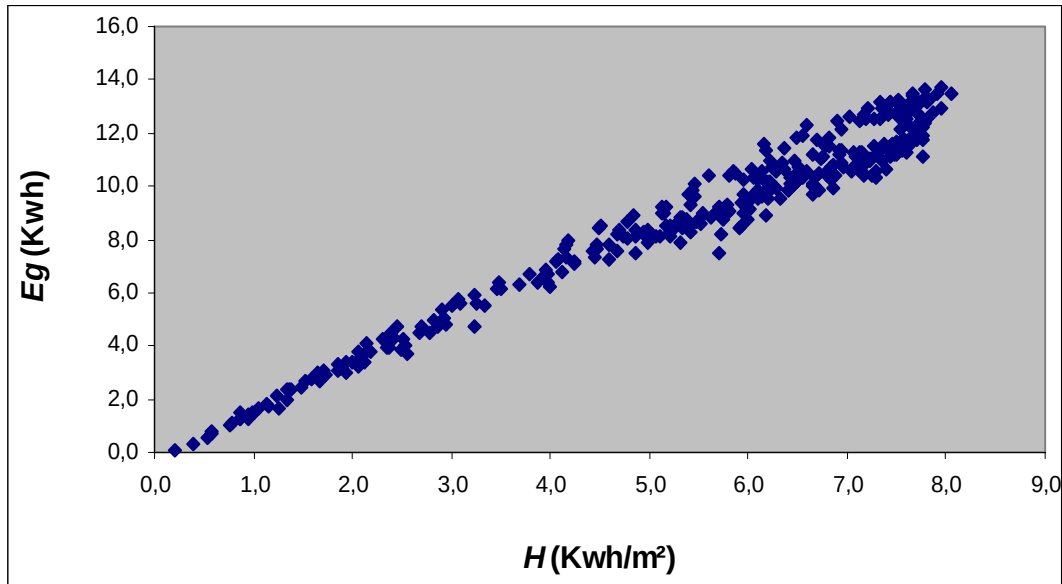


Figure III-12. Nuages de points représentant Eg en fonction de H

II.3. Mise en œuvre de la méthodologie

La mise en œuvre de notre méthode d'évaluation de la performance des systèmes photovoltaïques consiste d'abord à calculer le rendement de conversion du générateur PV et les indices de performance pour chaque journée de la banque de données utilisée et ceci pour les 3 systèmes étudiés : Tahifet, Imehrou et Palo Alto.

Le rendement journalier du générateur PV est défini comme étant le rapport entre l'énergie générée par le champ PV (restituée à la sortie du générateur) et l'énergie incidente fournie par le rayonnement solaire. De ce fait, on peut l'exprimer par :

$$\eta(j) = \frac{\text{Energie générée}}{\text{Energie incidente}} = \frac{Eg(j)}{S_{PV} * H(j)} \quad (\text{III.4})$$

Où :

$\eta(j)$ est le rendement de conversion du générateur PV correspondant à la journée j

$Eg(j)$ est l'énergie générée par le champ PV pendant la journée j

$H(j)$ représente l'irradiation solaire incidente correspondant à la journée j

S_{PV} est la surface totale du champ PV

La figure (III-13) montre la distribution des rendements journaliers des 3 systèmes étudiés. Ces rendements varient de 4 % à 11 % pour Tahifet, de 1 % à 9 % pour Imehrou et de 2 % à 9 % pour Palo Alto. Cependant, la plupart d'entre eux se regroupent entre 9 % et 10 % à Tahifet et 7 % et 8 % à Palo Alto. Ceci est conforme aux résultats déjà publiés dans la littérature à

propos des valeurs du rendement de conversion des cellules solaires au silicium monocristallin [129-130]. A Imehrou par contre, une anomalie est à signaler, les rendements se concentrent surtout entre 2 % et 3 % ce qui représentent des valeurs très faibles par rapport au type de cellules utilisé.

Ces résultats sont corroborés par la figure (III-14) qui montre l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle des rendements journaliers. Nous constatons que la moyenne annuelle des rendements journaliers est pratiquement égale à 8,5 % à Tahifet, 7 % à Palo Alto et 4.3 % à Imehrou.

D'autre part, nous remarquons qu'un rendement minimal correspond à une irradiation globale maximale pour les 2 systèmes autonomes (Tahifet et Imehrou). En effet, la comparaison des figures (III-14) et (II-7) qui représentent l'évolution annuelle de la moyenne mensuelle des rendements journaliers et de l'irradiation journalière respectivement confirme cette constatation. Ceci peut être expliqué par l'effet de la surcharge de la batterie dû à l'importance de l'irradiation solaire captée comme nous l'avons déjà expliqué. Cependant, le système relié au réseau (Palo Alto) ne présente pas cette caractéristique dû à l'effet de proportionnalité entre l'énergie générée par le champ PV et l'énergie incidente comme c'est montré plus haut.

Concernant les indices de performance, ce sont des paramètres universels caractérisant les systèmes photovoltaïques. Ils sont aussi utilisés pour la comparaison des différents systèmes PV, c'est pour cela qu'on les a normalisé. Ceci est obtenu en divisant les énergies par la puissance nominale P_0 du système. P_0 exprimée en Kilowatts crête (kWc) est la valeur donnée par le constructeur, elle correspond à la puissance de sortie du générateur PV au point de puissance maximum obtenue sous les conditions de test standards (STC). Ces dernières consistent essentiellement en un éclaircissement solaire incident égal à 1 kW/m^2 et une température égale à 25°C . Ainsi, les indices de performance sont définis comme suit [145-146]:

- **Indice de performance du champ PV, Y_A**

L'indice de performance Y_A représente l'énergie journalière générée par le champ photovoltaïque E_g par kWc de la puissance du champ PV de l'installation P_0 :

$$Y_A = \frac{E_g \text{ [kWh/j]}}{P_0 \text{ [kWc]}} \quad (\text{III.5})$$

Il est exprimé en kWh/(j · kWc) et peut être considéré comme étant le nombre d'heures de fonctionnement par jour du générateur à la puissance nominale P_0 , qui pourrait donner la même énergie journalière générée par le champ PV.

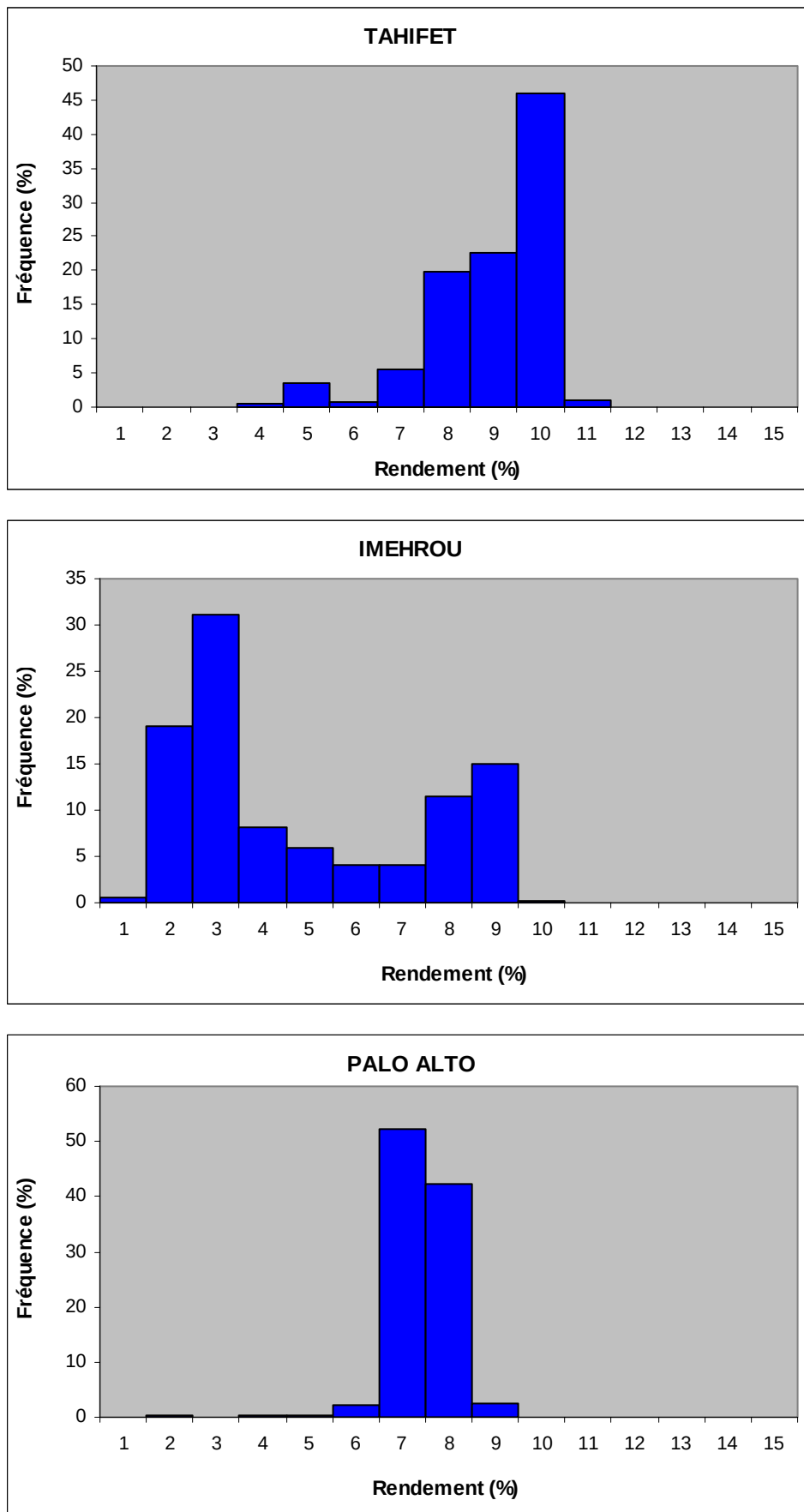


Figure III-13. Histogrammes des rendements journaliers du générateur PV

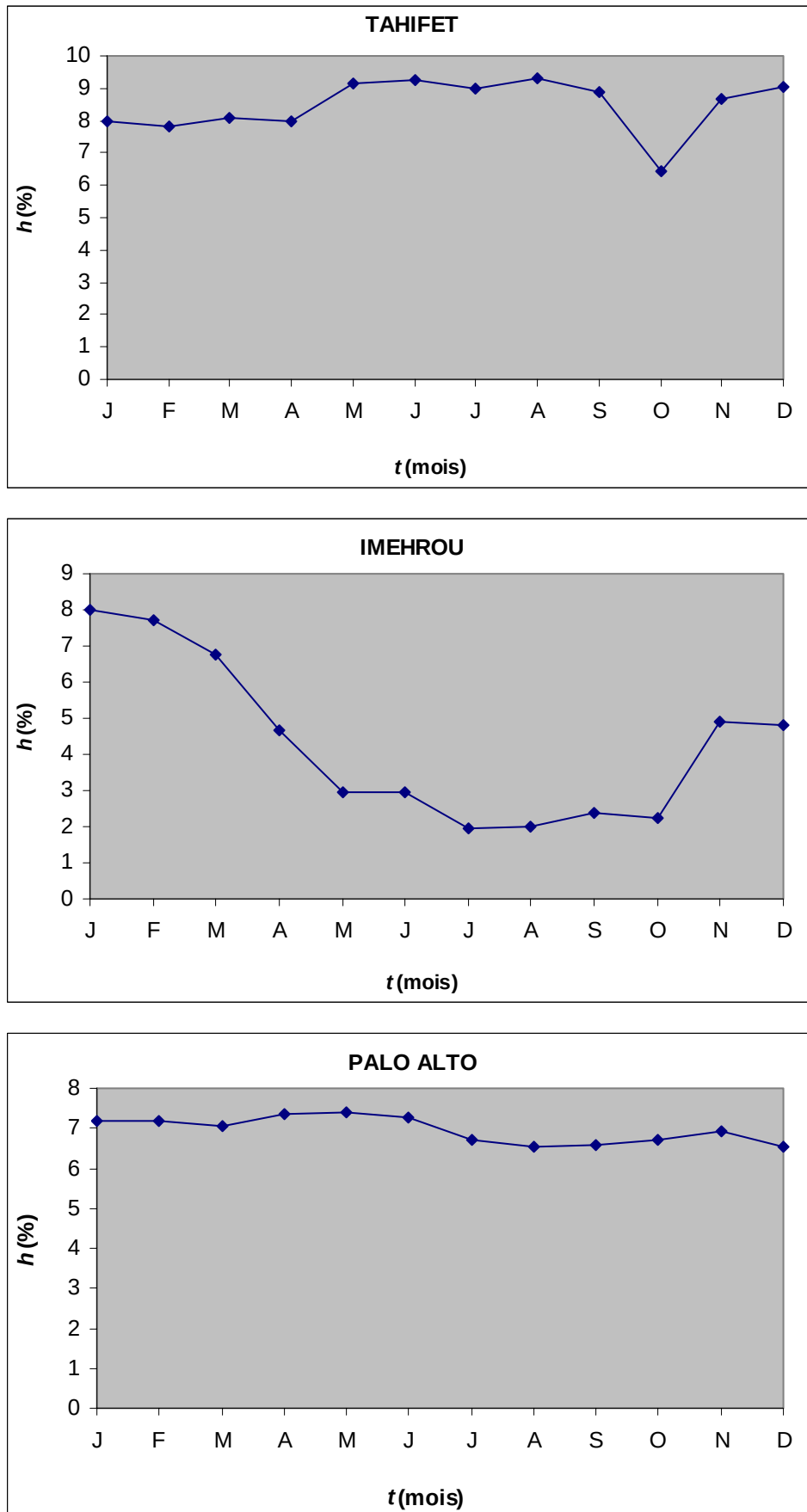


Figure III-14. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle des rendements journaliers

- **Indice de performance final, Y_f**

Noté Y_f , cet indice représente la partie de l'énergie journalière générée par le champ PV directement utilisée par la charge ou injectée dans le réseau $E_{utilisée, PV, jour}$ par kWc de la puissance P_0 :

$$Y_f = \frac{E_{utilisée, PV, jour} \text{ [kWh/j]}}{P_0 \text{ [kWc]}} \quad (III.6)$$

Exprimé en kWh/(j · kWc), il peut être également considéré comme étant le nombre d'heures de fonctionnement par jour de l'installation à la puissance nominale P_0 , qui donnerait la même énergie journalière générée par le champ PV durant le même jour.

- **Indice de performance de référence, Y_r**

L'indice de référence Y_r est l'irradiation globale journalière H divisée par l'éclairement solaire de référence Er ($Er=1\text{kW/m}^2$).

$$Y_r = \frac{H \text{ [kWh/m}^2 \cdot \text{j]}}{Er \text{ [kW/m}^2\text{]}} \quad (III.7)$$

Cet indice a la dimension de [h/j] et peut être considéré comme le nombre d'heures par jour durant lesquelles le rayonnement solaire est égal à l'éclairement de référence et permettant de produire la même énergie incidente mesurée. L'indice de référence Y_r journalier exprimé en [kWh/(j · kWc)] ou [h/j], est donc numériquement égal à l'irradiation solaire incidente, donnée en [(kWh/m²)/j] puisque, par définition le système atteint sa puissance nominale pour l'éclairement de 1 kW/m².

Il est aussi important de définir à partir des différences entre les indices de performance les pertes normalisées suivantes :

- **Les pertes de captations**

$$L_c = Y_r - Y_A \quad (III.8)$$

- **Les pertes du système**

$$L_s = Y_A - Y_f \quad (III.9)$$

Un taux PR appelé « Taux de performance » est défini par :

$$PR = Y_f / Y_r \quad (\text{III.10})$$

Il indique le degré de rapprochement du système PV de « la performance idéale » durant son fonctionnement réel. Le taux de performance nous renseigne donc sur les pertes du générateur PV dues à la température des cellules, l'utilisation incomplète de l'irradiation incidente et les défauts des différentes composantes de l'installation ou les dysfonctionnements.

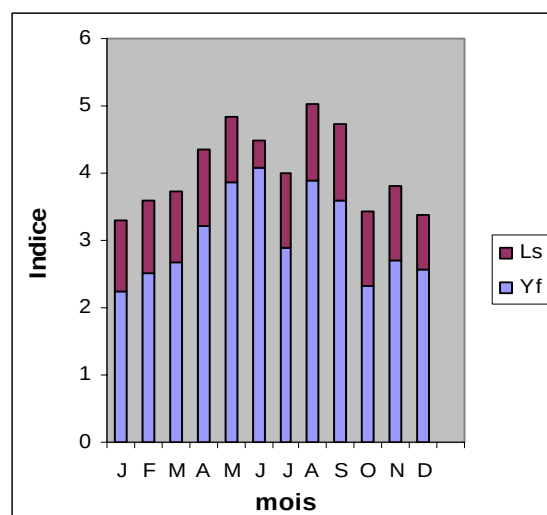
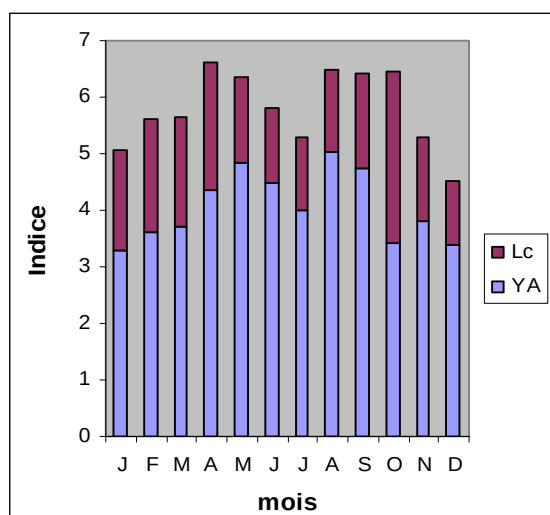
Pour une période de n jours, les indices de performance et les pertes représentent les moyennes des valeurs correspondantes sur la période considérée.

Dans la figure (III-15) nous avons représenté les histogrammes empilés des moyennes mensuelles des indices (Y_A , L_c) et (Y_f , L_s) pour les 3 systèmes PV.

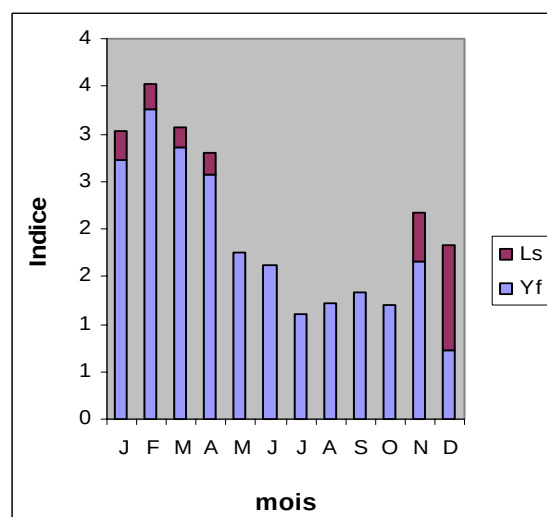
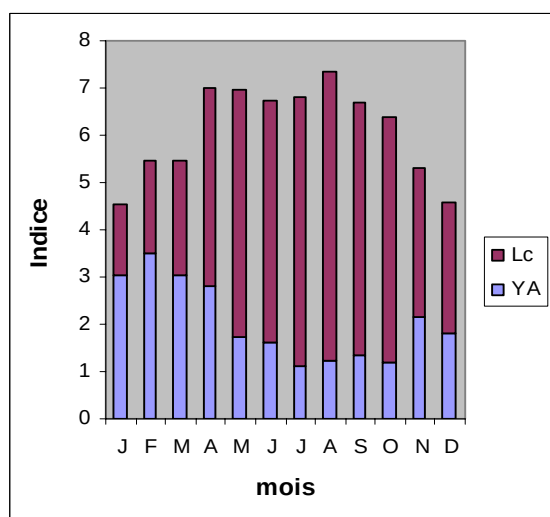
Nous remarquons que le système PV de Tahifet présente une bonne conversion de l'énergie incidente puisque les pertes de captation sont relativement faibles. Ceci est en bon accord avec le rendement qui a été trouvé égal à 8.5 %. L'énergie convertie n'est par contre pas totalement utilisée puisque les pertes du système existent. Ceci nous permet de conclure que le système de Tahifet présente une disponibilité totale.

Le système PV de Imehrou est caractérisé par un taux de conversion de l'énergie incidente très faible. En effet, les pertes de captation sont élevées pour ce système. Ceci est en accord avec le faible rendement de conversion du générateur PV (4.3 %) que nous avons déjà trouvé. Si on regarde les pertes du système L_s , nous remarquons qu'elles sont très faibles (nulles de Mai à Juin). Ceci peut expliquer le faible rendement de conversion de ce système et les valeurs élevées de L_c . En effet, les valeurs faibles de L_s indiquent que la consommation du système de Imehrou est faible. Durant les périodes de fort ensoleillement où on a un excès d'énergie le système de régulation intervient pour déconnecter quelques panneaux solaires afin d'éviter la surcharge de la batterie puisque la charge installée est faible.

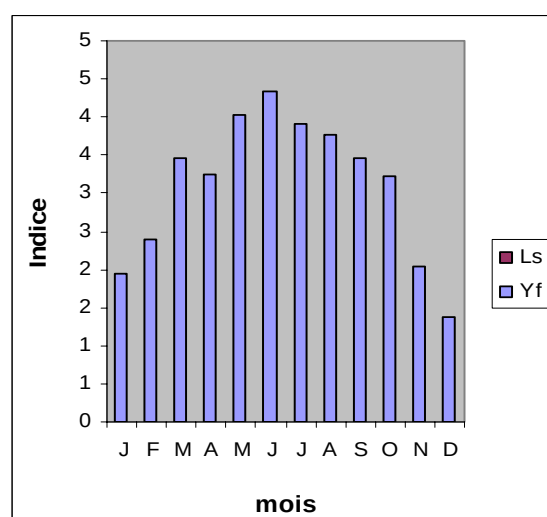
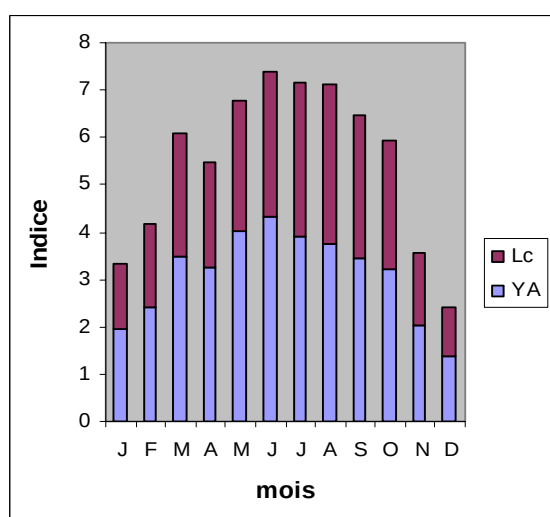
Pour le système de Palo Alto nous notons des pertes de captations acceptables ce qui concorde avec son rendement de conversion (7 %). Les pertes du système quant à elles, sont nulles pour toutes l'année. Ceci s'explique par le type de cette installation (reliée au réseau), donc l'excès d'énergie qui n'est pas consommée n'est pas perdu, il est injecté dans le réseau.



(a)



(b)



(c)

Figure III-15. Moyennes mensuelles des indices de performance Y_A , Y_f et les pertes L_C et L_S
 a) Tahifet b) Imehrou c) Palo Alto

Dans la figure (III-16), nous avons représenté les histogrammes groupés des moyennes mensuelles des taux de performance PR ce qui permet de comparer la performance des différents systèmes étudiés.

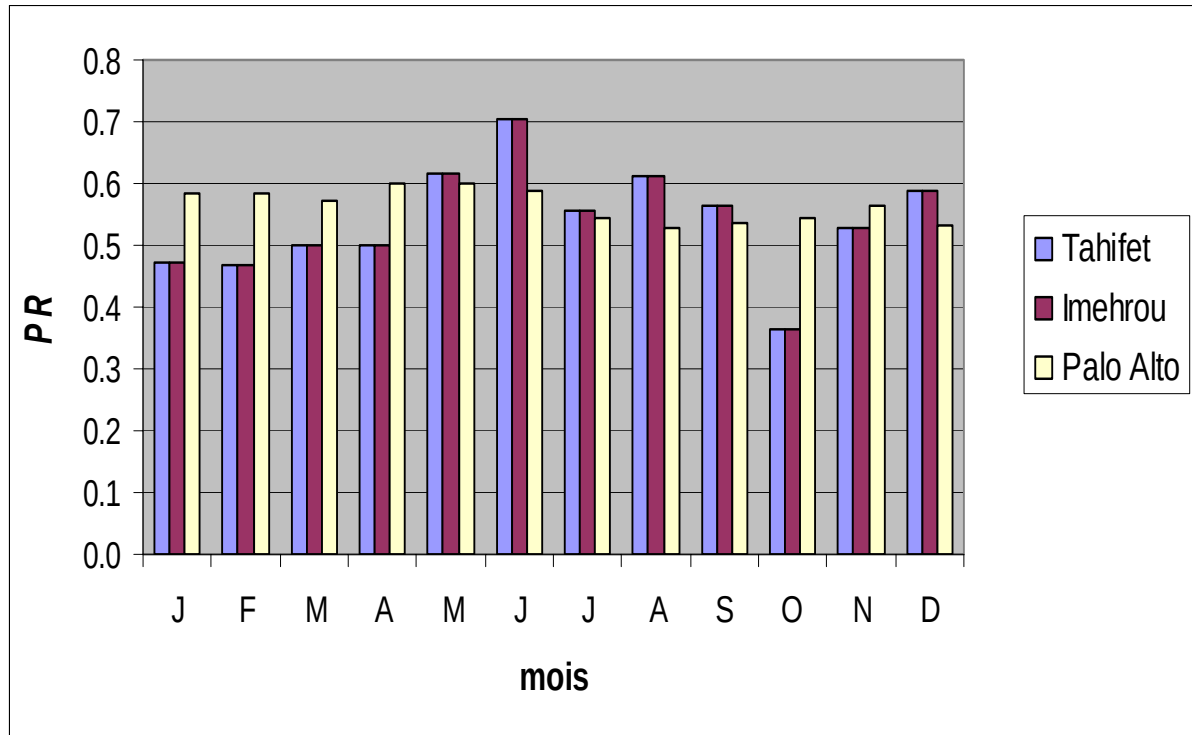


Figure III-16. Moyennes mensuelles des taux de performance PR

Nous remarquons globalement que les systèmes autonomes : Tahifet et Imehrou ont la même performance. Le système relié au réseau : Palo Alto présente une performance plus élevée au cours de la période (Janvier-Avril, Octobre-Novembre), pour les mois restants, la performance de ce système est légèrement plus faible, dû au fait que durant ces mois les systèmes de Tahifet et Imehrou présentent un bon rendement de conversion. Les valeurs élevées de PR pour Palo Alto sont dues à sa configuration (relié au réseau). En effet, pour ce type de systèmes en plus de la consommation de la charge, il y a l'énergie injectée dans le réseau, donc l'énergie totale utilisée est plus élevée et les valeurs de PR également.

Afin de pouvoir appliquer notre méthode d'évaluation de la performance des systèmes photovoltaïques, nous avons déterminé à partir des résultats de la classification établie dans le chapitre 2 une journée type pour chaque classe obtenue.

La journée type correspondant à un ensemble de journées est définie comme étant la journée dont la valeur de l'irradiation est la plus proche de la moyenne des irradiances sur l'ensemble des journées considérées.

Dans la figure (III-17) nous avons représenté les journées types obtenues pour les 3 systèmes étudiés. Pour chaque journée type ainsi obtenue, le rendement de conversion du générateur PV $\eta(j)$, les indices de performance ainsi que les pertes et le taux de performance ont été calculés. D'autre part, pour les mêmes paramètres nous avons calculé les moyennes correspondant aux journées de chaque classe. Les résultats obtenus sont résumés par le tableau (III-2). Les écarts entre les valeurs moyennes et celles des journées types de ces paramètres sont également reportés dans le tableau (III-3).

III. analyse des resultats et discussion

L'étude de la performance des trois systèmes photovoltaïques étudiés à travers le calcul du rendement de conversion du champ PV et des indices de performance pour les journées de chaque classe obtenue montre que pour les systèmes autonomes (Tahifet et Imehrou) le rendement augmente d'autant plus que la journée est perturbée. Ceci est dû à la saturation de la batterie d'accumulateurs lorsqu'il y a un important apport d'énergie solaire (journée à ciel clair), ce qui conduit à la déconnexion de quelques modules solaires. Cette constatation est corroborée par les pertes de captation qui sont plus élevées pour les journées à ciel clair. Pour le système relié au réseau (Palo Alto) le rendement ne diffère pas beaucoup pour les 3 types de journées puisqu'il n'y a pas de saturation de batterie.

Par contre, les indices de performance Y_A et Y_f augmentent en général d'autant plus que la journée est moins perturbée puisque dans ce cas là les énergies convertie et incidente sont plus importantes. Le Y_f quant à lui est plus faible pour les journées perturbées, ceci s'explique par le fait que par définition Y_f est la partie de l'énergie convertie consommée par la charge, donc Y_f suit Y_A .

Les mêmes observations sont valables pour les valeurs du rendement et des indices de performance correspondant aux journées types.

Par ailleurs, si on compare les valeurs moyennes et celles correspondant aux journées types nous constatons que mise à part la classe 2 de Imehrou elles sont presque similaires puisque l'écart maximum observé est de 0.3 (pour Y_A des classes 2 et 3 de Tahifet). En outre, le décalage un peu plus grand observé entre les Y_f pourrait être expliqué par le fait que la consommation utilisée dans les trois systèmes est aléatoire et non constante.

Cependant, pour le rendement η et l'indice Y_A nous observons un décalage assez élevé entre les valeurs moyennes et celles des journées types pour la classe 2 de Imehrou. Pour comprendre cette anomalie, nous avons procédé à un examen minutieux des journées de cette classe. Nous avons trouvé que les rendements de conversion du champ PV de ces journées sont très différents et donc Y_A également, ceci est probablement dû à la déconnexion des panneaux solaires lorsque la consommation est faible, ce qui influe sur la moyenne du rendement et de Y_A de ces journées.

Les résultats de l'application de notre méthode d'évaluation de la performance des systèmes PV que nous venons d'exposer dans ce chapitre sont globalement satisfaisants hormis quelques anomalies dues au surdimensionnement des systèmes PV étudiés. D'autres résultats meilleurs pourraient être obtenus avec des données à un pas de temps plus fin (1 minute).

Ces résultats nous permettent de conclure qu'avec une journée de chaque type de temps caractérisant un site donné, il est possible d'avoir un aperçu rapide sur la performance du système photovoltaïque qui y est installé quelque soit sa configuration (autonome ou relié au réseau) sans avoir à utiliser toute la banque de données.

Ainsi, l'idée de notre méthode d'évaluation de la performance des systèmes PV est comme suit. Pour un site donné et en utilisant des séries de données d'éclairements solaires mesurées, nous procédons à la construction de journées types en utilisant la méthode de classification fractale proposée. Les journées types obtenues seront ensuite utilisées pour l'étude de performance de n'importe quel autre système PV installé dans ce site. Ceci est possible puisque la méthode de classification est basée sur les éclairements solaires, qui ne changent pas pour un même site. L'analyse de performance de ces systèmes PV sera alors réduite à trois cas types.

Afin de mieux exploiter la méthode que nous venons de présenter il est nécessaire de diviser les régions où sont installés les systèmes PV en des zones selon l'irradiation reçue, la méthode de classification sera alors appliquée à chaque zone pour déterminer les journées types correspondantes. Ainsi, on aura réalisé une cartographie de journées types qui permettra l'étude de la performance de n'importe quel système.

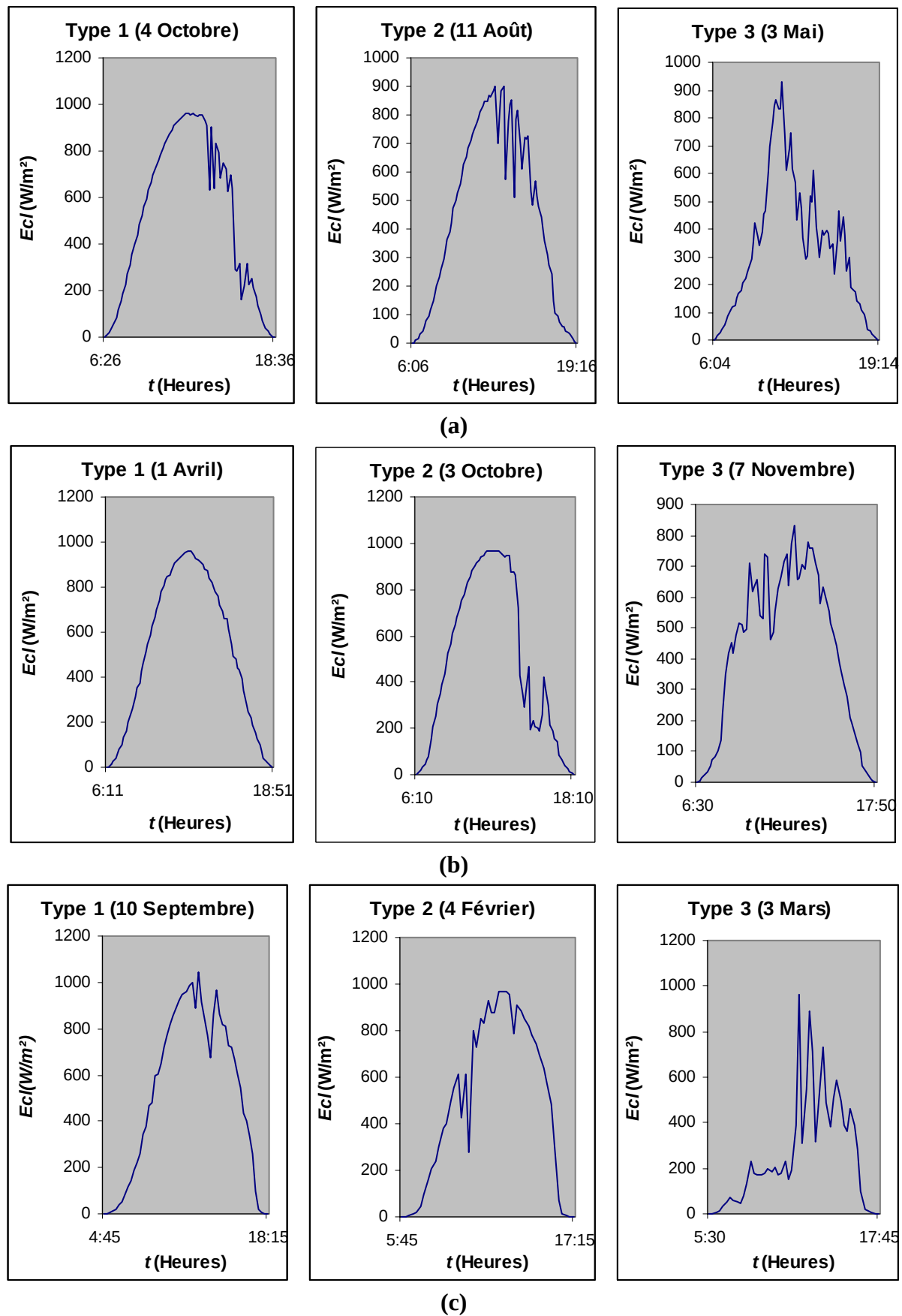


Figure III-17. Courbes d'éclairements solaires des journées types
a) Tahifet b) Imehrou c) Palo Alto

	η	Y_A	Y_f	Y_r	L_C	L_S	PR
Moyennes de la classe 1	0.081	4.28	3.06	6.37	2.09	1.22	0.48
Moyennes de la classe 2	0.088	4.38	3.43	5.93	1.56	0.95	0.58
Moyennes de la classe 3	0.091	3.37	2.79	4.44	1.07	0.58	0.65
Journée type de la classe 1	0.082	4.36	2.65	6.38	2.39	1.26	0.45
Journée type de la classe 2	0.094	4.68	3.51	5.94	1.26	1.17	0.59
Journée type de la classe 3	0.098	3.67	3.42	4.47	0.80	0.25	0.76

TAHIFET							
	η	Y_A	Y_f	Y_r	L_C	L_S	PR
Moyennes de la classe 1	0.040	2.08	1.85	6.57	4.49	0.23	0.29
Moyennes de la classe 2	0.044	2.09	1.85	6.04	3.95	0.23	0.32
Moyennes de la classe 3	0.050	1.89	1.73	4.79	2.90	0.16	0.38
Journée type de la classe 1	0.039	2.15	2.15	6.57	4.42	0.00	0.33
Journée type de la classe 2	0.021	1.04	1.04	6.03	4.99	0.00	0.17
Journée type de la classe 3	0.040	1.60	1.60	4.83	3.23	0.00	0.33

IMEHROU							
	η	Y_A	Y_f	Y_r	L_C	L_S	PR
Moyennes de la classe 1	0.068	3.87	3.84	6.99	3.12	0.03	0.55
Moyennes de la classe 2	0.071	3.34	3.34	5.81	2.47	0.00	0.58
Moyennes de la classe 3	0.071	1.88	1.88	3.20	1.32	0.00	0.57
Journée type de la classe 1	0.066	3.73	3.73	6.95	3.23	0.00	0.54
Journée type de la classe 2	0.068	3.18	3.18	5.79	2.61	0.00	0.55
Journée type de la classe 3	0.079	2.06	2.06	3.23	1.17	0.00	0.64

PALO ALTO							
-----------	--	--	--	--	--	--	--

Tableau III-2. Comparaison entre les valeurs moyennes des indices de performance journaliers calculés pour chaque classe et celles obtenues pour les journées types (les indices de performance et les pertes sont exprimés en (kWh/j)/kWc)

	η	Y_A	Y_f	Y_r	P_C	P_S	PR
TAHIFET	0.001	0.08	0.41	0.01	0.30	0.04	0.03
	0.006	0.30	0.08	0.01	0.30	0.22	0.01
	0.007	0.30	0.63	0.03	0.27	0.33	0.11
IMEHROU	0.001	0.07	0.30	0.00	0.07	0.23	0.04
	0.023	1.05	0.81	0.01	1.04	0.23	0.15
	0.010	0.29	0.13	0.04	0.33	0.16	0.05
PALO ALTO	0.002	0.14	0.11	0.04	0.11	0.03	0.01
	0.003	0.16	0.16	0.02	0.14	0.00	0.03
	0.008	0.18	0.18	0.03	0.15	0.00	0.07

Tableau III-3. Ecarts entre les valeurs moyennes et celles des journées types des indices de performance et du rendement de conversion du générateur PV

CHAPITRE 4

CHAPITRE 4

IDENTIFICATION DE LA PERSISTANCE A LONG TERME DANS LES SÉRIES DU RAYONNEMENT SOLAIRE À L'AIDE DE LA DIMENSION FRACTALE

I. INTRODUCTION

La persistance des états de temps aux échelles courtes est un phénomène bien connu en climatologie [147]. Un jour ensoleillé a plus de chance d'être suivi d'un jour ensoleillé que d'un jour pluvieux et vice versa. Ainsi, ce type de persistance à court terme habituellement s'arrête après environ une semaine, qu'en est-il alors pour des échelles plus longues ?

Dans le chapitre 1, nous avons démontré que les données du rayonnement solaire suivent une loi en puissance vue qu'une linéarité a été trouvée dans les tracés log-log. Ceci démontre leur caractère d'auto-affinité ou fractalité.

B. Mandelbrot caractérisa les processus fractals par une "mémoire longue" ou ce qui est appelé "la dépendance à long terme" (long range). "La mémoire longue" décrit la corrélation des séries temporelles à des échelles longues. Cette corrélation est désignée par le terme de "persistance à long terme".

Dans ce chapitre nous examinons la persistance à long terme des données d'irradiation solaire. Notre but est alors de déterminer si "la mémoire longue" existe dans les séries du rayonnement solaire dont la corrélation à des échelles longues permet leur prédiction. Ceci a un impact important dans la météorologie et l'étude des systèmes énergétiques.

Grâce à une banque de données de l'irradiation solaire : journalière et annuelle, nous testons la persistance à long terme de cette variable climatique à travers la mesure de sa dimension fractale estimée avec la méthode du "Recouvrement rectangulaire" que nous avons déjà établie au chapitre 1.

Nous commençons ce chapitre d'abord par une synthèse des différentes méthodes ou techniques de quantification de la persistance à long terme des séries temporelles déjà existantes. Ensuite, nous appliquerons la méthode du "Recouvrement rectangulaire" à l'étude de la persistance des irradiances solaires. Ainsi, les données expérimentales utilisées dans cette étude seront présentées en détail. A la fin, nous exposerons et discuterons les résultats obtenus en terminant par une conclusion.

II. TECHNIQUES DE MESURE DE LA PERSISTANCE A LONG TERME DANS LES SÉRIES TEMPORELLES

Un certain nombre d'approches est habituellement utilisé pour quantifier la persistance à long terme dans les séries temporelles. Nous présenterons dans ce paragraphe les techniques suivantes : l'analyse du semivariogramme, l'analyse spectrale, l'analyse des ondelettes, l'analyse de l'échelle réduite (R/S) et l'analyse de fluctuation (DFA).

Cependant, il est à noter que la notion de "persistance" utilisée ici diffère légèrement de la "persistance" en climatologie. Cette dernière définit la "persistance" comme étant la continuité d'un état donné. Ici, le terme de "persistance" désigne le fait qu'une tendance de croissance (décroissance) dans le passé implique respectivement une tendance de croissance (décroissance) dans le futur. Par contre, une tendance de croissance (décroissance) dans le passé impliquant une tendance de décroissance (croissance) dans le futur est désignée par "anti-persistance".

II.1. Fonction d'auto-corrélation et semivariogramme

Dans beaucoup de cas, la persistance (ou anti-persistance) des séries temporelles peut-être quantifiée en utilisant la fonction d'auto-corrélation r [148].

Le tracé de $r(s)$ en fonction de s est appelé *corrélogramme*. Les valeurs élevées de $r(s)$ indiquent une forte corrélation entre les points $(s, r(s))$ qui sont séparés par un intervalle s , les valeurs faibles de $r(s)$ indiquent par contre une faible corrélation et les valeurs nulles de $r(s)$ indiquent une non-corrélation (bruit blanc).

Ici, la persistance peut-être définie par la séquence de $r(s)$ ayant des valeurs positives. Si les valeurs de $r(s)$ sont élevées mais tendent rapidement vers 0, nous avons un exemple de forte persistance à travers un petit intervalle de valeurs (courtes échelles). Si les valeurs de $r(s)$ sont faibles (non-nulles) et restent faibles pour de très larges intervalles (longues échelles) la persistance est alors faible et à long terme.

Cependant, il est inadéquat d'utiliser les corrélogrammes pour les séries temporelles non stationnaires. Une autre alternative pour mesurer la corrélation à long terme, valable pour les séries temporelles stationnaires et non stationnaires est le semivariogramme [149].

Pour des séries temporelles discrètes, y_n , $n=1,2,3,\dots,N$, le semivariogramme y_k est donné par :

$$y_k = \frac{1}{2(N-k)} \sum_{n=1}^{N+k} (y_{n-k} - y_n)^2 \quad (\text{IV.1})$$

La mesure de la persistance des séries temporelles auto-affines à l'aide du semivariogramme est basée sur le fait que y_k de l'équation (IV.1), est proportionnel au pas de temps k selon la relation :

$$y_k \approx k^{2Ha} \quad (IV.2)$$

Où Ha est l'exposant de Hausdorff qui est relié à la dimension fractale D par : $Ha = 2 - D$. Ce paramètre situé entre 0 et 1 est déduit de la pente de la droite $\ln(y_k) = f(\ln(k))$. L'exposant de Hausdorff Ha permet alors de quantifier la persistance des séries temporelles auto-affines comme suit :

- $0 \leq Ha < 0.5 \rightarrow$ persistance
- $0.5 < Ha \leq 1 \rightarrow$ anti-persistance
- $Ha = 0.5 \rightarrow$ pas de corrélation (bruit blanc).

II.2. L'analyse spectrale

Une série temporelle peut-être décrite aussi bien dans le domaine temporelle, que dans le domaine fréquentielle. Pour ce dernier, la transformée de Fourier discrète Y_m est utilisée. La fonction de la densité de puissance spectrale, S_m , pour une série temporelle discrète y_n , $n=1, 2, 3, \dots, N$, peut-être écrite comme suit [150] :

$$S_m = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \frac{2|Y_m|^2}{N\delta} \right\}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} \quad (IV.3)$$

où δ est l'intervalle de temps entre les n successifs.

Pour les séries temporelles auto-affines, la densité de puissance spectrale S_m , est caractérisée par une loi en puissance dépendant de la fréquence.

$$S_m \approx f_m^{-\beta}, \quad m = 1, 2, 3, \dots, \frac{N}{2} \quad (IV.4)$$

où $f_m = m / N$. La valeur de β est la mesure de la persistance dans les séries temporelles. Elle est obtenue à partir du négatif de la pente de la droite de régression ajustant le tracé de S_m en fonction de f_m dans l'échelle logarithmique. D'après Voss [151], l'exposant β est relié à la dimension fractale D par : $\beta = 5 - 2D$.

Nous avons vu précédemment que pour les courbes fractales auto-affines D varie de 1 à 2, nous avons alors $1 \leq \beta \leq 3$ et la persistance est classée comme suit :

- $\beta = 2 \rightarrow$ il n'y a pas de corrélation entre les valeurs de la série temporelle (mouvement Brownien).
- $1 \leq \beta < 2 \rightarrow$ anti-persistance
- $2 < \beta \leq 3 \rightarrow$ persistance.

II.3. L'analyse des ondelettes

La transformée d'ondelettes introduite par Grossmann et Morlet [152] procure des informations sur la dépendance fréquentielle et spatiale des séries temporelles. Ainsi, elle permet de contourner certains inconvénients de la transformée de Fourier tel que son incapacité de procurer une résolution spatiale.

La transformée des ondelettes est un filtre $g[(t' - t)/a]$ passant le long de la série temporelle $f(t')$. La largeur réelle de ce filtre augmente généralement par puissance de 2. La forme générale de la transformée des ondelettes est donnée par :

$$W(t, a) = \frac{1}{a^{1/2}} \int_{-\infty}^{+\infty} g\left(\frac{t' - t}{a}\right) f(t') dt' \quad (\text{IV.5})$$

Le filtre est centré en t , avec a le paramètre de proportionnalité. La largeur réelle du filtre est prise comme étant une constante multiple du paramètre a . Les faibles valeurs de ce paramètre correspondent à de hautes fréquences alors que ses valeurs élevées correspondent aux faibles fréquences.

La quantité $g(t')$ est appelée "l'ondelette mère". L'ondelette "Mexican hat" est l'ondelette mère la plus utilisée, sa forme générale est donnée par [153]:

$$W(t, a) = \left(\frac{1}{2a\pi}\right)^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[1 - \left(\frac{t' - t}{a}\right)^2\right] e^{-(1/2)((t' - t)/a)^3} f(t') dt' \quad (\text{IV.6})$$

La largeur réelle de ce filtre est $16a$.

Afin de quantifier la persistance d'une série temporelle on se base sur la relation de proportionnalité suivante :

$$V_w \approx a^{H_w} \quad (\text{IV.7})$$

où V_w est la variance de W .

Il a été démontré [153] que le paramètre H_w est lié au paramètre β de l'analyse spectrale par :

$\beta = H_w$ pour $-3 \leq \beta \leq 5$. Ainsi, pour une série temporelle fractale auto-affine nous avons les résultats suivants :

- $H_w = 2 \rightarrow$ Pas de corrélation entre les valeurs de la série temporelle
- $1 \leq H_w < 2 \rightarrow$ anti-persistance
- $2 < H_w \leq 3 \rightarrow$ persistance.

II.3. L'analyse des étendues normalisées (Rescaled Range Analysis)

Une autre approche pour quantifier la persistance à long terme dans les séries temporelles est la méthode statistique développée par l'hydrologue anglais *Hurst* en 1965 appelée analyse des étendues normalisées, ou *Rescaled Range Analysis (R/S Analysis)*. Cette méthode est décrite en détail dans le livre très intéressant de *Hurst* [154].

Ce dernier a consacré ses recherches scientifiques à l'étude de la rivière du Nile ainsi qu'aux problèmes relatifs au stockage de l'eau. Ainsi, *Hurst* considérait le flux de la rivière comme une série temporelle et détermina les limites du stockage pour un réservoir idéal qui ne doit jamais être vide ou débordé d'eau [155]. Basée sur les résultats de ces études, *Hurst* développa alors le concept de l'analyse des étendues normalisées.

Soit une série temporelle discrète de N nombres, notés $x(t)$, $t = 1, 2, 3 \dots N$. La méthode préconisée par *Hurst* consiste à prendre en considération une série de subdivisions indépendantes, d'effectif τ . Pour chaque subdivision considérée, la moyenne des τ données est :

$$\langle X \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} x(t) \quad (\text{IV.8})$$

Pour chaque subdivision, on centralise les données, en leur soustrayant la moyenne locale. Puis on établit une série de valeurs cumulées à l'intérieur de chaque période : on ajoute à chaque donnée la somme des valeurs centrées qui la précèdent:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \left\{ x(u) - \langle x \rangle_\tau \right\} \quad (\text{IV.9})$$

L'étendue $R(\tau)$ (*range*) est la différence entre le minimum et le maximum de $X(t, \tau)$

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\text{IV.10})$$

Pour l'exemple du réservoir idéal d'une rivière qui ne doit être ni débordée ni vide, R représente la capacité de ce réservoir. On peut clairement remarquer à partir de l'équation (IV.11) que l'étendue R augmente avec l'augmentation de τ .

Cette étendue est ensuite normalisée au moyen d'une division par l'écart-type $S_t(\tau)$ donnée par :

$$S_t(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (x(t) - \langle x \rangle_{\tau})^2 \right)^{1/2} \quad (\text{IV.11})$$

Hurst a démontré que pour beaucoup de séries temporelles le rapport R/S_t suit la relation empirique suivante :

$$R / S_t = (a \tau)^H \quad (\text{IV.12})$$

Où a est une constante et H est l'exposant de Hurst. H peut être estimé à partir de la pente de la droite de régression log/log de R/S_t sur τ en utilisant la méthode des moindres carrés comme le montre l'équation suivante:

$$\log(R / S_t) = H \log \tau + \text{constante} \quad (\text{IV.13})$$

L'exposant de Hurst qui est compris entre 0 et 1 permet la mesure de la persistance de la série temporelle. Ainsi :

- Pour un processus purement aléatoire dont les séquences sont indépendantes, $H = 0.5$.
- Pour $H > 0.5$, la série temporelle présente une persistance, dans ce cas, la tendance actuelle du processus est maintenue, c.a.d, si durant une période de croissance (décroissance) du processus une croissance (décroissance) est observée, on pourra prédire sa croissance (décroissance) dans le futur. La force du phénomène de persistance croît lorsque H approche de 1.
- Pour $H < 0.5$, la série présente une anti-persistance : Après une période de croissance (décroissance) on peut prédire sa décroissance (croissance).

L'analyse de Hurst est délicate pour les séries brèves. Des fluctuations importantes peuvent être obtenues avec des séries de moins de 500 données. L'exposant de Hurst est sensible à la taille de l'échantillon. Ainsi, De la Fuente *et al.* [156] montrent que l'exposant obtenu pour la composante x de l'attracteur de Lorenz est égale à 0.82 pour 5000 données, et 0.62 pour

40000. Par contre, pour un intervalle de temps donné, l'exposant de Hurst ne dépend pas de la fréquence d'échantillonnage [156].

II.4. L'analyse des fluctuations redressées (Detrended Fluctuation Analysis)

La plupart des séries temporelles réelles ne sont pas stationnaires. Afin de contourner ce problème, l'analyse des fluctuations redressées (DFA) a été alors proposée par Peng *et al.* [157]. Cette analyse redresse les données à l'intérieur de chaque fenêtre analysée. Ainsi, l'avantage majeur de la DFA par rapport à beaucoup d'autres méthodes est qu'elle permet de détecter la corrélation à long terme dans les séries temporelles non stationnaires ou bruitées.

Dans une première étape, la série originale $x(i)$ est intégrée. Pour cela on remplace chaque donnée par la somme cumulée des écarts à la moyenne :

$$y(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \langle x \rangle] \quad (\text{IV.14})$$

Où :

$$\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x(j) \quad (\text{IV.15})$$

Ensuite, la série intégrée est divisée en fenêtres indépendantes de longueur équivalente n . Dans chaque fenêtre de longueur n , une droite des moindres carrés est estimée, représentant la tendance de cette fenêtre. On note $y_n(k)$ les coordonnées y sur ces droites. La série intégrée est ensuite redressée en retranchant la tendance locale, dans chaque fenêtre ($y(k) - y_n(k)$). Pour une longueur de fenêtre donnée, la grandeur caractéristique des fluctuations pour cette série intégrée et redressée est :

$$F_l(n) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N [y(k) - y_n(k)]^2} \quad (\text{IV.16})$$

Ce calcul est répété pour toutes les tailles de fenêtre pour produire une relation entre n et $F_l(n)$. De manière typique, $F_l(n)$ croît avec n . Une relation linéaire, sur un graphe log-log révèle la présence d'une loi en puissance entre $F_l(n)$ et n :

$$F_l(n) \approx n^\alpha \quad (\text{IV.17})$$

La pente de la droite $F_l(n)$ en fonction de n dans l'échelle logarithmique correspond au paramètre α , celui-ci représente l'indice de corrélation dans le signal. Ainsi :

- $\alpha = 0.5 \rightarrow$ Pas de corrélation
- $\alpha < 0.5 \rightarrow$ le signal est anti-persistant
- $\alpha > 0.5 \rightarrow$ le signal est persistant

III. ETUDE DE LA PERSISTANCE DES IRRADIATIONS SOLAIRES A L'AIDE DE LA DIMENSION FRACTALE

III.1. Principe

Quoiqu'elles diffèrent par leurs principes de base, les différentes techniques de quantification de la persistance à long terme des séries temporelles que nous venons de présenter se rejoignent toutes en un point commun. C'est le fait qu'elles mesurent la persistance à travers le calcul d'un exposant ou paramètre caractérisant la technique elle-même : H_a pour le semivariogramme, β pour l'analyse spectrale, H_w pour l'analyse des ondelettes, α pour la DFA et le coefficient de Hurst H pour l'analyse R/S.

Pour les signaux auto-affins ou fractals, ces paramètres représentent également un indicateur de la « rugosité » du signal ce qui est le rôle même de la dimension fractale. En effet, il a été démontré que les différents paramètres caractérisant les méthodes de mesure de la persistance à long terme sont reliés à la dimension fractale [153]. Par exemple, l'exposant de Hurst H (le plus utilisé comme indice de persistance) est lié à la dimension fractale D par la relation : $D = 2 - H$.

Ainsi, en se référant aux valeurs de H donnant la persistance des séries temporelles nous déduisons que D entre 1 et 1.5 montre la persistance dans la série. Pour des valeurs de D supérieurs à 1.5, c'est exactement l'inverse, la série présente une anti-persistance. La valeur de D égale à 1.5 signifie une non corrélation entre les valeurs de la série temporelle (bruit blanc).

Ainsi, plus le signal est régulier ou lisse (D se rapproche de 1) plus nous avons une forte persistance. En revanche, plus le signal est irrégulier (D se rapproche de 2) plus le signal est anti-persistant. En résumé, l'éloignement de D de la valeur 1.5 montre l'existence d'une corrélation (positive ou négative) à long terme des valeurs de la série temporelle.

Dans ce paragraphe, nous proposons donc de mesurer la corrélation ou la persistance à long terme des données d'irradiations solaires en utilisant la dimension fractale comme indice de persistance. Pour cela, nous allons utiliser la méthode du « Recouvrement rectangulaire » que nous avons développé au chapitre 1 pour l'estimation de ce paramètre.

III.2. Données expérimentales

Afin de mettre en œuvre la méthode d'évaluation de la persistance à long terme à l'aide de l'analyse fractale, nous avons utilisé une banque de données des irradiances solaires : journalières et annuelles.

▪ Echelle journalière

La banque de données journalière utilisée dans notre travail a été prise à partir du site de SRML (Solar Radiation Monitoring Laboratory) de l'université de Oregon [158]. Elle est constituée des irradiances solaires globales journalières enregistrées sur plan horizontal dans le site de Barro Colorado Island (BCI) (Latitude : $9^{\circ}10'N$, longitude : $79^{\circ}51'W$, altitude : 137 m) situé dans la république de Panama. La carte de la figure (IV-1) montre la localisation de BCI ainsi que de la tour « Lutz » où s'est effectuée l'acquisition des données.

Ces dernières ont été mesurées grâce au pyranomètre « Li-Cor LI200SB » qui est relié au système d'acquisition de données et ceci au cours de la période (1990-2004).

La figure (IV-2) montre l'évolution annuelle (exemple de l'année 2003) et pluriannuelle (sur toute la période étudiée) de l'irradiation journalière.

▪ Echelle annuelle

Les données annuelles utilisées sont des données d'irradiances globales moyennes enregistrées à des latitudes et longitudes différentes aux Etats-Unis d'Amérique (USA) au cours de la période (1895-2009). La série correspondant à l'intervalle (1895-1993) est une série historique enregistrée. Par contre celle correspondant à (1994-2009) est une série simulée à partir de modèles élaborés par « UKMO/Hadley Center ».

Les deux séries : historique et simulée ont été collectées par VEMAP (Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project) au sein du centre NCAR (National Center for Atmospheric Research) et nous ont été fournies par le site de la NASA : EOS-WEBSTER (WEB-based System for Terrestrial Ecosystem Research) de l'Université de New Hampshire [159].

Les figures (IV-3) et (IV-4) illustrent des exemples d'évolution de la série historique seulement (1895-1993) et celle de la série globale (1895-2009) pour des latitudes et longitudes données.

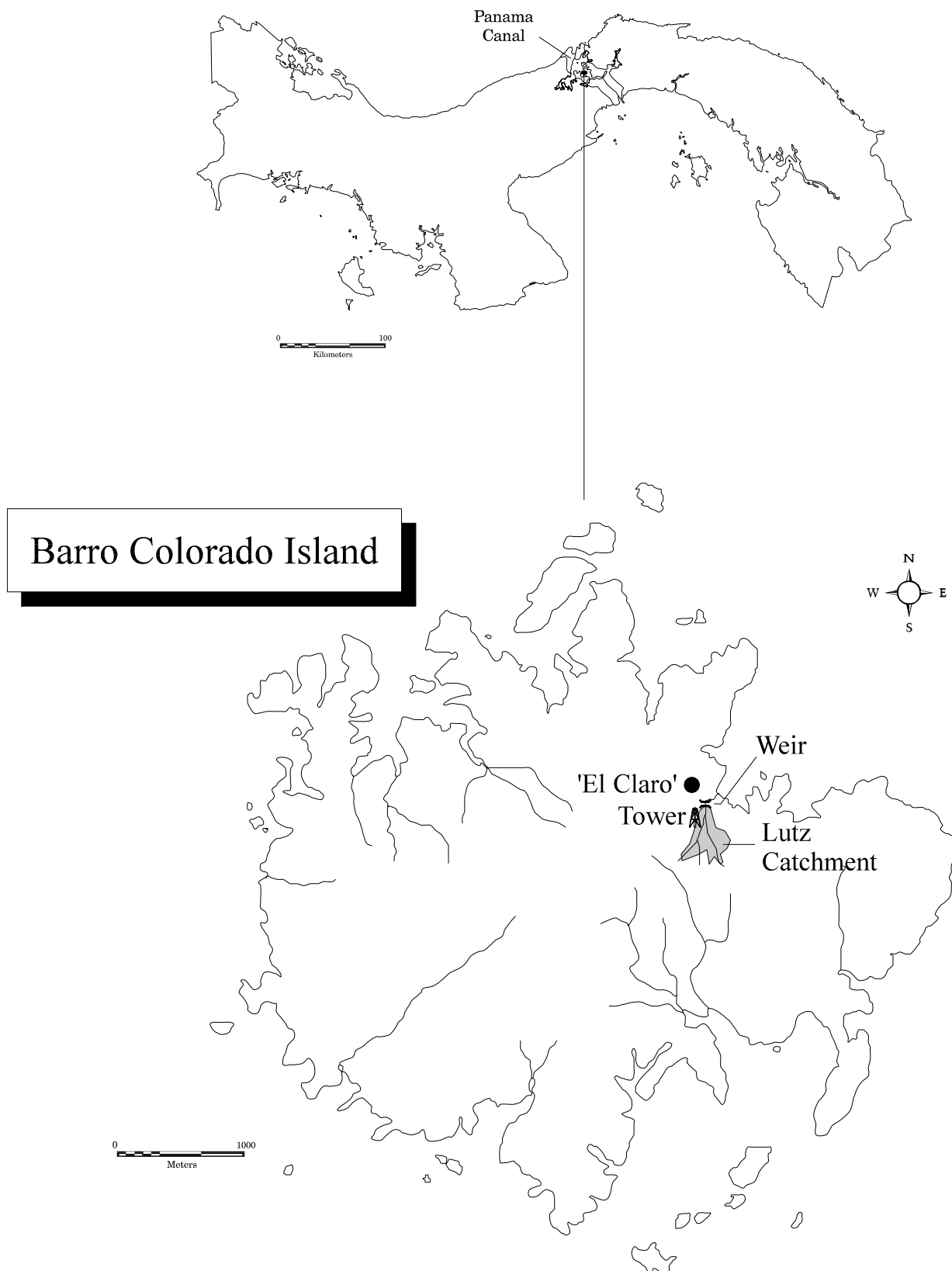
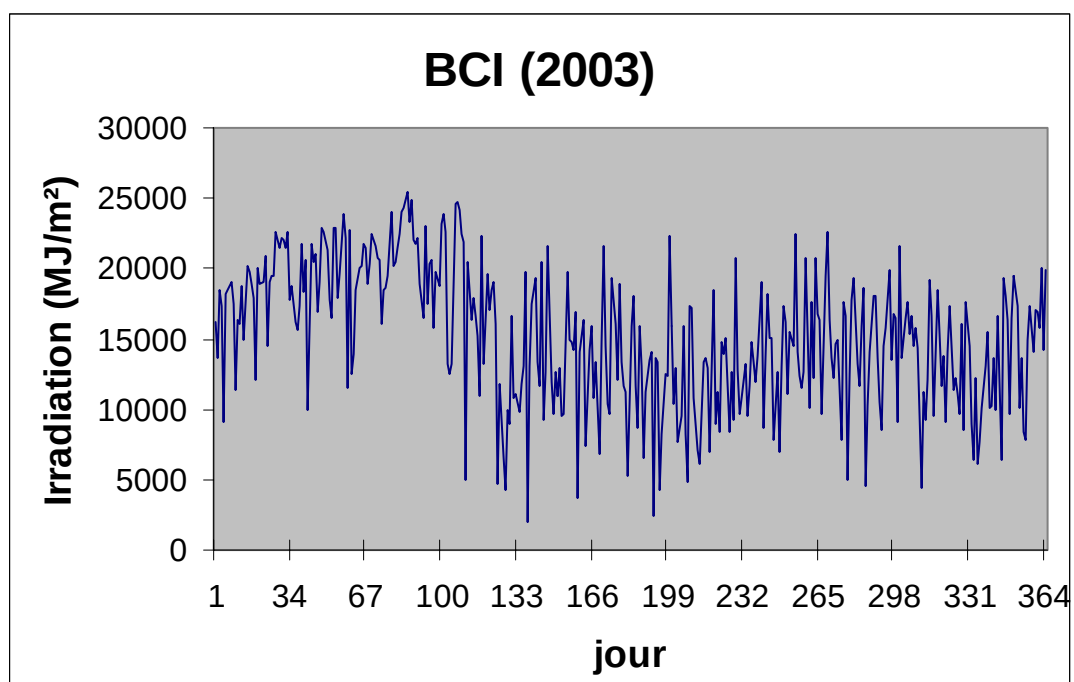
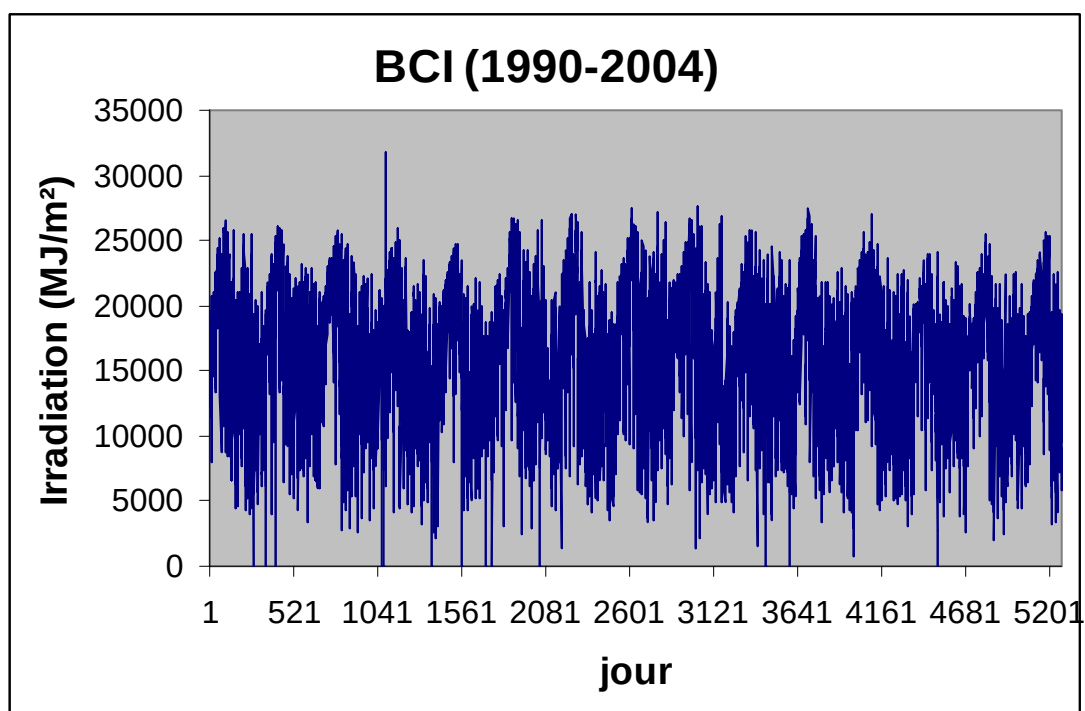


Figure IV-1. Localisation de Barro Colorado Island (BCI) et la tour « Lutz »



(a)



(b)

Figure IV-2. Evolution annuelle (a) et pluriannuelle (b) de l'irradiation journalière de BCI

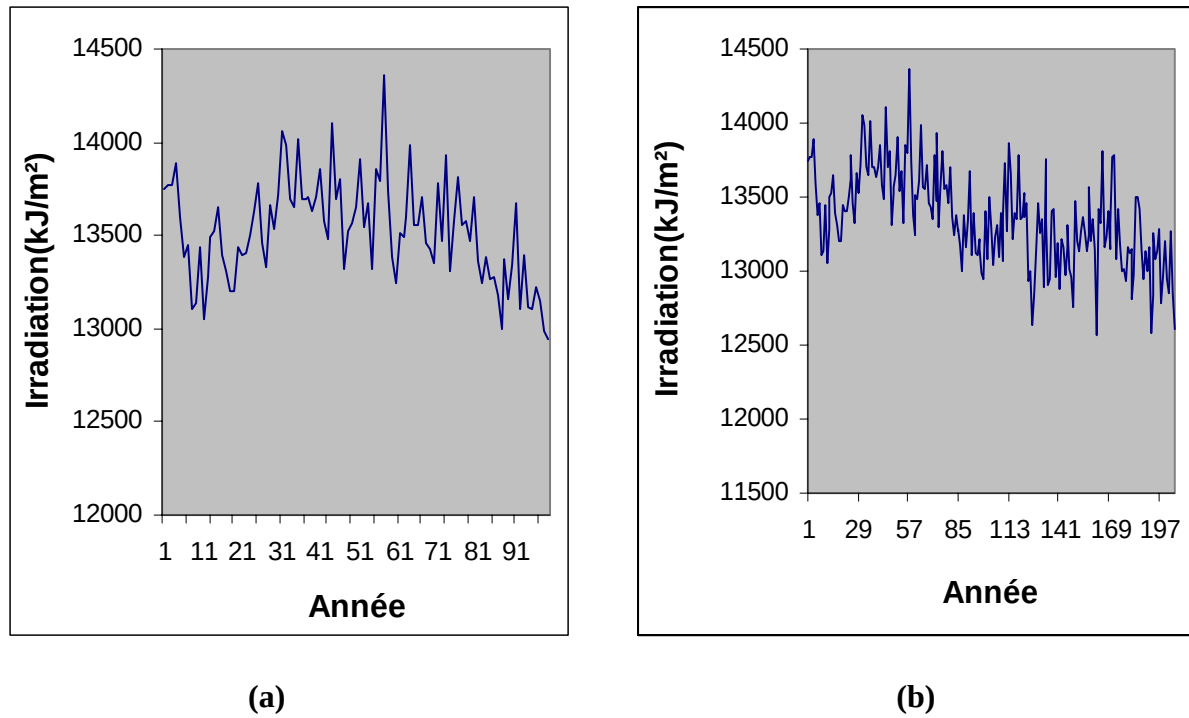


Figure IV-3. Evolution des irradiances annuelles pour une longitude de -122.75 et une latitude de 48.75 **a)** Période (1895-1993) **b)** Période (1895-2099)

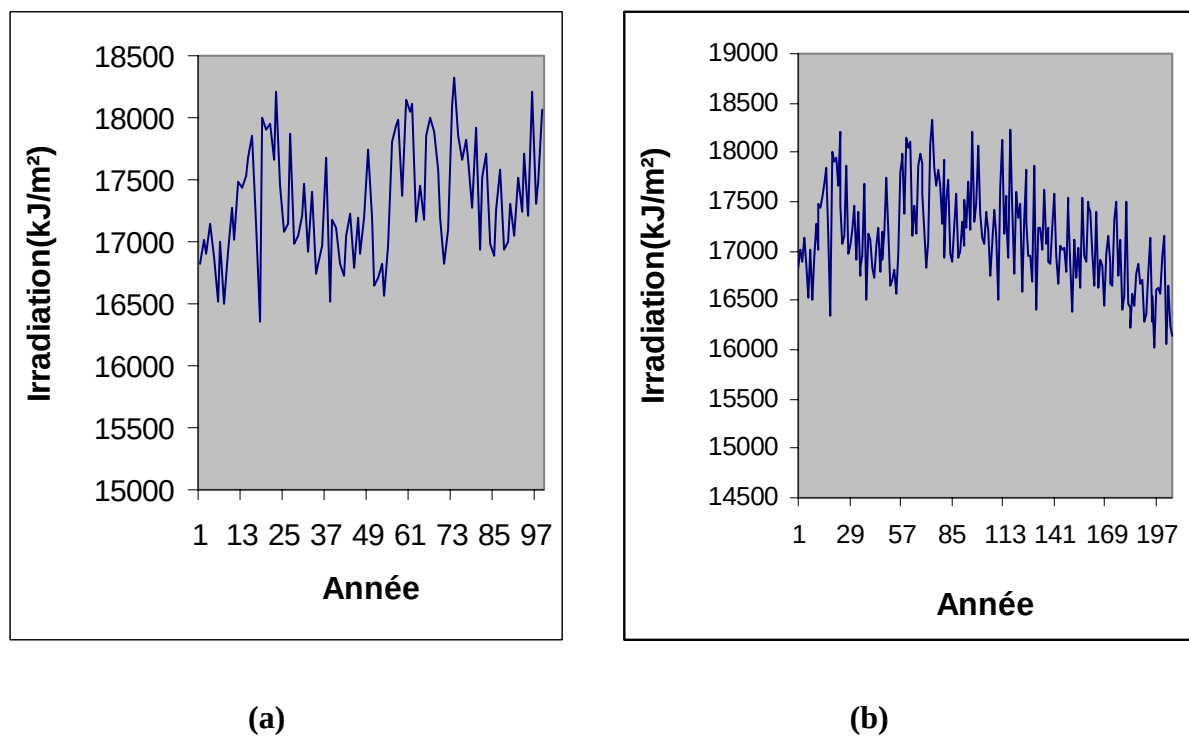


Figure IV-4. Evolution des irradiances annuelles pour une longitude de -84.75 et une latitude de 30.75 **a)** Période (1895-1993) **b)** Période (1895-2099)

III.3. Résultats et discussion

La méthode du « Recouvrement rectangulaire » a été appliquée aux données d'irradiations décrites ci-dessus afin d'estimer la dimension fractale de ces séries temporelles.

Dans la figure (IV-5) nous donnons des exemples de tracés log-log obtenus pour les différentes échelles étudiées.

Nous remarquons clairement à partir de ces figures que les séries d'irradiations étudiées ont un caractère fractal puisque les tracés log-log se caractérisent par des points regroupés autour d'une droite linéaire.

Le tableau (IV-1) regroupe les dimensions fractales obtenues à l'échelle journalière [160]. Nous remarquons que la dimension fractale de l'irradiation journalière sur une période d'une année est en moyenne égale à 1.92. Afin d'explorer la persistance à long terme de l'irradiation solaire journalière nous avons procédé au calcul de sa dimension fractale sur une période de 14 ans (1990-2004), elle a été alors trouvée égale à 1.93. Ces résultats montrent que l'irradiation journalière présente une anti-persistance puisque la dimension fractale est supérieure à 1.5.

A l'échelle annuelle, nous nous sommes d'abord intéressés aux irradiations annuelles du site de BCI [160]. Pour cela nous avons calculé l'irradiation solaire moyenne annuelle pour la période déjà considérée (1990-2004). Nous avons ensuite procédé à l'estimation de la dimension fractale de la série d'irradiations annuelles sur cette période. Nous avons trouvé une dimension fractale de 1.84. Ceci montre une anti-persistance pour les irradiations annuelles de ce site.

Afin de confirmer ce dernier résultat, nous avons poussé notre travail à l'étude de la persistance des irradiations annuelles sur une période plus longue. Nous avons donc utilisé la banque de données des USA (205 ans) décrite plus haut. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau (IV-2).

Ce tableau montre clairement une forte anti-persistance dans les séries d'irradiations solaires annuelles quelque soit la latitude et la longitude considérée puisque la dimension fractale est supérieure à 1.80.

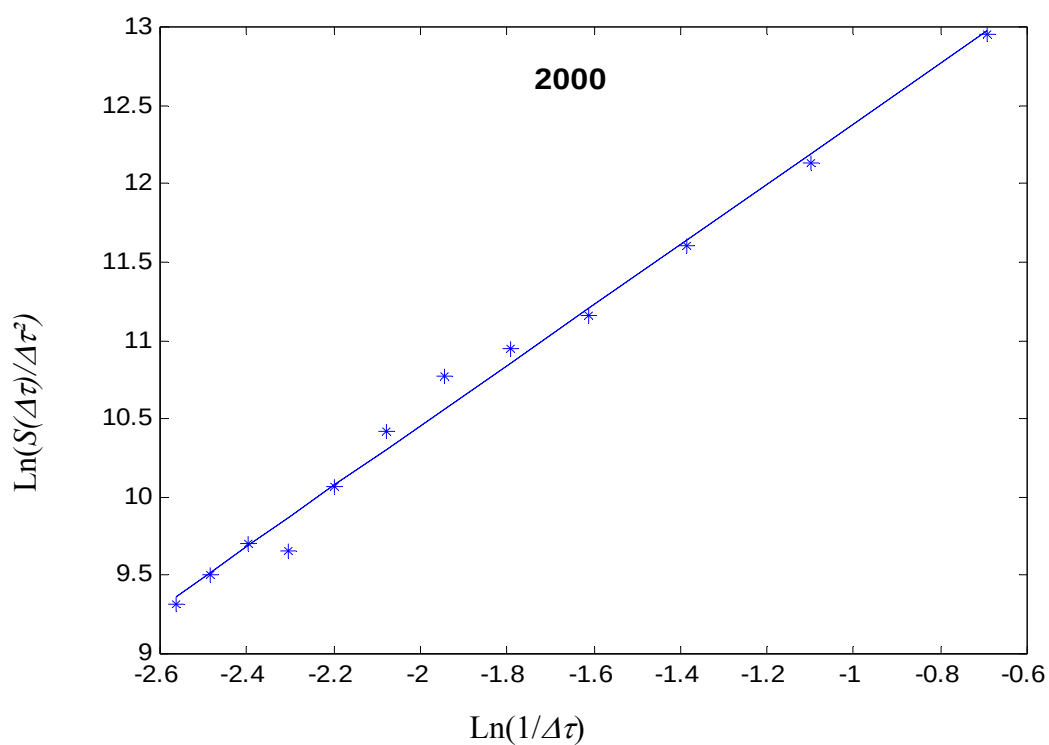
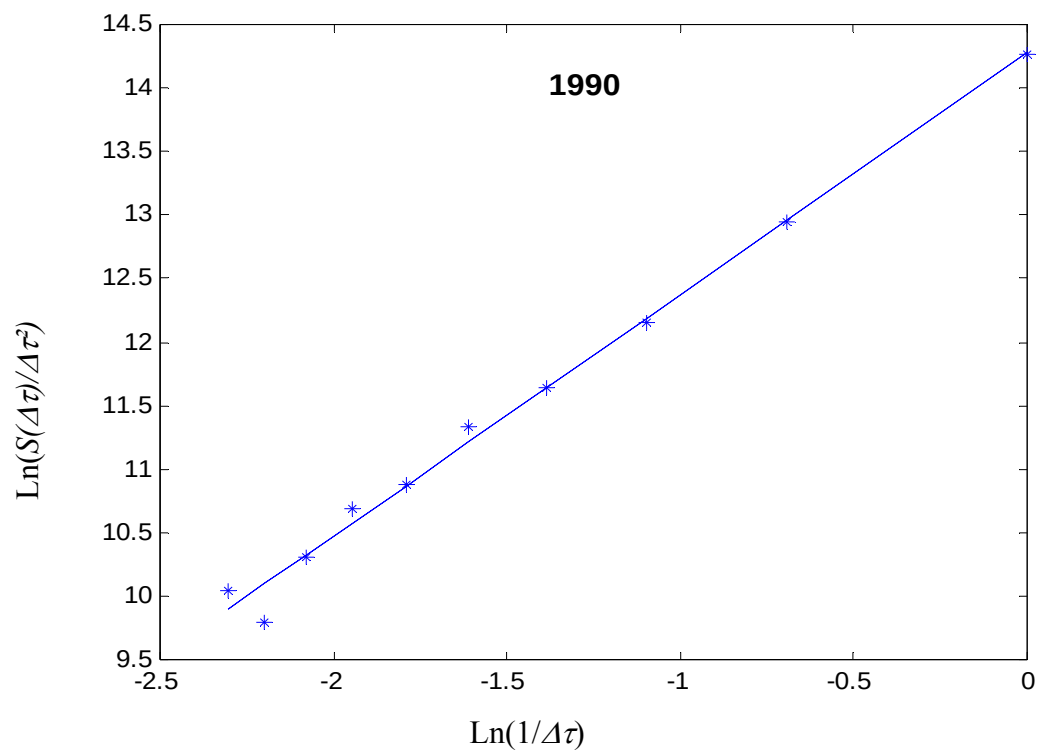


Figure (IV-5)-a. Exemples de tracés log-log des irradianctions journalières

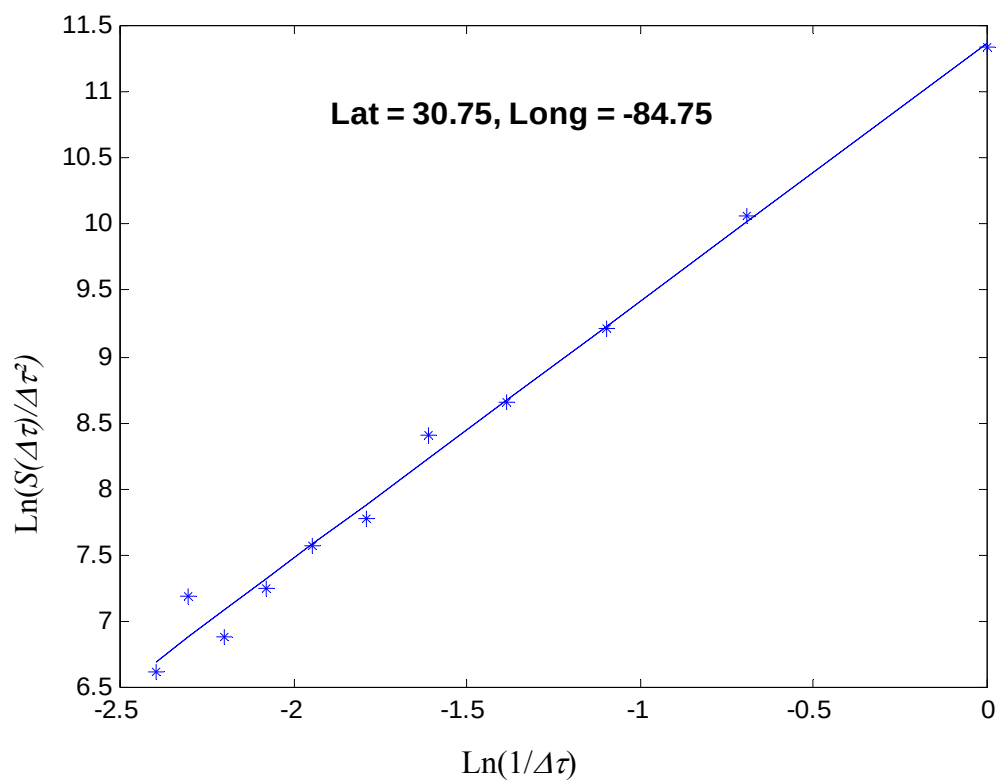
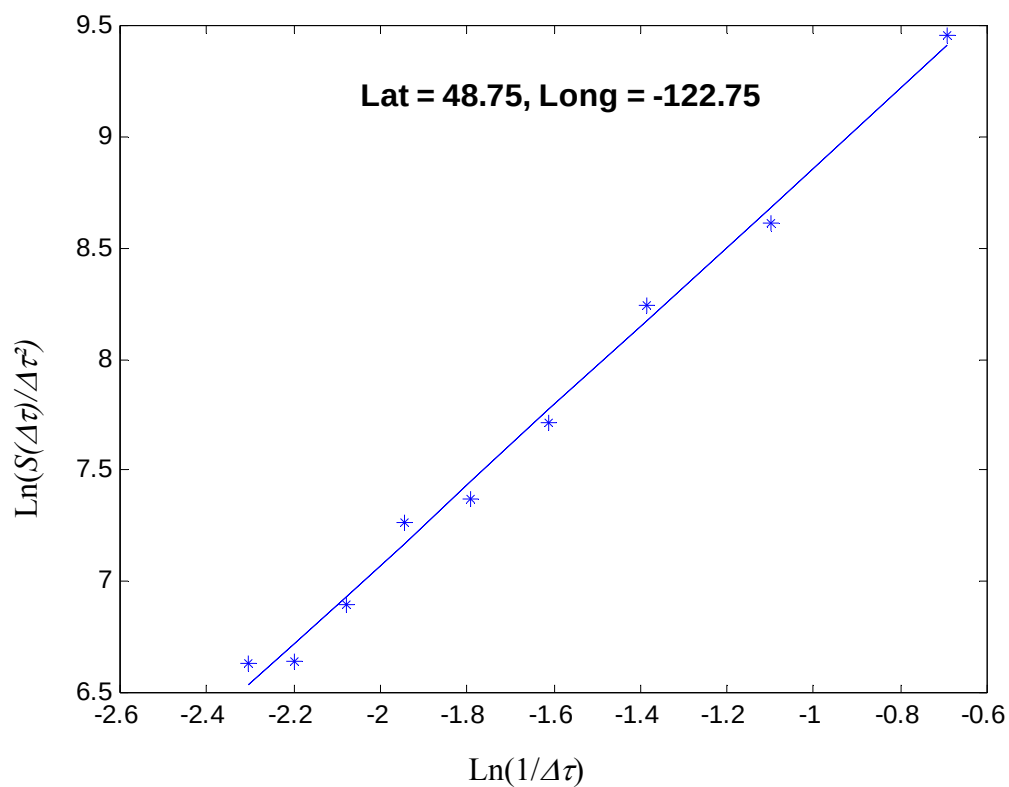


Figure (IV-5)-b. Exemples de tracés log-log des irradiances annuelles de la série globale (1895-2099)

Année	D
1990	1.90
1991	1.89
1992	1.96
1993	1.95
1994	1.93
1995	1.93
1996	1.94
1997	1.87
1998	1.93
1999	1.90
2000	1.91
2001	1.95
2002	1.98
2003	1.99
2004	1.81

Tableau IV-1. Dimensions fractales de l'irradiation journalière sur une période d'une année

Longitude	Latitude	D
-122.75	48.75	1.83
-118.75	48.75	1.91
-114.75	48.75	1.91
-110.75	48.75	1.95
-102.75	48.75	1.97
-94.75	48.75	1.99
-122.75	45.75	1.88
-118.75	45.75	1.98
-114.75	45.75	1.90
-110.75	45.75	1.91
-106.75	45.75	1.99
-94.75	45.75	1.95
-122.75	40.75	1.96
-114.75	40.75	1.97
-110.75	40.75	1.89
-106.75	40.75	1.85
-116.75	35.75	1.96
-112.75	35.75	1.96
-108.75	35.75	1.91
-104.75	35.75	1.96
-100.75	35.75	1.98
-104.75	30.75	1.91
-100.75	30.75	1.94
-96.75	30.75	1.98
-92.75	30.75	1.94
-88.75	30.75	1.90
-84.75	30.75	1.95
-100.75	28.75	1.93
-96.75	28.75	1.94
-82.75	28.75	1.97

Tableau IV-2. Dimensions fractales de l'irradiation annuelle sur une période de 205 ans (1895-2099) pour différentes latitudes et longitudes

IV. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons étudié la persistance à long terme de l'irradiation solaire à travers l'estimation de sa dimension fractale. Nous avons démontré qu'à l'échelle journalière, l'irradiation présente une forte anti-persistance puisque la dimension fractale dépasse 1.5. A l'échelle annuelle nous avons également détecté une forte anti-persistance (D supérieure à 1.5) et ceci quelque soit la latitude et la longitude considérée.

Ceci nous permet de conclure que les séries d'irradiation solaire : journalières ou annuelles sont anti-persistantes, donc les accroissements successifs de la série tendent à être négativement corrélés. Une augmentation de la variable tend à être suivie d'une diminution, et vice-versa.

Ces résultats sont très utiles pour prévoir à longue échelle les données du rayonnement solaire. En effet, le fait que la dimension fractale s'éloigne de 1.5 montre la présence d'une corrélation (négative dans ce cas) à long terme entre les événements actuels et les événements futurs, l'irradiation solaire est donc un paramètre tout à fait prévisible.

Ceci est d'un grand intérêt, vu que l'irradiation solaire représente une variable importante aussi bien dans le domaine météorologique puisqu'il permet de déterminer les types de temps, que dans le domaine énergétique étant donné que c'est la source qui alimente les systèmes photovoltaïques.

CONCLUSION

CONCLUSION

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, très peu de travaux se sont intéressés à l'application des fractals au rayonnement solaire. Notre travail de thèse en plus d'avoir utilisé l'analyse fractale dans la modélisation du rayonnement solaire, il a essayé de répondre à certaines questions pertinentes qui sont restées posées.

D'abord, nous avons étudié et mis en évidence le caractère fractal des signaux du rayonnement solaire. Ceci nous a permis d'exploiter une propriété importante des objets fractals qui est leur dimension fractale.

L'importance de ce paramètre et l'impact de sa précision dans les applications pratiques nous a incité à élaborer une méthode qui permet son estimation. Les résultats satisfaisants obtenus montrent que nous avons contribué à améliorer la complexité et la précision d'estimation de la dimension fractale des signaux temporels discrets.

La dimension fractale étant l'indice de fluctuation des signaux temporels, nous avons utilisé cet outil pour quantifier les fluctuations aléatoires des signaux d'éclairement solaire. Ceci nous a permis d'élaborer une méthode inédite de classification des signaux d'éclairement solaires en des types de temps. Cette méthode consiste à combiner la dimension fractale et l'indice de clarté afin d'établir 3 classes : journées à ciel clair, journées faiblement perturbées et journées à ciel couvert. L'avantage de la méthode est qu'elle ne nécessite pas la condition de stationnarité comme c'est le cas d'autres approches. Les résultats d'application de la méthode à cinq sites de différents climats ont montré que l'on a pu aboutir à des groupements homogènes des journées étudiées.

La classification des journées en des types de temps ainsi réalisée a permis la réduction d'une longue série de données en des classes de journées typiques. Ceci nous a conduit à élaborer une approche d'évaluation de la performance des systèmes photovoltaïques. Cette approche permet la construction de journées types pour chaque classe, ce qui réduira l'étude de performance aux cas types obtenus. La méthode a été appliquée à deux systèmes PV autonomes et un système PV relié au réseau. Le rendement du générateur et les indices de performance ont été utilisés pour apprécier la performance des systèmes étudiés dans chacun des cas types considéré. Les résultats obtenus généralement satisfaisants nous permettent de conclure qu'avec une journée de chaque type de temps caractérisant un site donné, il est possible d'avoir un aperçu rapide sur la performance du système photovoltaïque qui y est

installé sans avoir à utiliser toute la banque de données, ce qui impliquerait une réduction des coûts des études de performance. Néanmoins, il est nécessaire d'appliquer la méthode proposée à d'autres sites et à des systèmes photovoltaïques ayant d'autres configurations afin de pouvoir la généraliser.

Notre travail a montré que l'analyse fractale peut être aussi appliquée à l'étude de la persistance à long terme des séries temporelles. Ainsi, nous avons abordé l'étude de la persistance à long terme des séries du rayonnement solaire en utilisant la dimension fractale. Cette conception nouvelle a permis de mettre en évidence le phénomène de mémoire longue dans les séries d'irradiation solaire. En effet, grâce à une banque de données d'irradiation solaire, journalière et annuelle nous avons pu détecter le phénomène d'anti-persistance dans cette variable climatique. C'est-à-dire que l'irradiation solaire présente une corrélation négative à long terme ce qui met en évidence la dépendance temporelle à des échelles longues du rayonnement solaire.

Ce résultat est d'une grande utilité pratique. En effet, le rayonnement solaire étant un paramètre prévisible, sa simulation permettra d'une part de contribuer à la prévision météorologique puisqu'il permet d'établir des types de temps et d'autre part d'améliorer l'étude de performance des systèmes PV. Effectivement, la prévision du rayonnement solaire à longue échelle permettra de constituer une large banque de données de ce paramètre ce qui impliquera l'optimisation du dimensionnement des systèmes PV en général et le stockage électrique de ces systèmes en particulier. Cette dernière application est envisagée comme perspective dans nos prochains travaux.

En résumé, notre travail de thèse a contribué à l'étude du caractère fractal du rayonnement solaire. Il a proposé et mis en œuvre plusieurs applications de ce caractère en élaborant des approches et méthodes diverses. Ainsi, notre première contribution a été la mise au point d'une méthode d'estimation de la dimension fractale des signaux temporels discrets. Ensuite, et comme deuxième contribution nous avons élaboré à la base de la dimension fractale une méthode de classification des éclairagements solaires en des types de temps. Comme application de cette classification et comme troisième contribution, nous avons établi une approche d'évaluation de la performance des systèmes PV qui permet de réduire énormément les coûts économiques de cette évaluation. Enfin, notre quatrième contribution a été l'étude de persistance à long terme des séries du rayonnement solaire à l'aide de la dimension fractale.

D'autres apports et applications relatifs à l'utilisation de l'analyse fractale dans le domaine du rayonnement solaire seraient la simulation de ce dernier paramètre, dans le but d'élaborer une méthode originale de dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

ANNEXES

ANNEXE 1

GENERALITES SUR LES FRACTALES

HISTORIQUE

Bien que les fractales sont apparues au XIX siècle, elles ne furent reconnues comme une discipline mathématique que dans les années 1970, grâce au mathématicien français d'origine polonaise *Benoît Mandelbrot* considéré actuellement comme l'initiateur du développement de la géométrie fractale.

Avant *Mandelbrot* les fractales furent considérées comme des curiosités mathématiques, qui ont attiré l'attention d'un petit nombre de spécialistes (Georges Cantor, Félix Hausdorff, Helge Von Koch, Giuseppe Peano, David Hilbert, Gaston Julia). Ces mathématiciens de la fin du XIX et début du XX siècle avaient construit des courbes fractales célèbres portant actuellement leurs noms et qui seront détaillées plus loin.

Toutefois, malgré ces découvertes dans le domaine des fractales personne n'avait songé à rapprocher toutes ces connaissances. Ce fut le mérite de *Mandelbrot* de faire ces rapprochements et de faire des fractales un domaine mathématique totalement nouveau.

C'est ainsi que depuis 1951 jusqu'à 1975, les recherches menées dans plusieurs domaines : bruit sur les lignes téléphoniques, théorie des jeux, linguistique, économie, cosmologie, turbulence ont permis à Mandelbrot de découvrir le concept de fractale et de baptiser cette nouvelle discipline mathématique par le mot *fractale* en 1975, date de l'apparition de la première édition de son livre célèbre "les objets fractals".

LA GÉOMÉTRIE FRACTALE

Issu du latin *fractus*, l'adjectif fractal est selon le Larousse – Bordas de 1998 utilisé pour désigner des objets mathématiques dont la création ou la forme ne trouve ses règles que dans l'irrégularité ou la fragmentation, et des branches des mathématiques qui étudient de tels objets. Le terme *fractal* du latin *fractus* qui signifie "brisé" fut donc inventé par *Mandelbrot* pour désigner les objets irréguliers du plan ou de l'espace qui ne peuvent être décrits par la géométrie classique "euclidienne". Cette dernière ne permettant que la description des formes régulières telles que la droite ou le cercle. En effet, les figures régulières ont une dimension entière : 0 pour un point, 1 pour une courbe, 2 pour une surface et 3 pour un volume. Par

contre, la dimension d'une fractale peut prendre des valeurs qui ne sont pas des nombres entiers.

La géométrie euclidienne est donc pratiquement incapable de décrire les formes complexes réelles qui nous entourent : montagnes, nuages, côtes rocheuses, amas galactiques. C'est ainsi que la géométrie fractale s'est révélée une théorie extraordinairement adaptée pour la représentation et la description de ces objets naturels où la géométrie euclidienne a trouvé ses limites.

PROPRIÉTÉS DES FRACTALES

L'auto-similarité

L'auto-similarité appelée aussi « Invariance par changement d'échelle » ou encore « Homothétie interne » est une des caractéristiques les plus importantes des fractales.

Mathématiquement, une fonction $f(x)=y$ est auto-similaire si le facteur d'échelle est le même pour toutes les coordonnées, soit $f(\lambda x)=\lambda f(x)$ où λ est le facteur d'échelle, une fonction auto-similaire est donc par définition isotrope.

En pratique, un objet auto-similaire est un objet dont chacune de ses parties ressemble à sa totalité. Chaque nouvel agrandissement de l'objet fait apparaître les mêmes motifs à diverses échelles. Ses parties présentent ainsi un aspect tout à fait identique quelque soit l'échelle considérée. Beaucoup d'objets auto-similaires dans notre monde existent, on peut citer la forme d'une montagne qui est constituée de la répétition de rochers et les branches des poumons humains.

Pour illustrer l'auto-similarité des objets fractals, considérons deux exemples d'objets naturels possédant cette propriété.

Le premier représenté par la figure (A1-1) est "*la branche de Barnsley*" inspiré de la structure d'un arbre.



Figure A1-1. Fougère de Barnsley, Fractale étudiée par Michael Barnsley en 1988

Nous constatons dans cet exemple qu'une petite branche a à peu près une même forme que celle qui est plus grande, elle aussi, ayant la même forme que l'objet en entier.

Le deuxième exemple est celui du chou-fleur (figure (A1-2)). En effet, chacune de ses branches détachables qui ressemble au chou-fleur initial peut être divisée en d'autres nouvelles branches dont chacune ressemble à son tour au chou-fleur tout entier.

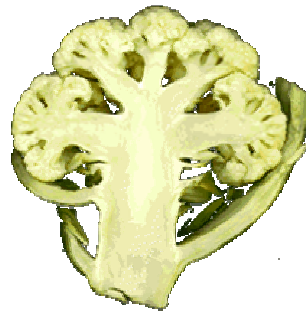


Figure A1-2. Chou-fleur coupe

C'est encore plus spectaculaire avec la variété du chou-fleur Romanesco :



Toutefois, il est important de noter qu'un objet fractal n'est pas toujours auto-similaire, mais présente une autre particularité qui est l'auto-affinité.

L'auto-affinité

Mathématiquement, une fonction est auto-affine si le facteur d'échelle est différent pour les coordonnées x et y , soit $f(\lambda x) = \lambda^\alpha f(x)$, α étant un exposant positif. Contrairement à une fonction auto-similaire la fonction auto-affine est donc non isotrope.

En pratique, une fractale auto-affine est un objet géométrique pour lequel les parties ainsi réduites suivent les mêmes règles que le tout, les détails seront différents, mais l'allure générale, les règles générales seront très semblables.

La fractale représentée par la figure (A1-3) est auto-affine au lieu d'auto-similaire, car le facteur d'agrandissement est différent pour les axes x et y , il est de 3 le long de l'axe x et de 2 le long de l'axe y .

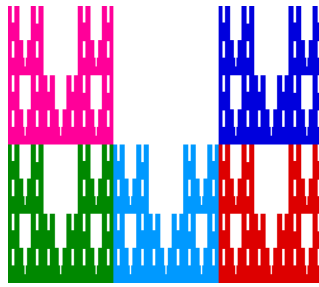


Figure A1-3. Exemple de fractale auto-affine

Dans la plupart des situations réelles, l'auto-similarité exacte (ou une invariance d'échelle complexe) est une hypothèse bien trop forte, et ce que l'on observe est généralement l'auto-affinité dite auto-similarité statistique car les différentes parties de la fractale ont des propriétés statistiques similaires.

CONSTRUCTION D'OBJETS FRACTALS

La propriété d'auto-similarité des objets fractals naturels a inspiré aux mathématiciens l'idée de construire des figures fractales mathématiques. Bien qu'étant mathématiques, le processus de formation de ces figures n'obéit pas à une formule mais à une infinité d'itérations.

Beaucoup de figures fractales sont construites à partir de deux formes géométriques : un initiateur et un générateur. L'initiateur représente la forme générale (grossière) de l'objet fractal alors que le générateur donne la forme détaillée c'est-à-dire les motifs constituant l'objet.

Pour construire une fractale, le générateur est appliqué d'une manière répétitive à l'initiateur. A chaque itération, le générateur change de taille d'une manière convenable pour produire l'objet initial à une échelle plus fine et obtenir ainsi une structure auto-similaire qu'on appelle objet fractal.

La figure (A1-4) est une illustration de la méthode de construction des fractales. Dans cette figure, l'initiateur et le générateur ont tout les deux la forme d'un carré. Le carré original est divisé en 5 petits carrés, chacun est à son tour divisé en 5 autres nouveaux carrés et ainsi de suite.

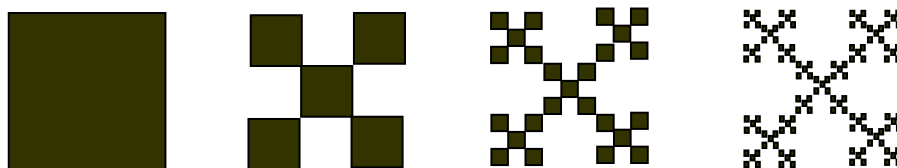


Figure A1-4. Exemple de construction d'une fractale

A partir de cette méthode de construction, plusieurs figures fractales mathématiques ont été créées par les mathématiciens précédents *Mandelbrot* et par ce dernier lui-même. Ces figures devenues par la suite célèbres ont contribué au développement de la topologie et des mathématiques. Ainsi, il est important de voir de plus près ces figures et la méthode de leur construction.

La poussière de Cantor

Datant de 1883, la poussière de Cantor est probablement la plus ancienne fractale créée par le mathématicien allemand *Georges Cantor* (1845-1918). La figure (A1-5) montre le processus de construction de cette fractale.

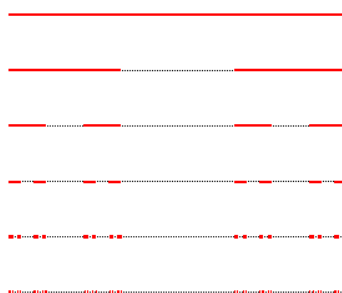


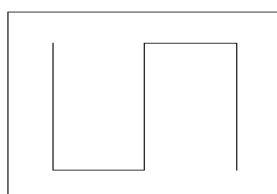
Figure A1-5. Ensemble de Cantor

D'abord, divisons un segment de droite (l'initiateur) en 3 parties égales, puis supprimons la partie centrale. Ensuite, appliquons aux 2 nouveaux segments résultants la même opération et la procédure est répétée à l'infini. On tend alors vers une figure dotée de propriétés mathématiques importantes appelée : Ensemble ou poussière de Cantor.

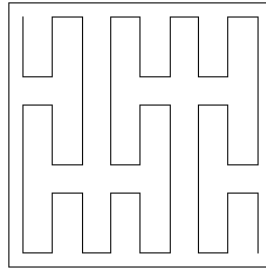
De la même manière, Cantor a établi d'autres figures fractales portant son nom on peut citer : le collier de Cantor, le triangle de Cantor, le carré de Cantor, le cube de Cantor, le tartan de Cantor, le tipi de Cantor, les anneaux de Cantor, les rideaux de Cantor, l'escalier de Cantor-Lebesgue ou du diable et la courbe de Bolzano.

Les courbes de Peano et de Hilbert

Le mathématicien italien *Giuseppe Peano* (1858-1932) a construit en 1890 une courbe qui remplit tout le carré, sans jamais se recouper. Voyons comment faire : on partage un carré en 9 petits carrés égaux, et on exécute le dessin suivant :



Ce dessin sera le motif de base. Partageons maintenant toujours notre carré en 9, mais dans chaque petit carré, on trace le motif de base, que l'on peut tourner de sorte que l'on fasse un chemin continu. On obtient quelque chose comme :



Et on répète ainsi l'opération. La courbe ainsi obtenue à la limite est la courbe de Peano, qui remplit le carré.

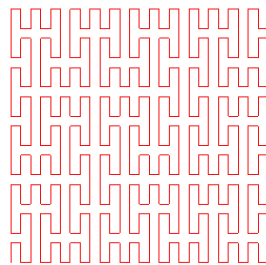


Figure A1-6. Courbe de Peano

Une année après *Peano*, en 1891 le mathématicien allemand *David Hilbert* (1862-1943) publiait une courbe proche également dite de Peano-Hilbert dont voici les premiers motifs :

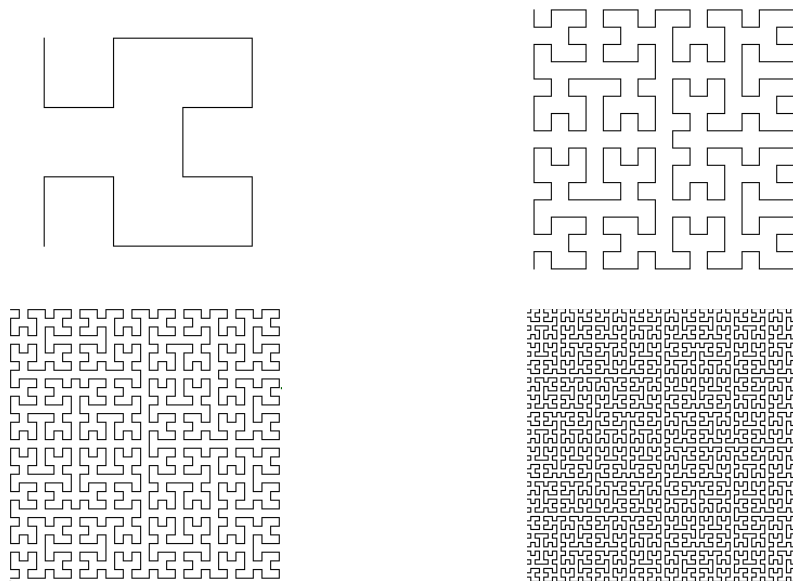


Figure A1-7. Construction de la courbe de Peano-Hilbert

La courbe de Von Koch (ou flocon de neige)

C'est la courbe la plus connue des figures fractales, elle a été publiée en 1904 par le mathématicien suédois *Niels Fabian Helge Von Koch* (1870-1924) dans un article dont le titre est "Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire".

Pour construire cette courbe, on utilise un triangle équilatéral comme initiateur et une ligne brisée faite de 4 segments égaux comme générateur (figure (A1-8)). La procédure de construction consiste à remplacer chaque segment ou côté du triangle initial par une copie du générateur, réduite de $1/3$ et obtenir ainsi une étoile, chaque segment de cette étoile est ensuite remplacé à son tour par une copie du générateur et ainsi de suite. Au fur et à mesure des itérations successives le résultat ressemble à un flocon de neige dont le nom de la courbe de Von Koch.

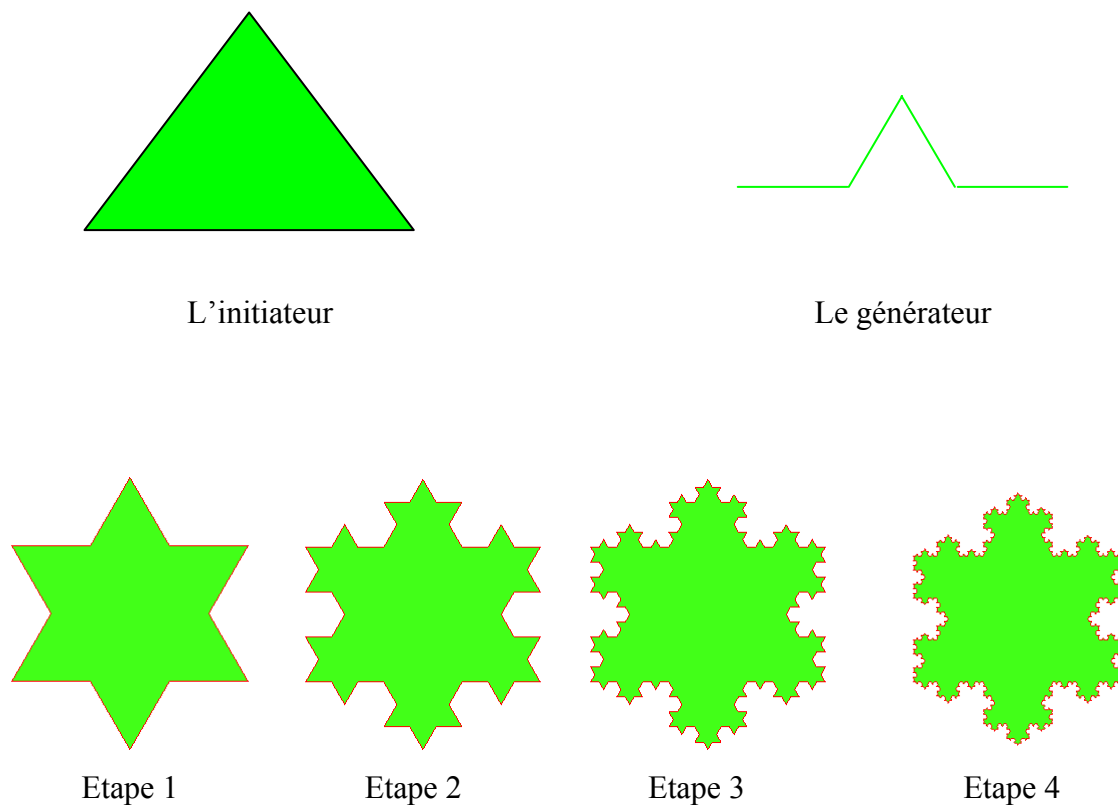


Figure A1-8. Construction du flocon de Von Koch

Le triangle de Sierpinski

Le triangle de Sierpinski créé en 1915 par le mathématicien polonais *Waclaw Sierpinski* (1882-1969) est tout aussi célèbre que la courbe de Von Koch. La figure (A1-9) montre la procédure de construction de cette courbe où l'initiateur est un triangle équilatéral.

Prenons ce triangle initial et divisons le en 4 autres triangles équilatéraux identiques, retirons ensuite le triangle central pour ne garder que 3 des 4 triangles obtenus, répétons l'opération sur les 3 triangles restants, et ainsi de suite.

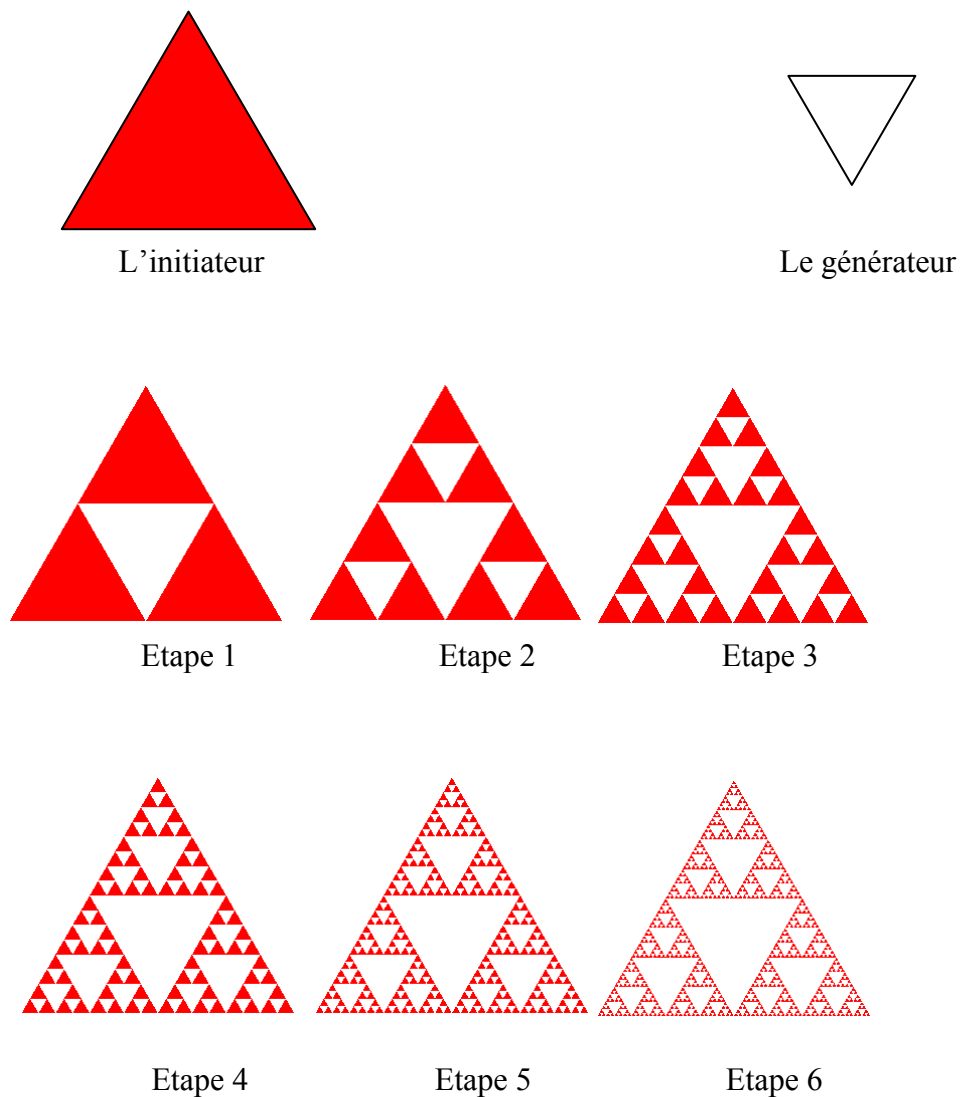


Figure A1-9. Construction du triangle de Sierpinski

L'ensemble de Julia et l'ensemble de Mandelbrot

La procédure d'itérations décrite précédemment pour construire les courbes fractales mathématiques n'est pas la seule manière de génération de ces courbes.

Une autre catégorie de courbes fractales appelée aléatoires est obtenue par une simple équation mathématique. Les ensembles mathématiques appelés "ensembles de Julia" obtenus à partir de nombres complexes sont une illustration de cette catégorie. Ces ensembles ont été étudiés par le mathématicien français *Gaston Julia* (1893 - 1979) en 1918.

Soit la transformation suivante :

$$Z' = Z^2 + C \quad (\text{A1.1})$$

Où Z et C sont des nombres complexes.

On applique cette transformation à chacun des points Z du plan complexe puis, on recommence l'opération en donnant à Z la valeur Z' trouvée précédemment et l'on recommence encore et encore.

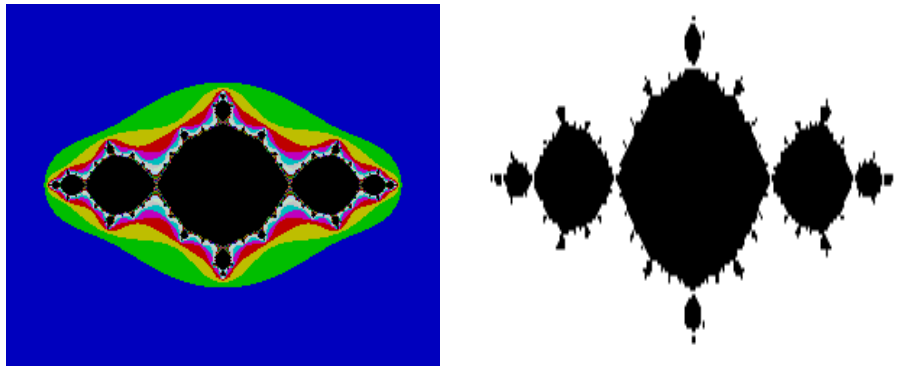
Cette procédure d'itération théoriquement infinie appliquée à chaque point du plan complexe peut se traduire par l'expression :

$$Z_{(n+1)} = Z_{(n)}^2 + C \quad (\text{A1.2})$$

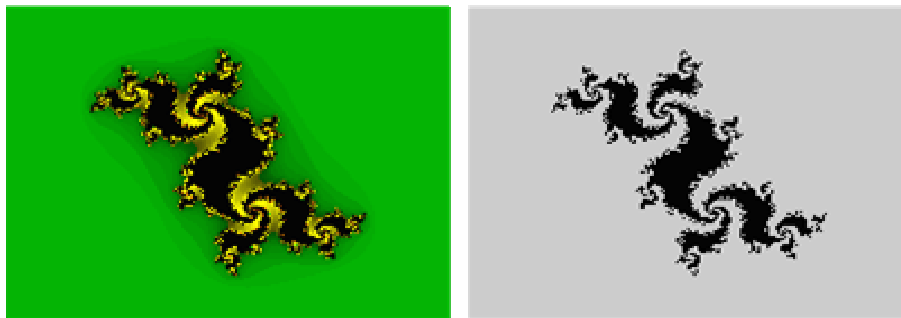
La valeur initiale $Z_{(0)}$ est prise comme étant égale aux coordonnées de chaque point du plan complexe. L'ensemble des points pour lesquels la fonction (A1.1) ne diverge pas (c'est-à-dire que la valeur de Z' ne tend pas à s'écarter de la valeur initiale mais reste définitivement enfermée dans un intervalle limité même pour un nombre infini d'itérations) forme "l'ensemble de Julia rempli" et la frontière de cet ensemble de points constitue "l'ensemble de Julia stricto sensu".

Bien évidemment, il existe un nombre infini d'ensembles de Julia selon la valeur donnée à C . Des exemples de figures extraordinaires engendrées par les ensembles de Julia sont donnés par la figure (A1-10).

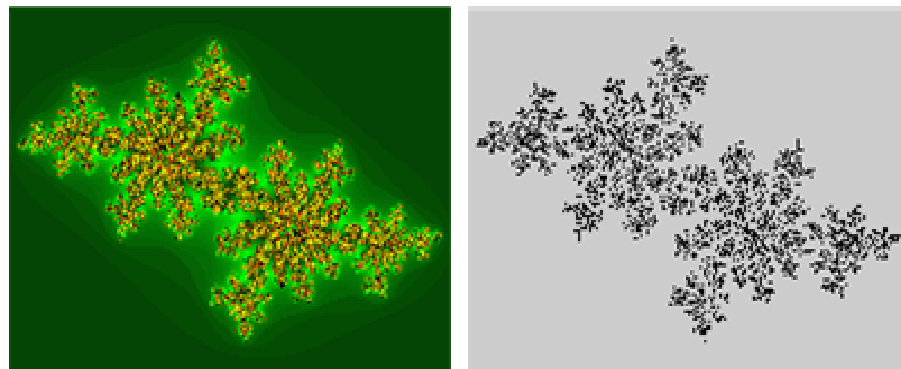
Le code des couleurs utilisé dans les images de Julia les rend plus intéressantes. En effet, les couleurs illustrent les différentes itérations utilisées pour la construction de ces images.



$$C = -1$$



$$C = -0.0519 + 0.688i$$



$$C = -0.577 + 0.478i$$

Figure AI-10. Exemples de courbes fractales de Julia selon la valeur de C

Les ensembles de Julia ainsi découverts ont suscité la curiosité de *Benoît Mandelbrot*, pour cause ces ensembles ont un aspect fractal. En effet, il existe à l'intérieur des ensembles de Julia des structures toujours aussi complexes et auto-similaires.

Les travaux de *Mandelbrot* ont conduit à la découverte de sa fractale populaire "Ensemble de Mandelbrot" considérée comme la plus connue des fractales. L'ensemble de Mandelbrot peut être défini mathématiquement comme suit :

Dans l'équation (A1.1), si au lieu de donner une valeur constante et arbitraire à C , on lui affecte successivement les valeurs correspondant aux différents points du plan complexe en partant de la valeur initiale $Z_{(0)} = 0$, on obtient un ensemble de points pour lesquels la suite (A1.1) est bornée, ces points constituent l'ensemble de Mandelbrot représenté par la figure (A1-11).

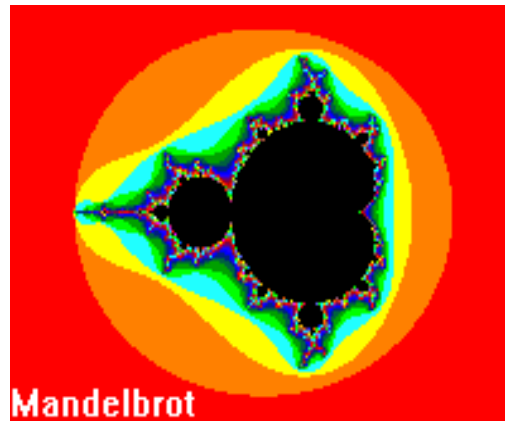


Figure A1-11. Ensemble de Mandelbrot

Certaines spécialités considèrent l'ensemble de Mandelbrot non seulement comme la plus belle des figures fractales mais aussi l'objet mathématique le plus complexe connu. Sa complexité réside dans sa particularité de présenter une infinité d'images à chaque fois qu'on l'agrandit, on voit alors apparaître les mêmes objets qui se répètent avec à chaque fois une petite modification.

Les fractales dans la littérature

Depuis la fin des années 70, et grâce au développement d'outils mathématiques fins et de l'informatique, les fractales ont suscité des travaux dans de multiples domaines où elles se sont révélées pertinentes. Initialement considérée comme une discipline mathématique, l'analyse fractale a connu une expansion et un développement rapide dans un très grand nombre de champs.

Ainsi, dès lors où les chercheurs ont découvert que beaucoup de phénomènes naturels présentent des aspects fractals, un nombre énorme de publications sous forme de livres et d'articles sont apparues, elles ont actuellement atteint un nombre où il est presque impossible de les citer tous.

Beaucoup de livres de haut niveau [16-55] sont disponibles pour comprendre et étudier les fractales. Certains sont destinés au grand public et d'autres vu leur degré de difficulté sont réservés pour les scientifiques et chercheurs.

Le livre original de Mandelbrot intitulé “The Fractal Geometry of Nature” [17] constitue la documentation classique dans le domaine des fractales. Comment la géométrie fractale peut être utilisée pour modéliser les objets réels dans le monde est traité dans “Fractals Everywhere” par Barnsley [18].

“Chaos and Fractals New Frontiers of Science” de Peitgen *et al.* [16] est un livre vraiment remarquable dans les découvertes récentes dans la théorie du chaos et des fractales. D’autres notions simplifiées du chaos et des fractales sont disponibles dans “Fractals, Chaos, Power Laws. Minutes from an Infinite Paradise” par Schroeder [19] et dans “Chaos, Fractals and Dynamics : Computer Experiments in Mathematics” par Devaney [20].

Des traitements mathématiques rigoureux de la géométrie fractale sont donnés par Falconer dans ses deux livres intéressants “Geometry of Fractal Sets” [21] et “Fractal Geometry : Mathematical Foundations and Applications” [22] et par Kaye dans “A Random Walk Through Fractal Dimensions” [23].

Pour les gens qui veulent s’initier aux fractals, Chaos et systèmes complexes “Fractals for the Classroom” par Peitgen *et al.* [24,25] est un bon ouvrage. Dans son livre intéressant “Universalités et Fractales [26,27], Sapoval indique comment la géométrie fractale est devenue le moyen indispensable à la description et à la compréhension des systèmes très irréguliers. Mandelbrot illustre la théorie fractale par des figures de dimension fractionnaire dans ses deux livres “Les objets Fractals : forme, hasard et dimension, survol du Langage Fractal” [28] et “les objets fractals” [29].

“Introducing Fractal Geometry” de Lesmoir-Gordon *et al.* [30] relate le développement de la géométrie fractale. Des contributions à la création d’outils théoriques et de modèles nouveaux dans le domaine des fractals sont regroupées dans “Fractales : Techniques et science informatique” par Véhel *et al.* [31]. Des papiers séminaux historiques sur la géométrie fractale traitants des thèmes allant des fonctions non différentiables à la dimension fractale ont été collectés dans “Classics on Fractals” par Edgar [32].

Les fondements et bases mathématiques des fractales ont été largement traités dans la littérature. “Gaussian Self-Affinity and Fractals : Globality, the Earth, 1/F Noise, R/S” de Mandelbrot [33] est une contribution au développement de nouveaux outils mathématiques, il présente spécialement une étude détaillée sur le mouvement Brownien fractionnaire. Harte dans son livre “Multifractals : Theory and Application” [34] offre une opportunité unique d’explorer les multifractales et leurs applications dans les statistiques. “Analysis on Fractals” de Kigami *et al.* [35] traite l’analyse fractale comme domaine développé de mathématiques. “Physics of Fractal Operators” de West *et al.* [36] utilise des calculs fractionnels pour décrire et identifier les caractéristiques des phénomènes physiques complexes. Dans “Approximation hilbertiennes, Splines, ondelettes, fractales”, Gaches *et al.* [37] présentent des outils mathématiques très utilisés dans la pratique, il s’agit des splines, ondelettes et fractales. Pour

les enseignants désirant inclure les fractals dans leurs cours de mathématiques “Fractals, Graphics and Mathematics Education” de Mandelbrot *et al.* [38] est un très bon ouvrage.

Dans “Elementary Introduction to Spatial and temporal Fractals” par Fan *et al* [39] des exemples de la géométrie fractale et ses applications dans le domaine de la chimie sont donnés avec des illustrations graphiques. J-F Gouyet dans son ouvrage “Physique & Structures Fractales” [40] met précisément en évidence les structures fractales présentes au sein des phénomènes étudiés en physique.

La géométrie fractale étant née des travaux que Mandelbrot avait consacrés à la finance dans les années soixante, plusieurs ouvrages ont été édités par ce pionnier des fractales. “Fractales, Hasard et Finance” [41] présente différents travaux inédits de Mandelbrot en finance et ajoute des considérations fondamentales sur le hasard. “Fractals and Scaling in Finance: Discontinuity, concentration, risk: selecta volume E” [42] est un livre extraordinaire qui explique comment les prix spéculatifs varient dans le temps.

Avec l’avenue et le développement de l’outil informatique, plusieurs chercheurs se sont intéressés à la simulation et la programmation des objets fractals. Becker et Dörfler présentent des graphiques expérimentaux par ordinateur en Pascal dans “Dynamical Systems and Fractals, Computer Graphics Experiments in Pascal” [43]. Des programmes en langage C sont disponibles dans “Fractal Programming in C” par Stevens [44] qui inclut une disquette. Dans le même contexte le même auteur a édité “Fractal Programming and Ray Tracing C++” [45]. Le logiciel FRACINT et sa disquette sont disponibles dans les livres “Fractal Creations” [46] et “Fractals for Windows” [47]. “Modelling, Simulation and Control of Non-linear Dynamical Systems : An Intelligent Approach using Soft Computing and Fractal Theory” de Melin et Castillo [48] présente une vue unique de la modélisation mathématique et la simulation des systèmes dynamiques non linéaires complexes en utilisant des techniques de programmation et de la théorie fractale.

Le grand progrès et le développement de l’informatique a suscité les scientifiques et chercheurs de l’imagerie à explorer le domaine des fractales. Des images fractales fascinantes telles que les ensembles de Julia (88 images colorées) sont présentées dans “The Beauty of Fractals : Images of Complex Dynamical Systems” de Peitgen et Richter [49]. D’autres images passionnantes sont données dans “The Science of Fractal Images” par Peitgen et Saupe [50]. Dans le même contexte Mumford *et al.* créent dans leur livre extraordinaire “Indra’s Pearls, The Vision of Felix Klein” [51] des images fractales en se basant sur des idées mathématiques implantées grâce à des algorithmes sur ordinateur. La compression fractale des images est traitée dans “Fractals in Multimedia” par Barnsley *et al.* [52], “Fractal Imaging” [53] par Ning lu et dans “Fractal Image Compression : Theory and Application” par Fisher [54].

La géométrie fractale c'est aussi un pont entre l'art et la science. Grâce à des opérations extrêmement simples on peut aboutir à des objets fractals de très grande complexité. Susan Condé écrivain et critique de l'art a utilisé les fractales à des fins artistiques dans son livre "La Fractalité dans l'art Contemporain" [55].

Pour les fanatiques des fractales dont l'appétit n'a pas encore été satisfaite avec la documentation détaillée plus haut, ils peuvent trouver dans [57] d'autres livres capables de répondre à leurs besoins. Il n'y a pas de doute que beaucoup d'autres livres que nous n'avons pas cité existent sur le marché et qui sont capables de satisfaire la curiosité des lecteurs et chercheurs.

En plus des livres, beaucoup d'articles apparus dans des journaux de très haut niveau traitent de la géométrie fractale. Pour ne pas encombrer ce paragraphe, nous n'allons pas citer les articles traitant la théorie fractale d'une manière purement mathématique, mais notre intérêt sera pour les papiers traitant l'application des fractales dans des domaines pratiques.

En effet, après avoir été largement utilisées par les mathématiciens, physiciens et chimistes, actuellement les fractales ont suscité l'intérêt des chercheurs dans des domaines divers : médecine et biologie [58-62], traitement de la parole [63], l'agronomie [64-65], la sismologie et géologie [66] et l'imagerie [67] pour ne citer que ceux là.

Bien évidemment, l'expansion rapide de la géométrie fractale laisse présager d'autres nombreuses applications industrielles. L'une de ses applications est notre contribution à utiliser les fractales dans le domaine du solaire où très peu de chercheurs l'ont fait.

ANNEXE 2

ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE DES OBJETS EUCLIDIENS ET FRACTALS

ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE DES OBJETS EUCLIDIENS USUELS

Nous entendons par objet euclidien tout objet usuel de la géométrie classique qui est non fractal. Cet objet peut être une longueur, une aire ou un volume.

Nous allons dans ce paragraphe appliquer la formule (II.3) pour calculer la dimension fractale de ces objets euclidiens et vérifier que leur dimension fractale est égale à leur dimension topologique.

- **Une ligne droite**

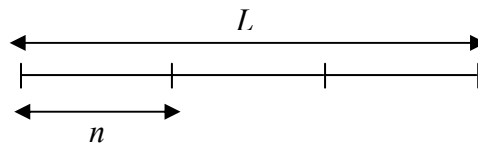


Figure A2-1. Calcul de la dimension fractale d'une ligne droite

Soit un segment de droite de longueur L (Figure (A2-1)), si on utilise un segment de longueur $n=L/3$ pour mesurer la longueur L , il nous faudra utiliser ce segment 3 fois ($N=3$). Selon la formule (II.3) la dimension de cet objet sera :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} = \frac{\ln 3}{\ln 3} = 1 \quad (\text{A2.1})$$

Cette dimension est bien la dimension topologique d'une ligne droite.

- Un carré

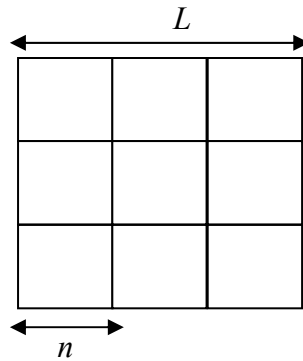


Figure A2-2. Calcul de la dimension fractale d'un carré

Pour un carré de côté L (Figure (A2-2)), il nous faut utiliser 9 carrés de côté $n=L/3$ pour recouvrir le carré initial de côté L , d'où $N=9$, soit :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} = \frac{\ln 9}{\ln 3} = 2 \quad (\text{A2.2})$$

Ceci n'est rien d'autre que la dimension topologique du plan ou d'une surface.

- Un cube

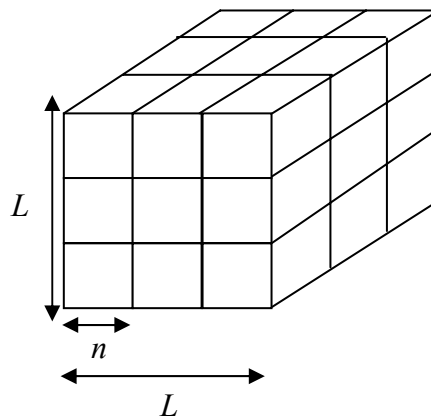


Figure A2-3. Calcul de la dimension fractale d'un cube

Ce cube de côté L contient 27 petits cubes de côté $n=L/3$, d'où le nombre de cubes nécessaires pour recouvrir le cube initial est $N=27$, on a alors :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} = \frac{\ln 27}{\ln 3} = 3 \quad (\text{A2.3})$$

Ceci est bien la dimension topologique d'un élément volumique.

Dans ces trois exemples, nous avons considéré une échelle (c'est-à-dire un facteur d'agrandissement) $L/n=3$, mais on retrouve les mêmes résultats avec n'importe quel autre facteur d'agrandissement.

ESTIMATION DE LA DIMENSION FRACTALE DES OBJETS FRACTALS CELEBRES

Dans l'annexe 1, nous avons présenté quelques exemples d'objets fractals connus ainsi que leurs méthodes de construction. Dans ce qui suit, nous allons calculer leurs dimensions fractales en utilisant la formule (II.3).

● La poussière de Cantor

Comme nous l'avons déjà expliqué, cet objet est construit en supprimant le segment central de l'objet constitué au départ de 3 segments, pour obtenir 2 segments similaires avec un facteur de réduction égal à $1/3$, d'où le nombre de segments obtenus $N=2$ et le facteur de réduction $n/L=1/3$ on a alors :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} = \frac{\ln 2}{\ln 3} = 0.63 \quad (\text{A2.4})$$

La dimension de la poussière de Cantor est donc un nombre fractionnaire inférieur à 1, ce qui caractérise les poussières qui sont des ensembles discontinus de points et qui ont une dimension entre 0 et 1.

● Le flocon de Von Kokh

Rappelons que pour construire la courbe de Von Kokh, à chaque itération on crée à partir de chaque côté, 4 nouveaux côtés similaires avec un facteur de réduction égal à $1/3$, d'où $N=4$ et $L/n=3$, la dimension fractale de cette courbe est donc :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} = \frac{\ln 4}{\ln 3} = 1.26 \quad (\text{A2.5})$$

Voilà un exemple de figures dont la dimension euclidienne est 1 (c'est une ligne brisée) mais dont la dimension fractale est supérieure à 1, qui est, non entière. Ceci est la caractéristique des courbes fractales qui ont une dimension topologique égale à 1 et une dimension fractale entre 1 et 2.

● Le triangle de Sierpinski

Comme décrit dans l'annexe 1, ce triangle est créé en ôtant à chaque itération le triangle central pour obtenir 3 nouveaux triangles similaires au central avec un facteur de réduction égal à 1/2, on a donc $N=3$ et $L/n=2$ d'où :

$$D = \frac{\ln(N)}{\ln\left(\frac{L}{n}\right)} = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1.585 \quad (\text{A2.6})$$

Le triangle de Sierpinski appartient donc aux courbes fractales puisque sa dimension est entre 1 et 2.

● La courbe de Peano–Hilbert

Cette courbe se confond à l'infini avec une surface puisqu'elle remplit le carré, sa dimension fractale est donc 2. Quoique cette courbe soit d'apparence fractale, elle n'est de ce fait pas un objet fractal au sens mathématique puisque sa dimension fractale est un nombre entier. Ainsi, les fractales ont des dimensions qui ne sont pas des nombres entiers :

- Les poussières (ensemble discontinu de points) ont une dimension entre 0 et 1.
- Les courbes ou les surfaces planes (flocon de Von Kokh, triangle de Sierpinski) ont une dimension entre 1 et 2.
- Les objets qui ont un volume (éponge de Menger dont la dimension fractale est 2.72) ont une dimension entre 2 et 3.

ANNEXE 3

GENERALITES SUR LE RAYONNEMENT SOLAIRE

A la préhistoire l'homme utilisait le feu comme source d'énergie dans sa vie quotidienne. A l'antiquité les peuples utilisaient l'énergie du vent pour faire fonctionner les navires et les moulins à vent. Puis, vint la découverte de la force de l'eau pour faire fonctionner les moulins à eau.

Ce n'est qu'au début du dix-huitième siècle (XVIII) qu'on découvrit une autre force d'énergie plus abondante et à des coûts moindres que les autres énergies déjà utilisées, il s'agit de la chaleur. Cette dernière étant la force motrice des machines à vapeur beaucoup utilisées à cette époque.

A la fin du XVIII^e siècle, une autre forme d'énergie apparut, il s'agit du pétrole. D'abord utilisé principalement pour l'éclairage, son champ d'application s'étendit rapidement au point où en 1900, il devient la 1^{ère} source d'énergie à l'échelle mondiale.

En 1973, le prix du pétrole est passé au triple, ce fût le premier "choc pétrolier". Les états dont l'économie dépend principalement de cette ressource se sont alors préoccupés de trouver d'autres forces d'énergie dont l'exploitation est susceptible de réduire la dépendance vis à vis du pétrole, il s'agit des énergies renouvelables.

Ces dernières représentent des sources d'énergie naturelles inépuisables et présentent l'avantage d'être non polluantes, elles se présentent sous diverses formes: l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie géothermiques, les énergies de récupération, l'énergie de la mer, la fusion thermonucléaire...etc.

Parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire particulièrement a trouvé une large application industrielle dû à sa disponibilité et son abondance dans beaucoup de pays dans le monde. De plus, l'énergie solaire est à l'origine de la formation des réserves d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) et des flux d'énergie renouvelables (bois, vent, énergie hydraulique). C'est aussi l'énergie solaire qui fournit aux végétaux la biomasse nécessaire à leur développement.

Plus récemment, les recherches se sont concentrées sur l'utilisation directe du rayonnement solaire par conversion du rayonnement en chaleur. Les serres, les centrales solaires, le four solaire, la centrale thermique et les systèmes photovoltaïques sont des exemples d'exploitation directe de l'énergie solaire.

Dans ce qui suit nous allons nous intéresser à cette source d'énergie qui fait l'objet de notre travail.

LES BASES DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique émis par le soleil, il est composé essentiellement de:

- lumière visible de longueur d'onde comprise entre $0.4\mu\text{m}$ et $0.8\mu\text{m}$
- rayonnement infrarouge (UV) de longueur d'onde inférieure à $0.4\mu\text{m}$
- rayonnement ultraviolet (IR) de longueur d'onde supérieure à $0.8\mu\text{m}$

La figure (A3-1)¹ illustre cette composition spectrale du rayonnement électromagnétique.

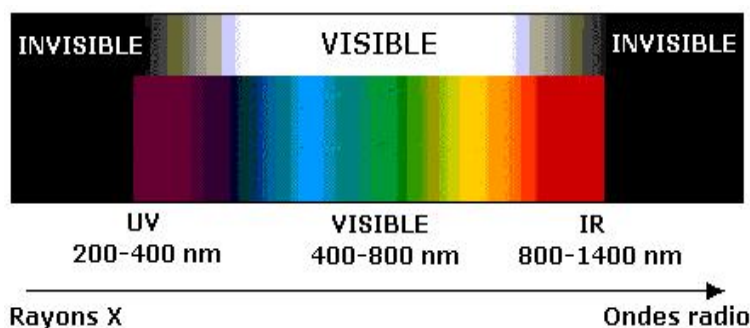


Figure A3-1. Distribution spectrale du rayonnement électromagnétique depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X

La terre reçoit un éclairement² d'environ 350 Watts par m^2 à l'équateur. Ce rayonnement diminue en se rapprochant des pôles où les rayons sont plus inclinés. En effet, le rayonnement incident doit, aux latitudes élevées, se répartir sur une plus grande surface que sous les tropiques à cause de la courbure de la terre.

De plus, l'inclinaison de l'axe de la terre influe sur le rayonnement solaire incident puisqu'à latitude égale, la fraction reçue par unité de surface est plus importante en été qu'en hiver (c'est le phénomène des saisons). Le rayonnement solaire transmis à la terre est également atténué lors de sa traversée de l'atmosphère. Cette atténuation est due aux phénomènes atmosphériques suivants: l'absorption, la diffusion et la réflexion. Ces phénomènes sont engendrés par les molécules gazeuses et les particules atmosphériques rencontrées par le rayonnement solaire lors de sa trajectoire soleil-terre.

Tout d'abord sur les 350 W/m^2 transmises à la terre, près du quart (80 W/m^2) est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère. Cette réflexion est essentiellement due aux nuages et aux

¹ Cette figure est disponible dans le site : <http://www.outilssolaires.com/Glossaire/prin-2terminologie.htm>

² C'est le flux de rayonnement électromagnétique, par unité de surface, incident sur un plan donné.

autres constituants atmosphériques -gaz et aérosols-. En outre, 80 W/m^2 de l'éclairement solaire incident est absorbé par l'atmosphère et ses nuages. L'éclairement solaire qui parvient donc à la surface terrestre est approximativement de 180 W/m^2 (voir figure (A3-2)³).

A peu près les deux tiers de ce rayonnement sont transmis directement c'est le **rayonnement direct**, le reste s'effectue par diffusion vers le bas (propagation dans toutes les directions d'un rayonnement initialement unidirectionnel, sans perte de l'énergie qu'il transporte, après pénétration dans un milieu) c'est le **rayonnement diffus**.

Sur les 180 W/m^2 incidents, la surface de la terre renvoie dans l'atmosphère environ 50 W/m^2 par réflexion et ceci à cause de son albédo⁴ élevé. Cependant, une partie (environ 30 W/m^2) de l'éclairement réfléchi ainsi par la surface terrestre lui revient par diffusion vers le bas pour s'ajouter aux 130 W/m^2 initialement non réfléchis. La surface terrestre absorbe ainsi 160 W/m^2 , pratiquement la moitié du rayonnement solaire émis par le soleil vers la terre.

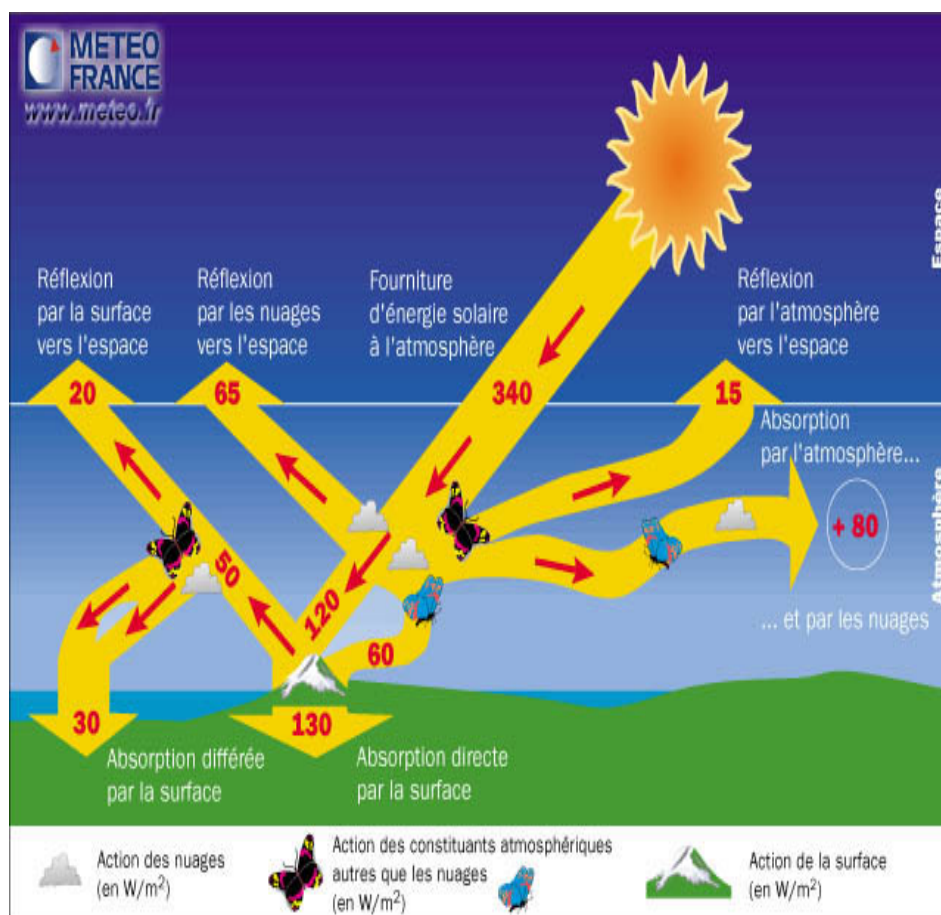


Figure A3-2. Différents processus atmosphériques régissant le rayonnement solaire

³ La figure a été prise à partir du site http://www.meteo.fr/meteonet/decouvr/a-z/html/141_curieux.htm#

⁴ Une partie du rayonnement incident est renvoyée vers le milieu où il se propageait, après avoir subi une réflexion entre la surface du milieu qui reçoit le rayonnement. L'albédo du milieu qui reçoit le rayonnement est alors le rapport du flux de rayonnement réfléchi par ce milieu au flux du rayonnement incident).

INSTRUMENTS DE MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Il existe plusieurs types d'appareils de mesure du rayonnement solaire appelés les actinomètres. Le pyrgéomètre, le pyrromètre, l'héliographe, le pyrhéliomètre et le pyranomètre en sont des exemples. Les deux derniers appareils sont les plus répandus.

Le pyranomètre

Cet instrument est destiné à mesurer le rayonnement solaire global (direct+diffus) parvenant depuis toutes les directions sur une surface plane.

Un des principes de fonctionnement de cet appareil est de mesurer à l'aide de thermocouple, la différence de température entre un petit élément maintenu à la température ambiante, le flux solaire est alors proportionnel à la différence de potentiel. Le pyranomètre doit être installé de façon à percevoir tous les rayons provenant d'un angle d'ouverture de 2π correspondant à un hémisphère complet.

Le pyranomètre est aussi utilisé pour mesurer le rayonnement solaire diffus. Pour cela, il suffit d'équiper un pyranomètre d'une bande pare-soleil afin d'occulter le rayonnement direct.

Le schéma de base d'un pyranomètre est donné dans la figure (A3-3)⁵.



Figure A3-3. Schéma de base d'un pyranomètre (modèle CM6)

Le pyrhéliomètre

Il est destiné à la mesure du rayonnement solaire direct. L'élément sensible du pyrhéliomètre qui peut être un thermopile est constitué de thermocouples montés en série,

⁵ La figure a été prise à partir du site : <http://www.imp.cnrs.fr/meteo/prano.htm>

exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction. Il délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. La géométrie de l'appareil limite le rayonnement incident au rayonnement solaire direct et au rayonnement provenant du ciel circumsolaire.

Le schéma de base d'un pyrhéliomètre est donné dans la figure (A3-4)⁶.

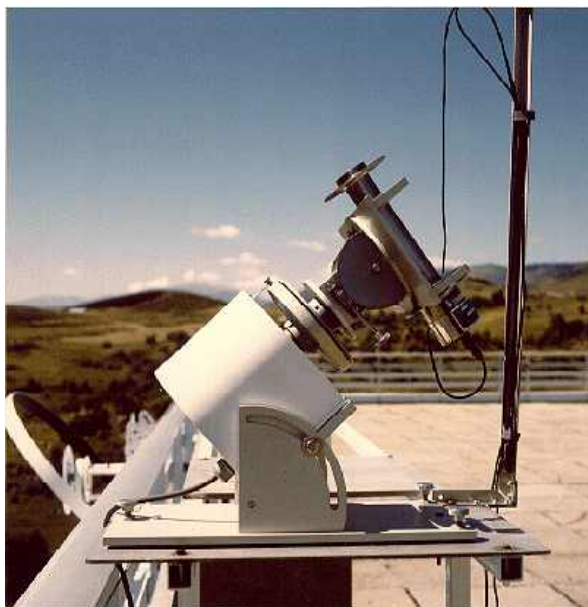


Figure A3-4. Schéma de base d'un pyrhéliomètre (Type NIP)

⁶ La figure a été prise à partir du site <http://www.imp.cnrs.fr/meteo/pyrelio.htm>

ANNEXE 4

PRINCIPALES METHODES DE CLASSIFICATION STATISTIQUES

METHODE D'AGREGATION AUTOUR DES CENTRES MOBILES

La méthode de *classification autour des centres mobiles* est probablement la technique de partitionnement la mieux adaptée aux vastes recueils de données. Elle est utilisée comme technique de description et d'analyse ainsi que comme technique de réduction, généralement en association avec des analyses factorielles et d'autres méthodes de classification.

L'algorithme de base de cette méthode peut être imputé à Forgy, bien que d'autres travaux ont été menés parallèlement. Le principe de base de cet algorithme est de produire des groupements par recherche directe d'une partition, en affectant les éléments à des centres provisoires de classes, puis en recentrant ces classes, et en affectant de façon itérative ces éléments.

Soit un ensemble I de n individus à partitionner, caractérisés par p caractères ou variables. On suppose que l'espace R^p supportant les n points-individus est muni d'une distance appropriée notée d (souvent distance euclidienne usuelle ou distance du χ^2). On désire constituer au maximum q classes. Les étapes de l'algorithme sont résumées ci-dessous:

Étape 0 : On détermine q centres provisoires de classes (par exemple, par tirage pseudo-aléatoire sans remise de q individus dans la population à classifier, selon une préconisation de MacQueen). Les q centres:

$$\{C_1^0, \dots, C_k^0, \dots, C_q^0\}$$

induisent une première partition P^0 de l'ensemble des individus I en q classes :

$$\{I_1^0, \dots, I_k^0, \dots, I_q^0\}$$

Ainsi l'individu i appartient à la classe I_k^0 s'il est plus proche de C_k^0 que de tous les autres centres.

Étape 1 : On détermine q nouveaux centres de classes :

$$\{C_1^1, \dots, C_k^1, \dots, C_q^1\}$$

en prenant les centres de gravité des classes qui viennent d'être obtenues :

$$\{I_1^0, \dots, I_k^0, \dots, I_q^0\}$$

Ces nouveaux centres induisent une nouvelle partition P^1 de I construite selon la même règle que pour P^0 .

La partition P^1 est formée des classes notées :

$$\{I_1^1, \dots, I_k^1, \dots, I_q^1\}$$

Étape m : On détermine q nouveaux centres de classes :

$$\{C_1^m, \dots, C_k^m, \dots, C_q^m\}$$

en prenant les centres de gravité des classes qui ont été obtenues lors de l'étape précédente,

$$\{I_1^{m-1}, \dots, I_k^{m-1}, \dots, I_q^{m-1}\}$$

Ces nouveaux centres induisent une nouvelle partition P^m de l'ensemble I formée des classes :

$$\{I_1^m, \dots, I_k^m, \dots, I_q^m\}$$

Le processus se stabilise nécessairement et l'algorithme s'arrête soit lorsque deux itérations successives conduisent à la même partition, soit lorsqu'un critère convenablement choisi (par exemple, la mesure de la variance intra-classes) cesse de décroître de façon sensible, soit encore parce qu'un nombre maximal d'itérations a été fixé *à priori*. Généralement, la partition obtenue finalement dépend du choix initial des centres.

D'autres techniques dont le principe général est voisin de l'algorithme *d'agrégation autour des centres mobiles* existent. Il s'agit de la méthode des *nuées dynamiques* et la méthode des *k-means*.

La 1^{ère} technique diffère de la méthode "d'agrégation autour des centres mobiles" par le fait que les classes ne sont pas caractérisées par un centre de gravité, mais par un certain nombre d'individus à classer appelés *étalon*, qui constituent alors un *noyau*.

La 2^{ème} technique dite des *k-means* (*k-moyennes*) introduite par MacQueen diffère quant à elle de la *méthode d'agrégation autour des centres mobiles* dans la règle de calcul des nouveaux centres. En effet, pour modifier la position des centres, on n'attend pas d'avoir procédé à la réaffectation de tous les individus: chaque réaffectation d'individus entraîne une modification de la position du centre.

CLASSIFICATION HIERARCHIQUE

Il existe deux types d'algorithmes de classification hiérarchiques: les algorithmes ascendant (ou encore agglomératifs) qui construisent les classes par agglomérations successives des objets deux à deux, et qui fournissent une hiérarchie de partitions des objets; et les

algorithmes descendant (ou encore divisifs) qui divisent l'ensemble des objets et qui peuvent encore fournir une hiérarchie de partitions. On se limitera ici à la 1^{ère} technique de classification qui est la plus utilisée.

La méthode de classification ascendante hiérarchique permet de construire une partition d'un ensemble d'éléments en classes de sorte que les éléments appartenant à des classes différentes sont éloignés.

Le principe de l'algorithme consiste à créer à chaque étape, une partition par agrégation deux à deux des éléments les plus proches. Les regroupements d'individus générés par l'algorithme seront alors aussi des *éléments* en plus des individus ou objets à classer eux-mêmes. Il y a différentes manières de considérer le nouveau couple d'éléments agrégés, d'où un nombre important de variantes de cette technique.

L'algorithme ne fournit pas une partition en q classes d'un ensemble de n objets mais une *hiérarchie de partitions*, se présentant sous la forme d'*arbres* appelés également *dendrogrammes* et contenant $(n - 1)$ partitions. L'intérêt de ces arbres est qu'ils peuvent donner une idée du nombre de classes existant effectivement dans la population.

L'algorithme principal de classification ascendante hiérarchique se déroule comme suit :

Étape 1 : il y a n éléments à classer (qui sont les n individus)

Étape 2 : on construit la matrice de distances entre les n éléments et l'on cherche les deux plus proches, que l'on agrège en un nouvel élément. On obtient une première partition à $n-1$ classes

Étape 3 : on construit une nouvelle matrice des distances qui résultent de l'agrégation, en calculant les distances entre le nouvel élément et les éléments restants (les autres distances sont inchangées). On se trouve dans les mêmes conditions qu'à l'étape 1, mais avec seulement $(n-1)$ éléments à classer et en ayant choisi un critère d'agrégation. On cherche de nouveau les deux éléments les plus proches, que l'on agrège. On obtient une deuxième partition avec $(n - 2)$ classes et qui englobe la première

Étape m : on calcule les nouvelles distances, et l'on réitère le processus jusqu'à n'avoir plus qu'un seul élément regroupant tous les objets et qui constitue la dernière partition.

Plusieurs méthodes basées sur la classification ascendante hiérarchique ont été développées, la différence entre elles réside dans le critère d'agrégation ou distance utilisée, par exemple la méthode de WARD aussi dite *méthode des voisins réciproques* et qui est largement utilisée se base sur le critère de diminution de l'inertie inter-classes pour regrouper les éléments.

ANNEXE 5

SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

Une installation photovoltaïque est un système qui assure la conversion du rayonnement solaire en énergie électrique par effet photovoltaïque, dans le but d'alimenter des charges électriques.

ELEMENTS D'UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE

Selon la configuration adoptée, on peut trouver dans une installation PV les éléments suivants :

► Le générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque appelé aussi champ photovoltaïque est un ensemble de modules photovoltaïques. Ces derniers sont la connexion en série et en parallèle de plusieurs cellules solaires, ceci permet l'obtention des caractéristiques courant-tension désirées.

En effet, la tension générée par une cellule est très faible, ce qui exige le groupement des cellules en série pour obtenir des tensions compatibles avec les charges à alimenter. De même, il est possible d'augmenter le courant fourni à la charge en plaçant en parallèle plusieurs cellules.

La puissance des modules solaires s'exprime en Watt-crête (puissance que peut fournir un module sous un éclairement de 1000 W/m^2 sous une température cellule de 25°C). Cette puissance varie de quelques Watts-crête à quelques dizaines de Watts-crête.

En outre, pour obtenir des puissances élevées, on associe en série et en parallèle plusieurs modules, on forme ainsi le champ ou le générateur photovoltaïque.

La figure (A5-1) représente un champ photovoltaïque constitué par $N_{ms}.N_{bp}$ modules solaires, N_{ms} étant le nombre de modules en série pour chaque branche du champ PV, N_{bp} le nombre de branches en parallèle constituant le champ PV.

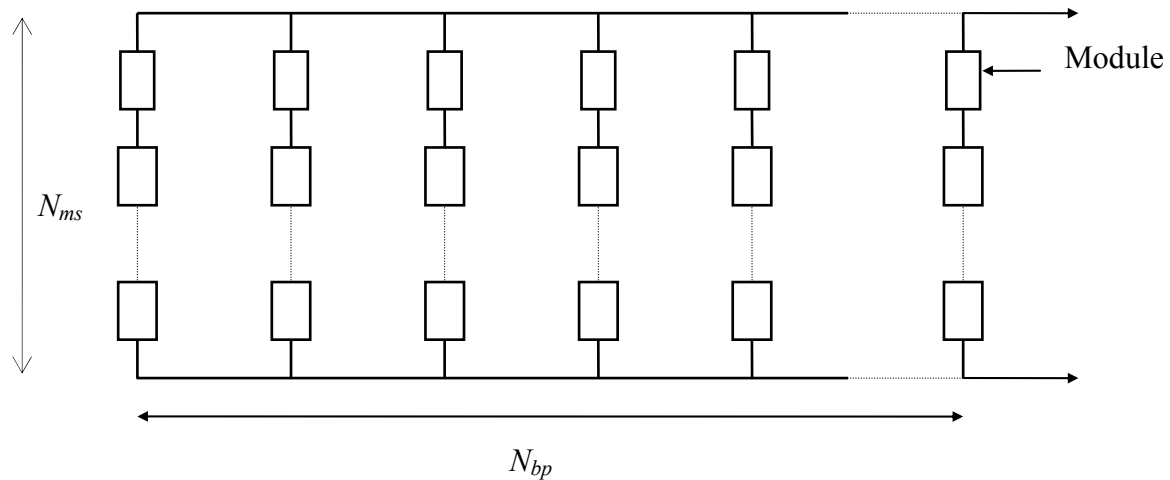


Figure A5-1. Schéma d'un champ photovoltaïque

La connexion de plusieurs modules en série peut engendrer l'augmentation de la tension supportée par la cellule travaillant en inverse (hot spot¹). Pour éviter ce problème, on court-circuite la cellule ou le module par une diode By-pass pour abaisser la tension à ses bornes.

D'autre part, le groupement des modules en parallèle pose un problème au niveau des cellules connectées en série. En effet, ces dernières peuvent recevoir de l'énergie électrique provenant d'autres branches ce qui engendre des déséquilibres dans le champ photovoltaïque. Pour éviter ce problème, il faut installer dans chacune des branches du module PV des diodes séries (diodes retours) qui ont pour principal rôle de supporter le courant débité par la branche.

Le câblage final le plus courant actuellement du générateur photovoltaïque tenant compte des protections citées est donné par la figure (A5-2).

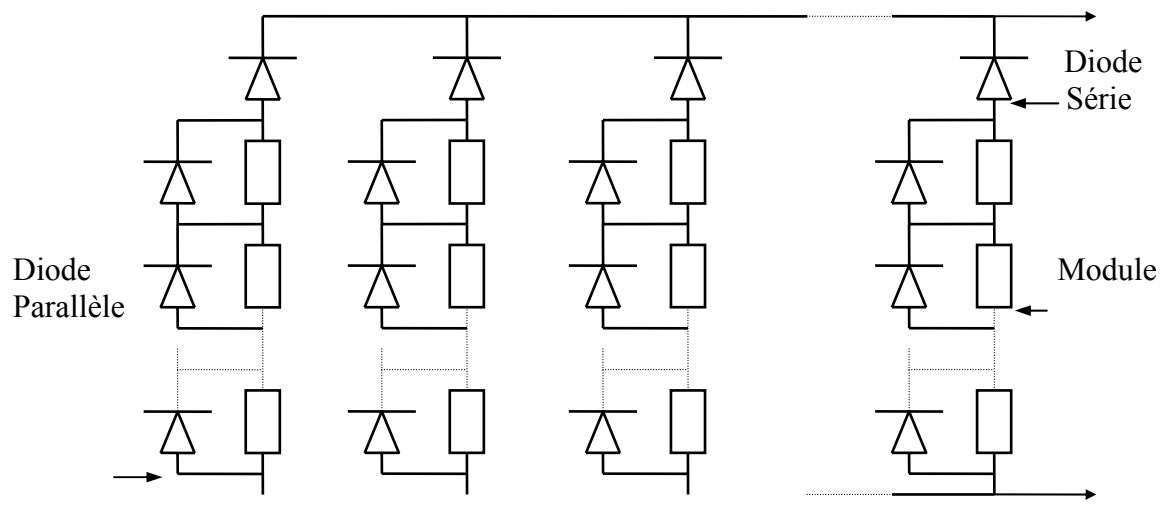


Figure A5-2. Câblage d'un champ photovoltaïque avec les diodes

¹ Lorsqu'un module photovoltaïque est partiellement masqué, certaines cellules se transforment en résistance et s'échauffent. Cela a pour conséquence d'altérer les modules qui doivent être protégés par des diodes by-pass.

Notons que les modules solaires sont généralement montés sur un support pour constituer des panneaux solaires.

Lors de leur installation, il est important de savoir donner une orientation et une inclinaison adéquate aux panneaux solaire. Ils doivent être placés perpendiculairement au soleil pour obtenir un résultat optimal. Or, le rayonnement solaire n'est pas tout le temps perpendiculaire à la surface du sol. C'est pour cette raison que les panneaux devraient être installés avec une certaine inclinaison et orientés en direction du Sud. Les performances saisonnières d'un panneau solaire varient selon l'inclinaison², alors que les performances quotidiennes dépendent essentiellement de l'orientation³ par rapport au Sud. En hiver par exemple, par rapport à un panneau posé horizontalement, le rendement peut être multiplié par 2 si ce panneau est incliné.

En résumé l'installation des modules peut se faire sur un toit ou à même le sol si son orientation et son inclinaison sont bonnes. Pour garantir ceci, on les place habituellement avec la pente vers l'équateur (vers le Sud dans l'hémisphère Nord). L'inclinaison des panneaux est en général prise égale à la latitude, avec une tolérance de 15°.

► Les batteries

Le caractère intermittent et aléatoire de l'énergie solaire pose le problème du stockage au niveau des installations photovoltaïques. En effet, l'apport et les besoins en énergie ne coïncident pas, les besoins augmentent là où les apports solaires n'existent pas, comme c'est le cas pour les systèmes d'éclairage dont le besoin augmente la nuit. Une batterie s'impose donc dans la majorité des cas. Cette batterie aura pour rôle de maintenir en service une charge en période d'ensoleillement ou en l'absence d'ensoleillement.

Le moyen le plus adapté aux systèmes PV est le stockage électrochimique. Les accumulateurs électrochimiques permettent de stocker l'énergie électrique sous forme chimique pour la restituer à tout moment et sur demande grâce à des réactions réversibles.

On distingue deux types de stockage suivant la demande énergétique et suivant les conditions météorologiques du pays:

Le stockage à courte durée

Il s'agit du stockage utilisé pour satisfaire les besoins pendant la nuit ou pendant les passages nuageux et les incidents matériels qui peuvent surgir dans les modules solaires. Ce type de stockage de faible durée ne nécessite pas une grande capacité.

² Angle formé par le plan du module et le plan horizontal

³ Angle entre le Sud et la projection horizontale de la normale au module (positif à l'Ouest et négatif à l'Est)

Le stockage saisonnier ou de longue durée

Ce type de stockage est utilisé pour absorber l'excès d'énergie en été pour l'utiliser en hiver, ce qui nécessite une grande capacité de stockage.

Les accumulateurs les plus utilisés dans les applications photovoltaïques sont les accumulateurs au plomb.

La température a une influence sur la force électromotrice de l'élément d'accumulateur, sur la résistivité des constituants et surtout sur la résistivité et la viscosité de l'électrolyte. En effet, pour les basses températures, les éléments perdent une partie importante de leur capacité due à l'augmentation de la viscosité de l'électrolyte. Les basses températures font aussi chuter la tension des accumulateurs due surtout à l'augmentation de la résistivité de l'électrolyte. Par exemple, pour les accumulateurs au plomb, les pertes de capacité sont de 0,6 % par degré Celsius et ceci pour les températures inférieures à 25°C. D'autre part, les températures excessives provoquent des pertes de capacité et d'énergie par autodécharge. Notons aussi que les éléments de la batterie installée utilisent des bouchons recombinateurs pour espacer les rajouts d'eau distillée.

► Systèmes de régulation, de contrôle et de gestion

Ces systèmes assurent la gestion de l'installation photovoltaïque. Ils permettent entre autres le contrôle automatique du fonctionnement des modules solaires, le contrôle de l'état de charge et de décharge de la batterie et la conversion du courant continu en alternatif.

- **Le régulateur**

Le régulateur de charge est un système qui assure le contrôle automatique de l'état de charge et de décharge de la batterie afin d'en maximiser la durée de vie, en évitant les surcharges et les décharges profondes⁴.

Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée pour éviter la consommation d'eau, le dégagement de l'hydrogène et l'oxydation des plaques.

Dans le cas où la batterie est complètement déchargée (absence de l'énergie solaire), il est nécessaire d'interrompre la décharge pour éviter le recouvrement des plaques négatives de sulfate de plomb. Dans les deux cas, le régulateur de charge intervient pour protéger la batterie grâce aux éléments de coupures (relais, contacteurs, thyristors, ...) qui le constituent.

Ainsi, la durée de vie d'une batterie sera considérablement allongée si l'on évite autant que possible des surcharges importantes et des décharges profondes.

⁴ Un accumulateur au plomb ne devrait pas être déchargé en dessous d'un seuil spécifié par le fabricant

- **L'adaptateur**

L'adaptateur est un convertisseur continu–continu, son rôle est de suivre le point de puissance maximale du générateur photovoltaïque et donc d'assurer l'adaptation d'impédance entre le générateur photovoltaïque et la charge.

- **L'onduleur**

L'onduleur convertit la tension continue en tension alternative pour satisfaire les charges fonctionnant en alternatif.

- **La charge**

Dans une installation photovoltaïque la charge est le dispositif électrique qui est alimenté par le système. Selon les besoins, la demande énergétique peut présenter différents profils: Elle peut être par exemple constante ou aléatoire.

Les charges constantes représentent en général l'éclairage public et le balisage, alors que les charges aléatoires sont utilisées dans la consommation domestique.

CONFIGURATIONS DES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

▀ Les systèmes à couplage direct

Ce sont des systèmes qui fonctionnent sans stockage électrique, c'est pour cela qu'on dit qu'ils fonctionnent "au fil du soleil". Comme indiqué dans la figure (A5-3), les appareils utilisateurs sont branchés soit directement sur le champ photovoltaïque, soit éventuellement par l'intermédiaire d'un adaptateur d'impédance qui assure la conversion continu–continu. L'application la plus courante de cette configuration est le pompage de l'eau.

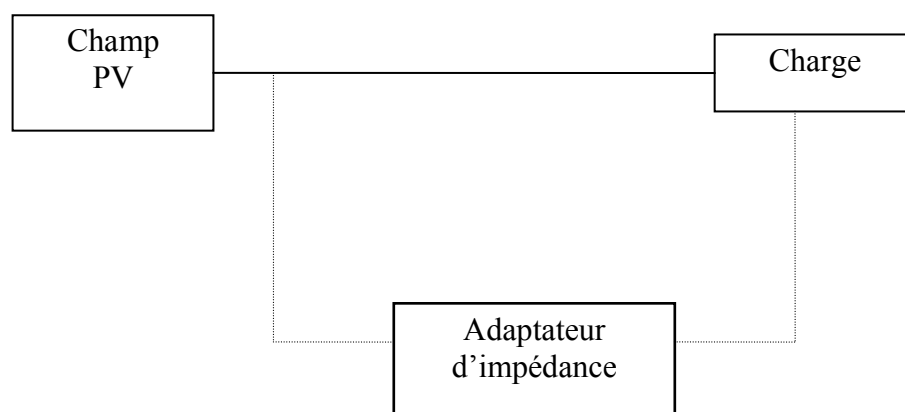


Figure A5-3. Schéma bloc d'un système PV à couplage direct

► Les systèmes autonomes

Ce sont des systèmes fonctionnant avec stockage électrique, ils sont indépendants du réseau électrique. Une batterie accumule les excédents d'électricité produits par les modules et les restitue en cas de besoin.

La figure (A5-4) représente le schéma bloc d'un système photovoltaïque autonome.

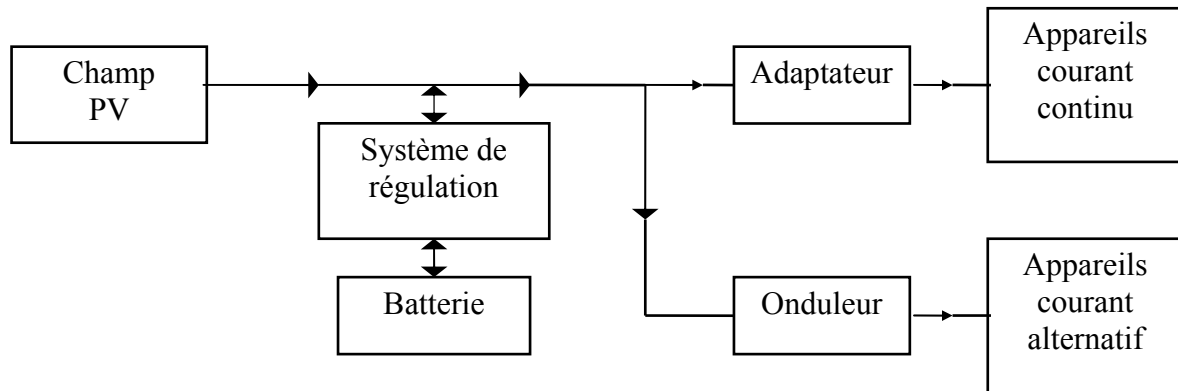


Figure A5-4 : Schéma bloc d'un système PV autonome

Ce type d'installation est généralement utilisé dans les régions situées à l'écart du réseau électrique, par exemple les habitats solaires en sites isolés.

► Les systèmes d'appoint

Dans ces systèmes on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas de besoin. Ceci permet de satisfaire la demande énergétique pendant la période de faible ensoleillement.

Comme indiqué par la figure (A5-5), les générateurs auxiliaires alimentent directement la charge dans le cas de déficit solaire. Dans le cas où la charge est satisfaite et la batterie n'est pas complètement chargée ces générateurs sont activés par le système de régulation pour charger la batterie.

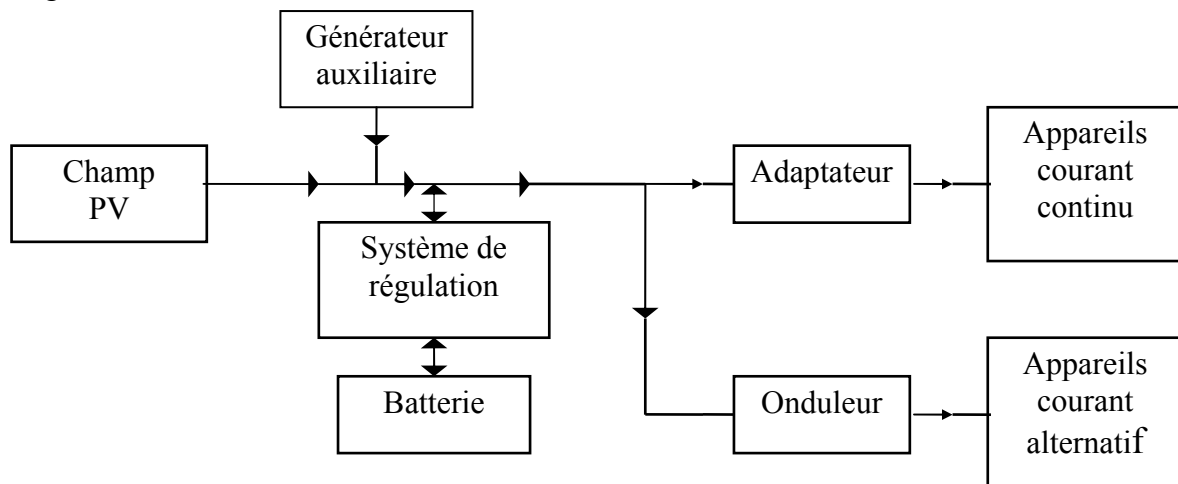


Figure A5-5. Schéma bloc d'un système PV d'appoint

► Les systèmes connectés au réseau de distribution électrique

Ce sont des systèmes dont le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un onduleur. Ces systèmes ont pour objectif d'injecter l'énergie excédentaire dans le réseau de distribution et d'en extraire l'énergie nécessaire lorsqu'il y a un déficit (Figure (A5-6)).

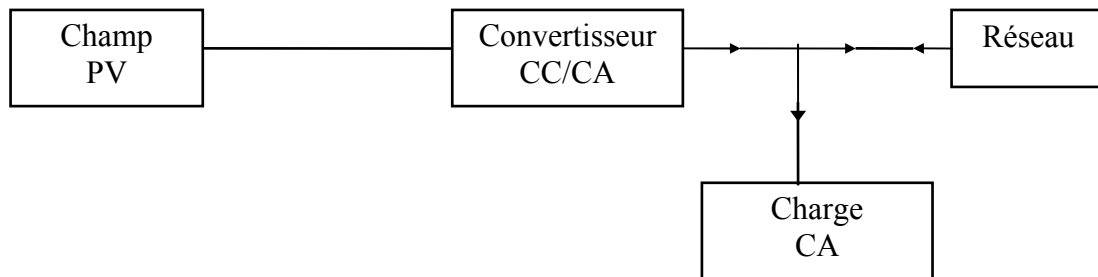


Figure A5-6. Schéma bloc d'un système relié au réseau de distribution électrique

Ce type de système concerne les installations importantes en puissance et fonctionnant avec convertisseur continu-alternatif central mono ou triphasé.

Table des illustrations

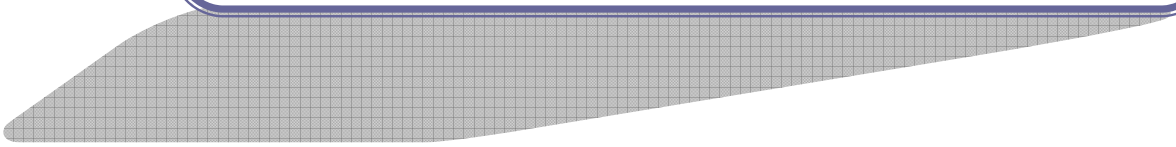


TABLE DES ILLUSTRATIONS

<i>Figure I-1. Exemple illustrant la méthode de Box-counting</i>	<i>9</i>
<i>a) Recouvrement de la courbe par une grille de boîtes.....</i>	<i>9</i>
<i>b) Tracé de la droite log-log</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-2. Exemple illustrant la méthode de Minkowski-Bouligand</i>	<i>11</i>
<i>a) Le recouvrement de Minkowski.....</i>	<i>11</i>
<i>b) Tracé de la droite log-log</i>	<i>11</i>
<i>Figure I-3. Recouvrement d'une courbe temporelle par des rectangles.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I-4. Exemple de droite log-log ajustée par la méthode des moindres carrés.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I-5. Calcul des distances d_i entre les points réels de la droite (I.12) et la droite ajustée</i>	<i>17</i>
<i>Figure I-6. Trois exemples de signaux générés par la fonction FW.....</i>	<i>21</i>
<i>a) $D=1.2$ b) $D=1.5$ c) $D=1.8$</i>	<i>21</i>
<i>Figure I-7. Trois exemples de signaux MBF</i>	<i>22</i>
<i>a) $D=1.2$ b) $D=1.5$ c) $D=1.8$</i>	<i>22</i>
<i>Figure I-8. Exemples de tracés log-log de signaux WF avec $N = 100$</i>	<i>25</i>
<i>Figure I-9. Exemples de tracés log-log de signaux WF avec $N = 1000$</i>	<i>25</i>
<i>Figure I-10. Exemples de tracés log-log de signaux MBF avec $N = 100$.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure I-11. Exemples de tracés log-log de signaux MBF avec $N = 1000$.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II-1. Les composantes du rayonnement solaire.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II-2. Image du site de Tahifet</i>	<i>34</i>
<i>Figure II-3. Images des sites de Colorado</i>	<i>35</i>
<i>a) Chaîne d'acquisition de données de BSRN (Golden).....</i>	<i>35</i>
<i>b) Tour de NWTC (Boulder)</i>	<i>35</i>
<i>Figure II-4. Image du système PV en cours d'installation dans une maison à Palo Alto</i>	<i>36</i>
<i>Figure II-5. Exemples d'histogrammes des éclairagements de Tahifet</i>	<i>38</i>
<i>a) Journée du 20 Mars 1992</i>	<i>38</i>
<i>b) Journée du 28 Novembre 1992</i>	<i>38</i>
<i>c) Journée du 20 Juin 1992.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure II-6. Exemples d'histogrammes des éclairagements de Golden.....</i>	<i>39</i>
<i>a) Journée du 09 Juillet 2003.....</i>	<i>39</i>
<i>b) Journée du 19 Mars 2003</i>	<i>39</i>
<i>c) Journée du 07 Mai 2003</i>	<i>39</i>

Figure II-7. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de l'irradiation journalière des sites étudiés.....	40
Figure II-8. Histogrammes annuels de l'irradiation journalière des sites étudiés.....	41
Figure II-9. Evolution annuelle de l'irradiation journalière H et de l'irradiation journalière hors atmosphère H_0 des sites étudiés.....	42
Figure II-10. Exemples de tracés log-log permettant l'estimation de $\hat{D}$ des signaux d'éclairements a) Golden b) Boulder.....	43
Figure II-11. Différents signaux d'éclairement avec leurs dimensions fractales	46
a)Golden, à gauche: 12 Janvier 2003, au centre: 19 Octobre 2003, à droite: 21 Décembre 2003.....	46
b)Boulder, à gauche: 15 Août 2003, au centre: 19 Novembre 2003, à droite: 22 Janvier 2003.....	46
c)Tahifet, à gauche: 05 Février 1992, au centre: 16 Avril 1992, à droite: 29 Décembre 1992.....	46
Figure II-11 (suite). Différents signaux d'éclairement avec leurs dimensions fractales	47
d)Imehrou, à gauche: 06 Mai 1992, au centre: 12 Juillet 1992, à droite: 27 Avril 1992	47
e)Palo Alto, à gauche: 31 Mai 2003, au centre: 13 Juin 2003, à droite: 22 Mars 2003	47
Figure II-12.a. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Golden.....	48
Figure II-12.b. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Boulder.....	49
Figure II-12.c. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Tahifet.....	50
Figure II-12.d. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Imehrou	51
Figure II-12.e. Dimensions fractales des signaux d'éclairement à Palo Alto.....	52
Figure II-13. Variation annuelle de la moyenne mensuelle de la dimension fractale estimée $\hat{D}$, la ligne droite représente la moyenne annuelle de la dimension fractale $\langle \hat{D} \rangle$	53
Figure II-14. Exemples de signaux d'éclairement appartenant aux 3 classes obtenues.....	56
a)Golden, à gauche: 19 Février, $\hat{D}=1.01$, au centre: 14 Janvier, $\hat{D}=1.39$, à droite: 26 Avril, $\hat{D}=1.61$	56
b)Boulder, à gauche: 21 Septembre, $\hat{D}=1.03$, au centre: 19 Janvier, $\hat{D}=1.36$, à droite: 10 Janvier, $\hat{D}=1.70$	56
c)Tahifet, à gauche: 29 Mai, $\hat{D}=1.08$, au centre: 30 Avril, $\hat{D}=1.22$, à droite: 04 Juillet, $\hat{D}=1.18$	56
Figure II-14 (suite). Exemples de signaux d'éclairement appartenant aux 3 classes obtenues	57
d)Imehrou, à gauche: 10 Octobre, $\hat{D}=1.00$, au centre: 16 Février, $\hat{D}=1.18$, à droite: 27 Avril, $\hat{D}=1.64$	57
e)Palo Alto, à gauche: 13 Mai, $\hat{D}=1.13$, au centre: 04 Mars, $\hat{D}=1.25$, à droite: 20 décembre, $\hat{D}=1.76$	57

Figure II-15. Exemple de journée pluvieuse avec une allure assez régulière (15 Juillet 2003 à Golden).....	62
Figure II-16. Probabilité de transition entre les journées d et $d+1$	64
Figure III-1. Système en phase d'expérimentation à Imehrou – Illizi – 1992/1997.....	67
Figure III-2. Schéma synoptique de l'installation de Tahifet.....	68
Figure III-3. Schéma de principe de l'installation	71
Figure III-4. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de E_g	74
Figure III-5. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de E_c	74
Figure III-6. Samedi 05/06/2000, le système PV de Palo Alto atteint la phase finale de son installation.....	75
Figure III-7. Module Astropower API206	75
Figure III-8. Convertisseur SW4048.....	76
Figure III-9. Véhicule électrique en cours d'alimentation grâce à l'énergie solaire.....	76
Figure III-10. Schéma global de l'installation PV de Palo Alto.	77
Figure III-11. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle de E_g et E_c	78
Figure III-12. Nuages de points représentant E_g en fonction de H	79
Figure III-13. Histogrammes des rendements journaliers du générateur PV.....	81
Figure III-14. Evolution annuelle de la moyenne mensuelle des rendements journaliers.....	82
Figure III-15. Moyennes mensuelles des indices de performance Y_A , Y_f et les pertes L_C et L_s 85 a) Tahifet b) Imehrou c) Palo Alto	85
Figure III-16. Moyennes mensuelles des taux de performance PR	86
Figure III-17. Courbes d'éclairements solaires des journées types	89
a) Tahifet b) Imehrou c) Palo Alto	89
Figure IV-1. Localisation de Barro Colorado Island (BCI) et la tour « Lutz ».....	101
Figure IV-2. Evolution annuelle (a) et pluriannuelle (b) de l'irradiation journalière de BCI	102
Figure IV-3. Evolution des irradiances annuelles pour une longitude de -122.75 et une latitude de 48.75 a) Période (1895-1993) b) Période (1895-2099).....	103
Figure IV-4. Evolution des irradiances annuelles pour une longitude de -84.75 et une latitude de 30.75 a) Période (1895-1993) b) Période (1895-2099)	103
Figure (IV-5)-a. Exemples de tracés log-log des irradiances journalières.....	105
Figure (IV-5)-b. Exemples de tracés log-log des irradiances annuelles de la série globale (1895-2099)	106

<i>Figure A1-1. Fougère de Barnsley, Fractale étudiée par Michael Barnsley en 1988</i>	<i>A1-2</i>
<i>Figure A1-2. Chou-fleur coupe.....</i>	<i>A1-3</i>
<i>Figure A1-3. Exemple de fractale auto-affine</i>	<i>A1-4</i>
<i>Figure A1-4. Exemple de construction d'une fractale</i>	<i>A1-4</i>
<i>Figure A1-5. Ensemble de Cantor</i>	<i>A1-5</i>
<i>Figure A1-6. Courbe de Peano.....</i>	<i>A1-6</i>
<i>Figure A1-7. Construction de la courbe de Peano-Hilbert.....</i>	<i>A1-6</i>
<i>Figure A1-8. Construction du flocon de Von Koch</i>	<i>A1-7</i>
<i>Figure A1-9. Construction du triangle de Sierpinski.....</i>	<i>A1-8</i>
<i>Figure A1-10. Exemples de courbes fractales de Julia selon la valeur de C.....</i>	<i>A1-10</i>
<i>Figure A1-11. Ensemble de Mandelbrot.....</i>	<i>A1-11</i>
<i>Figure A2-1. Calcul de la dimension fractale d'une ligne droite.....</i>	<i>A2-1</i>
<i>Figure A2-2. Calcul de la dimension fractale d'un carré.....</i>	<i>A2-2</i>
<i>Figure A2-3. Calcul de la dimension fractale d'un cube</i>	<i>A2-2</i>
<i>Figure A3-1. Distribution spectrale du rayonnement électromagnétique depuis les rayonnements radio jusqu'aux rayons X.....</i>	<i>A3-2</i>
<i>Figure A3-2. Différents processus atmosphériques régissant le rayonnement solaire</i>	<i>A3-3</i>
<i>Figure A3-3. Schéma de base d'un pyranomètre (modèle CM6).....</i>	<i>A3-4</i>
<i>Figure A3-4. Schéma de base d'un pyréliomètre (Type NIP).....</i>	<i>A3-5</i>
<i>Figure A5-1. Schéma d'un champ photovoltaïque</i>	<i>A5-2</i>
<i>Figure A5-2. Cablage d'un champ photovoltaïque avec les diodes</i>	<i>A5-2</i>
<i>Figure A5-3. Schéma bloc d'un système PV à couplage direct.....</i>	<i>A5-5</i>
<i>Figure A5-4 : Schéma bloc d'un système PV autonome</i>	<i>A5-6</i>
<i>Figure A5-5. Schéma bloc d'un système PV d'appoint.....</i>	<i>A5-6</i>
<i>Figure A5-6. Schéma bloc d'un système relié au réseau de distribution électrique</i>	<i>A5-7</i>

<i>Tableau I-1. Résultats d'estimation de la dimension fractale des signaux FW de taille 500 avec la méthode du recouvrement rectangulaire.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau I-2. Résultats d'estimation de la dimension fractale des signaux MBF de taille 500 avec la méthode du recouvrement rectangulaire.....</i>	<i>23</i>
<i>Tableau I-3. Résultats d'estimation de la dimension fractale de signaux FW de différentes tailles N avec la méthode du recouvrement rectangulaire.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau I-4. Résultats d'estimation de la dimension fractale de signaux MBF de différentes tailles N avec la méthode du recouvrement rectangulaire.....</i>	<i>24</i>
<i>Tableau II-1. Coordonnées géographiques des sites étudiés</i>	<i>34</i>
<i>Tableau II-3. Dimensions fractales minimales et maximales des sites étudiés</i>	<i>45</i>
<i>Tableau II-4. Moyennes annuelles $\langle \hat{D} \rangle$ et écarts types σ de la dimension fractale.</i>	<i>45</i>
<i>Tableau II-5. Seuils de la dimension fractale des sites de Tahifet et Imehrou obtenus avec les 2 méthodes : la méthode FDC et la méthode empirique</i>	<i>54</i>
<i>Tableau II-6. Seuils de la dimension fractale des sites étudiés obtenus avec la méthode FDC</i>	<i>55</i>
<i>Tableau II-7. Pourcentage des journées constituant chaque classe.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau II-8. Caractéristiques mensuelles de chaque classe obtenue pour les différents sites (1^{er} semestre).....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau II-9. Caractéristiques mensuelles de chaque classe obtenue pour les différents sites (2^{ème} semestre).....</i>	<i>60</i>
<i>Tableau II-10. Paramètres statistiques annuels de la dimension fractale et de l'indice de clarté des classes obtenues pour les différents sites</i>	<i>61</i>
<i>Tableau (III-1). Exemple de mesures réalisées par la chaîne d'acquisition le 1 Janvier à Imehrou.....</i>	<i>72</i>
<i>Tableau (III-2). Comparaison entre les valeurs moyennes des indices de performance journaliers calculés pour chaque classe et celles obtenues pour les journées types (les indices de performance et les pertes sont exprimés en (kWh/j)/kWc).....</i>	<i>90</i>
<i>Tableau (III-3). Ecart entre les valeurs moyennes et celles des journées types des indices de performance et du rendement de conversion du générateur PV</i>	<i>91</i>
<i>Tableau IV-2. Dimensions fractales de l'irradiation annuelle sur une période de 205 ans (1895-2099) pour différentes latitudes et longitudes</i>	<i>108</i>

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] R. Lestienne, Ph. Bois et Ch. Obled, "Analyse temporelle et cartographie de la matrice stochastique pour le modèle Markovien dans le midi de la France", *La Météorologie*, Vol. 17, pp. 83-122, 1979.
- [2] R. J. Aguiar, M. Collores-Pereira and J. P. Conde, "Simple procedure for generating sequences of daily radiation values using a library of Markov transition Matrices", *Solar Energy*, Vol. 40, pp. 269-279, 1988.
- [3] A. Maafi, "Mise en évidence d'aspects physiques du modèle Markovien du premier ordre à deux états en météorologie solaire : Application à la conversion photovoltaïque", Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique, USTHB, Alger, Algérie, 1991.
- [4] A. Maafi, "Markov-Models in discrete time for solar radiation", *Proceedings of Multiconference on Computational Engineering in Systems Applications (IMACS-IEEE)*, Nabeul-Hammamet (Tunisia), Vol. 2, pp.319-322, April 1-4, 1998.
- [5] A. Maafi and A. Adane, "A two-state Markovian model of global irradiation suitable for photovoltaic conversion", *Solar and Wind Technology*, Vol. 6, pp. 247-252, 1989.
- [6] R. Aguiar and M. Collares-Pereira, "TAG: A time-dependent autoregressive, Gaussian model for generating synthetic hourly radiation", *Solar Energy*, Vol. 49, pp. 167-174, 1992.
- [7] C. Bénard, E. Boileau et B. Guerrier, "Modélisation de l'irradiation solaire globale à l'aide de processus ARMA: Application à la prédiction à faible pas de temps (horaire), en vue de l'établissement de commandes optimales dans l'habitat", *Revue de Physique Appliquée*, Vol. 20, pp. 845-855, 1985.
- [8] J. L. Duomarco, "Calculation of hourly values of direct radiation using artificial neural networks", *Proceedings of World Renewable Energy Congress V (WREC'98)*, Florence (Italy), pp. 2567-2570, September 20-25, 1998.
- [9] A. Guessoum, S. Boubekour and A. Maafi "A global irradiation model using radial basis function neural networks", *Proceedings of World Renewable Energy Congress V (WREC'98)*, Florence (Italy), Vol. 6, pp. 2533-2536, September 20-25, 1998.
- [10] Y. Kemmoku, S. Orita, S. Nakagawa and T. Sakakibara "Daily insolation forecasting using a multi-stage neural network", *Solar Energy*, Vol. 66, pp. 193-199, 1999.
- [11] A. Sfetsos and A. H. Coonick, "Univariate and multivariate forecasting of hourly solar radiation with artificial intelligence techniques", *Solar Energy*, Vol. 68, pp. 169-178, 2000.
- [12] M. Yousif and M. K. Darwish "Prediction of clearness index using artificial neural network technique", *Proceedings of World Renewable Energy Congress V (WREC'98)*, Florence (Italy), pp. 2595-2598, September 20-25, 1998.

-
- [13] A. Louche, G. Notton, P. Poggi and G. Simonot, "Classification of direct irradiation days in view of energetic applications", *Solar Energy*, Vol. 46, pp. 255-259, 1991.
- [14] A. Maafi and S. Harrouni, "Measuring the fractal dimension of solar irradiance in view of PV systems performance analysis", *Proceedings of World Renewable Energy Congress VI (WREC'00)*, Brighton (UK), Vol. 4, pp. 2032-2035, 1-7 July, 2000.
- [15] S. Harrouni, "Traitement de signaux hélio-électriques résultant du monitoring des systèmes photovoltaïques", Thèse de Magister en Electronique, U.S.T.H.B, Alger, Algérie, 2000.
- [16] H.-O. Peitgen, H. Jürgens and D. Saupe, "Chaos and Fractals, New Frontiers of Science", New York: Springer-Verlag, 1992.
- [17] B. B. Mandelbrot, "The Fractal Geometry of Nature", New York: Freeman, 1982/1983.
- [18] M. F. Barnsley, "Fractals Everywhere", New York: Academic Press, 1988 1st ed., 1993 2nd ed.
- [19] M. Schroeder, "Fractals, Chaos, Power Laws. Minutes from an Infinite Paradise", New York: W. H. Freeman, 1991.
- [20] R. L. Devaney, "Chaos, Fractals and Dynamics. Computer Experiments in Mathematics", Singapore: Addison-Wesley, 1989.
- [21] K. J. Falconer, "The Geometry of Fractal Sets", New York: Cambridge University Press, 1985.
- [22] K. J. Falconer, "Fractal Geometry, Mathematical Foundations and Applications", New York: John Wiley, 1990.
- [23] B. H. Kaye, "A Random Walk Through Fractal Dimension", Germany: 2nd ed., VCH, Weinheim, 1994.
- [24] H. O. Peitgen, E. Maletsky, H. Jurgens, T. Perciante, D. Saupe and L. Yunker, "Fractals for the Classroom: Part One, Introduction to Fractals and Chaos", New York: Springer-Verlag, 1991.
- [25] H. O. Peitgen, E. Maletsky, H. Jurgens, T. Perciante, D. Saupe and L. Yunker, "Fractals for the Classroom: Part Two, Complex Systems and Mandelbrot Sets", New York: Springer-Verlag, 1992.
- [26] B. Sapoval, "Universalités et fractales, jeux d'enfant ou délits d'initié", Paris: Flammarion, 1997.
- [27] B. Sapoval, "Universalités et fractales", Réédition dans la collection de poche Champs, Paris: Flammarion, 2001.
- [28] B. Mandelbrot, "Les objets fractals: formes, hasard et dimension (suivi de Survol du langage fractal)", Paris : Flammarion, 1975 1^{ère} éd., 1984 2^{ème} éd., 1989 3^{ème} éd., 1995 4^{ème} éd.
- [29] B. Mandelbrot, "Les objets fractales, Paris: Flammarion, 1975 1^{ère} éd., 1984 2^{ème} éd., 1989 3^{ème} éd., 1995 4^{ème} éd.

- [30] N. Lesmoir-Gordon, W. B. Rood, R. Edney, "Introducing fractal geometry", Totem Books, 2000.
- [31] J. L. Véhel, E. Lutton, "Fractales : Technique et science informatique", Hermès, 2002.
- [32] G. A. Edgar, "Classics on Fractals", Seoul: Addison-Wesley, 1989.
- [33] B. Mandelbrot, "Gaussian Self-Affinity and Fractals: Globality, the Earth, 1/F Noise, R/S", New York: Springer-Verlag, 2001.
- [34] D. Harte, "Multifractals: Theory and Application", New York: Chapman & Hall/CRC Press, 2001.
- [35] J. Kigami, "Analysis on Fractals", New York: Cambridge University Press, 2001.
- [36] B. J. West, M. Bologna, P. Grigolini, "Physics of Fractal Operators", New York: Springer-Verlag, 2003.
- [37] J. Gaches, M. Attéia, "Approximation hilbertiennes : Splines, ondelettes, fractales", Paris: EDP Sciences, 1999.
- [38] B. Mandelbrot, M. L. Frame, "Fractals, Graphics and Mathematics Education", New York: Cambridge University Press, 2002.
- [39] L. T. Fan, D. Neogi and M. Yashima, "Elementary Introduction to Spatial and temporal Fractals", Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [40] J-F. Gouyet, "Physique & Structures Fractales", Paris : Masson, 1996.
- [41] B. Mandelbrot, "Fractales, Hasard et Finance", Paris : Flammarion, 1980.
- [42] B. Mandelbrot, "Fractals and Scaling in Finance: Discontinuity, concentration, risk: selecta volume E", New York: Springer-Verlag, 1997.
- [43] K.-H. Becker et M. Dörfler, "Dynamical Systems and Fractals, Computer Graphics Experiments in Pascal", Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1989.
- [44] R. T. Stevens, "Fractal Programming in C", Redwood City, CA: M & T Books, 1989.
- [45] R. T. Stevens, "Fractal Programming and Ray Tracing with C++", Redwood City, CA: M & T Books, 1990.
- [46] T. Wegner, B. Tyler and M. Peterson, "The Waite Group's Fractal Creations", Mill Valley, CA: Waite Group Press, 1992.
- [47] T. Wegner and M. Peterson, "The Waite Group's Fractals for Windows", Mill Valley, CA: Waite Group Press, 1992.
- [48] P. Melin and O. Castillo, "Modelling, Simulation and Control of Non-linear Dynamical Systems: An Intelligent Approach using Soft Computing and Fractal Theory", USA: CRC Press, 2002.
- [49] H.-O. Peitgen and P. H. Richter "The Beauty of Fractals: Images of Complex Dynamical Systems", Berlin: Springer-Verlag, 1986.

-
- [50] H.-O. Peitgen and D. Saupe, "The Science of Fractal Images", New York: Springer-Verlag, 1988.
- [51] D. Mumford, C. Series and D. J. Wright, "Indra's Pearls, The Vision of Felix Klein", New York: Cambridge University Press, 2002.
- [52] M. F. Barnsley, D. Saupe and E. R. Vrscay, "Fractals in Multimedia", New York: Springer-Verlag, 2002.
- [53] N. Lu, "Fractal Imaging", San Diego: Academic Press, 1997.
- [54] Y. Fisher, "Fractal Image Compression: Theory and Application", New York: Springer-Verlag, 1995.
- [55] S. Condé, "La Fractalité dans l'art Contemporain", Paris: La différence, 2001.
- [56] D. L. Jaggard, "Prolog to Special section on fractals in electrical engineering", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 81, pp. 1423-1427, October 1993.
- [57] J-S. Lee and K-S. Chang, "Applications of chaos and fractals in process systems engineering", *Journal of Process Control*, Vol. 6, pp. 71-87, 1996.
- [58] P. B. DePetrillo, A. Speers and U. E. Ruttimann, "Determining the Hurst exponent of fractal time series and its application to electrocardiographic analysis", *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 29, pp. 393-406, 1999.
- [59] A. P. Accardo and E. Mumolo, "An algorithm for the automatic differentiation between the speech of normals and patients with Friedreich's ataxia based on the short-time fractal dimension", *Computers in Biology and Medicine*, Vol. 28, pp. 75-89, 1998.
- [60] J. A. Gitter and M. J. Czerniecki, "Fractal analysis of the electromyographic interference pattern", *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 58, pp. 103-108, 1995.
- [61] C. Fortin, R. Kumaresan, W. Ohley and S. Hofer, "Fractal dimension, in the analysis of medical images", *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, Vol. 11, pp. 65-71, 1992.
- [62] F. Caserta, W. D. Eldred, E. Fernandez, R. E. Hausman, L. R. Stanford, S. V. Bulderev, S. Schwaezer and H. E. Stanley, "Determination of fractal dimension of physiologically characterized neurons in two and three dimensions", *Journal of Neuroscience Methods*, Vol. 56, pp. 133-144, 1995.
- [63] E. L. J. Bohez and T. R. Senevirathne, "Speech recognition using fractals", *Pattern Recognition*, Vol. 34, pp. 2227-2243, 2001.
- [64] R. D. Valdez-Cepeda and E. Olivares-Saenz, "Fractal analysis of Mexico's annual mean yields of maize, bean, wheat and rice", *Field Crops Research*, Vol. 59, pp. 53-62, 1998.
- [65] B. Eghball, G. W. Hergert, G. W. Lesoing and R. B. Ferguson, "Fractal analysis of spatial and temporal variability", *Geoderma*, Vol. 88, pp. 349-362, 1999.
- [66] V. Latora, A. Rapisarda and S. Vinciguerra, "A fractal approach to the temporal distribution of microseismicity at the low eastern flank of Mt. Etna during 1989-1994", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 109, pp. 115-127, 1998.
- [67] S-C. Liu and S. Chang, "Dimension estimation of discrete-time fractional Brownian motion with applications to image texture classification", *IEEE Transactions on Image*

- Processing*, Vol. 6, pp. 1176-1184, 1997.
- [68] P. Maragos & F.K. Sun, "Measuring the fractal dimension of signals: morphological covers and iterative optimization", *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol. 41, pp. 108-121, 1993.
 - [69] T. Vicsek, "Fractal Growth Phenomena", Singapore: World scientific, 2nd ed. 1992.
 - [70] G. Bouligand, "Ensembles impropres et nombres dimensionnel", *Bulletin des Sciences Mathématiques*, Vol. II-52, pp. 320-344, 1928.
 - [71] H. Minkowski, "Über die Bgriffe Lange, Oberfläche und Volumen, Jahresber", *Deutch. Mathematikerverein*, Vol. 9, pp. 115-121, 1901.
 - [72] B. Dubuc, F. Quiniou, C. Roques-Carmes, C. Tricot & S. W. Zucker, "Evaluating the fractal dimension of profiles", *Physical Review A*, Vol. 39, pp. 1500-1512, 1989.
 - [73] P. Maragos & F.K. Sun, "Measuring the fractal dimension of signals: morphological covers and iterative optimization", *IEEE Transaction on Signal Processing*, Vol. 41, pp. 108-121, 1993.
 - [74] X. Zeng, L. Koehl,, C. Vasseur, "Design and implementation of an estimator of fractal dimension using fuzzy techniques", *Pattern Recognition*, Vol. 34, pp. 151-169, 2001.
 - [75] Q. Huang, J.R. Lorch, & R.C. Dubes, "Can the fractal dimension of images be measured?", *Pattern Recognition*, Vol. 27, pp. 339-349, 1994.
 - [76] C. Tricot, J. F. Quiniou, D. Wehbi, C. Roques-Carmes & B. Dubuc, "Evaluation de la dimension fractale d'un graphe", *Revue de Physique*, Vol. 23, pp. 111-124, 1988.
 - [77] L. S. Liebovitch & T. I. Toth "Fast algorithm to determine fractal dimension by box counting", *Physics Letters A*, Vol. 141, pp. 386-390, 1989.
 - [78] S. Harrouni et A. Maafi, "Traitement fractal de signaux climatiques", *1^{ère} Conférence sur le Génie Electrique (CGE'01)*, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), 25-26 Décembre 2001.
 - [79] S. Harrouni et A. Guessoum, "Mesure de la dimension fractale des signaux temporels discrets", *2^{ème} Conférence sur le Génie Electrique (CGE'02)*, Ecole Militaire Polytechnique (EMP), 17-18 Décembre 2002.
 - [80] S. Harrouni, A. Maafi et A. Guessoum, "Nouveau recouvrement pour l'estimation de la dimension fractale des signaux d'éclairement solaire", *2^{ème} Conférence Internationale sur les Sciences de l'Electronique, Technologie de l'Information et Télécommunications (SETIT,IEEE)*, Sousse (Tunisie), 15-20 Mars 2004.
 - [81] S. Harrouni, et A. Guessoum, "Nouvelle méthode d'estimation de la dimension fractale des courbes temporelles discrètes: Application aux signaux MBF", *3^{ème} Conférence Internationale sur les Sciences de l'Electronique, Technologie de l'Information et Télécommunications (SETIT, IEEE)*, Sousse (Tunisie), 27-31 Mars 2005.
 - [82] S. Harrouni, A. Guessoum et A. Maafi, "Optimisation de la mesure de la dimension fractale des signaux : Application aux éclairagements solaires", *Séminaire National sur l'Automatique et les Signaux (SNAS'02)*, Université de Annaba, 27-28 Octobre 2002.

-
- [83] G. H. Hardy, "Weierstrass's non-differentiable function", *Transaction of the American Mathematical Society*, Vol. 17, pp. 322-323, 1916.
 - [84] M. V. Berry & Z. V. Lewis, "On the Weierstrass-Mandelbrot fractal function", *Proceedings of the Royal Society of London A*, Vol. 370, pp. 459-484, 1980.
 - [85] B. Mandelbrot & J. W. Van Ness, "Fractional Brownian motions: Fractional noises and applications", *SIAM Review*, Vol. 10, pp. 122-137, 1968.
 - [86] B. Mandelbrot & J. R. Wallis, "Computer experiments with fractional Brownian motion", *Water Resources Research*, Vol. 5, pp. 228-267, 1969.
 - [87] R. F. Voss, "Fractals in nature: From characterization to simulation", In *The science of fractal Images*, H-O. Peitgen and D. Saupe, Eds., New York: Springer-Verlag, 1988.
 - [88] T. Lundahl, W. J. Ohley, S. M. Kay & R. Siffert, "Fractional Brownian motion: A maximum likelihood estimator and its application to image texture", *IEEE Transaction on Medical Imaging*, Vol. 5, pp. 152-161, 1986.
 - [89] B. Equer, "Energie solaire photovoltaïque", Vol. 1: Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, Paris: Ellipses, 1993.
 - [90] Le Rayonnement
http://www.meteo.fr/temps/dontom/La_Reunion/atlas_clim/RAYONNEMENT.htm#carte%20rayon
 - [91] AAM. Sayigh, "Solar energy engineering", Chap. 4, New York: Academic Press, 1977.
 - [92] The Irradiation Data
<http://solar.anu.edu.au/Sun/Irrad/Irradiation.html>
 - [93] M. Kolhe, K. Agbossou, J. Hamelin, T. K. Bose, "Analytical model for predicting the performance of photovoltaic array coupled with a wind turbine in a stand-alone renewable energy system based on hydrogen", *Renewable Energy*, Vol. 28, pp. 727-742, 2003.
 - [94] A. Maafi, "Etude expérimentale du dimensionnement d'une centrale solaire à conversion photovoltaïque de petite puissance dans le cas d'une application à l'éclairage", *Projet de fin d'études d'Ingénieur d'état en Electronique*, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 1982.
 - [95] R. R. Sokal & P. H. A. Sneath, "Principles of numerical taxonomy", San Francisco: W. H. Freeman, 1963.
 - [96] I. C. Lerman, "Les bases de la classification automatique", Paris: Gauthier-Villars, 1970.
 - [97] M. R. Anderberg, "Cluster analysis for applications", New York: Academic Press, 1973.
 - [98] J. P. Benzécri, "Analyse des données", Paris: Masson, 1973.
 - [99] J. Hartigan, "Clustering algorithms", New York, NY, US: John Wiley and Sons, 1975.
 - [100] I. C. Lerman, "Classification et analyse ordinaire des données", Paris: Dunod, 1981.
 - [101] A. D. Gordon, "Classification", London: Chapman and Hall, 1981.

- [102] L. Lebart, "Quelques méthodes de classification"
Fichier PDF disponible à
http://www.unine.ch/statistics/postgrad/lebart/CPS_2005.5n.pdf.
- [103] E. Forgy, "Cluster analysis of multivariate data: Efficiency versus interpretability of classification", *Biometrics*, Vol. 21, pp. 768-780, 1965.
- [104] R. L. Thorndike, "Who belongs in the family" *Psychometrika*, Vol. 18, pp. 267-276. 1953.
- [105] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations", *Proceedings of the 5th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Vol. 1, pp. 281-297. 1967.
- [106] G. H. Ball and D. J. Hall, "A clustering technique for summarizing multivariate data", *Behavioral Science*, Vol. 12, pp. 153-155. 1967.
- [107] E. Diday, "Nouvelles méthodes et nouveaux concepts en classification automatique et reconnaissance des formes", Thèse de doctorat d'état, Université de Paris VI, 1972.
- [108] E. Diday, "La méthode des nuées dynamiques", *Revue de statistique appliquée*, Vol 19, pp. 19-34, 1971.
- [109] B. J. Brinkworth, "Autocorrelation and stochastic modelling of insolation sequences", *Solar Energy*, Vol. 19, pp. 343-347, 1977.
- [110] B. Bartoli, B. Coluzzi, V. Cuomo, M. Francesca and S. Serio, "Autocorrelation of daily global solar radiation", *Il Nuovo Cimento*, Vol. 4C, pp. 113-122, 1981.
- [111] S. Barbaro, G. Cannata, S. Coppolino, C. Leone and E. Sinagra, "Correlation between relative sunshine and state of the sky", *Solar Energy*, Vol. 26, pp. 537-550, 1981.
- [112] M. Bida, J. F. Kreider, "The suitability of the two and three state models for representing actual distributions in the prediction of stand-alone photovoltaic systems performance", *Proceedings of the A.S.E.S Annual Meeting*, Portland (OR), pp. 157-161, 1987.
- [113] M. Muselli, P. Poggi, G. Notton and A. Louche, "Classification of typical meteorological days from global irradiation records and comparison between two Mediterranean coastal sites in Corsica Island", *Energy Conversion and Management*, Vol. 41, pp. 1043-1063, 2000.
- [114] E. O. Lochard, "Simulation de données météorologiques solaires par génération de séquences de journées types", *Colloque Météorologie et Energies Renouvelables*, Valbonne, pp. 701-715, 1984.
- [115] M. Y. Bouroubi, "Modélisation de l'irradiation solaire à l'échelle journalière et horaire, pour l'Algérie", Thèse de Magister en Electronique, USTHB, Alger, Algérie, 1998.
- [116] S. Harrouni, S. Boubekur, G. I. Abib et A. Maafi, "Prédiction du type de temps des journées à l'aide des réseaux de neurones multicouches et de l'analyse fractale", *Forum International sur la Variabilité Climatique et la Prévision Saisonnière en Afrique du Nord et Méditerranée (PRESANOR-01)*, Alger (El-Aurassi), 14-18 Avril 2002.
- [117] S. Harrouni, et A. Maafi, "Classification des éclairissements solaires à l'aide de l'analyse fractale", *Revue Internationale des Energies Renouvelables (CDER)*, Vol. 5, pp. 107-

- 122, 2002.
- [118] A. Maafi & S. Harrouni “Preliminary results of fractal classification of daily solar irradiance”, *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 53-61, 2003.
 - [119] S. Harrouni A. Guessoum & A. Maafi, “Classification of daily solar irradiation by fractional analysis of 10-min-means of solar irradiance”, *Theoretical and applied climatology*, Vol. 80, pp. 27-36, 2005.
 - [120] S. Harrouni and A. Guessoum, “Fractal classification of solar Irradiances into typical days using a cumulative distribution function”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'03)*, Vigo (Spain), 9-11 April 2003.
 - [121] <http://www.nrel.gov/midc/>
 - [122] http://www.nrel.gov/midc/srrl_bsrn/pictures/bsrn.jpg
 - [123] http://www.nrel.gov/midc/nwtc_m2/pictures/m2tower.jpg
 - [124] <http://www.cpau.com/programs/pv-partners/pvdemo/pvebenspec.html>
 - [125] A. Reverchon et M. Ducamp, “Mathématiques sur micro ordinateur”, Paris: Eyrolles, 1986.
 - [126] S. A. Klein et W. A. Beckman, “Loss of load probabilities for stand alone photovoltaic systems”, *Solar energy*, Vol. 39, pp. 499-512, 1987.
 - [127] R. N. Chapman, “Development of sizing nomograms for stand alone photovoltaic / storage systems”, *Solar energy*, Vol. 43, pp. 71-76, 1989.
 - [128] M. Egido and E. Lorenzo “The sizing of stand alone PV-systems: a review and a proposed new method”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 26, pp. 51-69, 1992.
 - [129] A. Maafi et C. Delorme, “Modélisation à long terme et optimisation du stock d'énergie des installations solaires autonomes ”, *Journal de physique III France*, Vol. 6, PP. 511-527, 1996.
 - [130] A. Maafi, “Experimental evaluation of storage sizing method for autonomous PV systems”, *Proceedings of 14th European photovoltaic solar energy conference and exhibition*, Barcelona (Spain), Vol. 2, pp. 1517-1519, 30 June-4 July 1997.
 - [131] M. Benganem et A. Maafi, “performance model of photovoltaic systems”, *Proceedings of Bahrein*, Vol. 2, pp.191-195, 1998.
 - [132] M. Muselli, G. Notton, P. Poggi and A. Louche, “PV-hybrid power systems sizing incorporating battery storage: an analysis via simulation calculations”, *Renewable Energy*, Vol. 20, pp. 1-7, 2000.
 - [133] L. L. Mora, M. A. Egido and M. Sidrach de Cardona, “Utilization of simulated hourly global solar radiation series for sizing stand-alone photovoltaic power systems”, *Proceedings of 9th Photovoltaic Solar Energy Conference*, Freiburg (RFA), pp. 583-586, 1989.
 - [134] R. Ramakumar, I. Abouzahr and K. Ashenayi, “A knowledge-based approach to the design of integrated renewable energy systems”, *IEEE Transactions on Energy*

- Conversion*, Vol. 7, pp. 648-659, 1992.
- [135] G. Notton, M. Muselli, P. Poggi and A. Louche, "Autonomous photovoltaic systems: Influences of some parameters on the sizing: Simulation timestep, input and output power profile", *Renewable Energy*, Vol. 7, pp. 353-369, 1996.
- [136] J. Tovar, F. J. Olmo and L. Alados-Arboledas, "One-minute global irradiance probability density distributions conditioned to the optical air mass", *Solar Energy*, Vol. 62, pp. 387-393, 1998.
- [137] S. Harrouni et A. Maafi, "Etude du rendement du Silicium monocristallin en Milieu désertique", *Proceedings du XV Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, Besançon (France), 11-14 Septembre 2002.
- [138] S. Harrouni, A. Maafi et A. Guessoum, "Etude instantanée de la performance des systèmes PV: Application au système PV de Tahifet", *1^{er} Congrès International de la Mécanique*, Université de Constantine, 14-16 Décembre 2002.
- [139] S. Harrouni, T. Tafticht et A. Guessoum, "Analyse d'un système PV avec un générateur à base de cellules aux silicium mono-cristallin", *Congrès Canadien en Génie Electrique et Informatique de l'IEEE (CCECE 2003 - CCGEI 2003)*, Montréal (Canada), 4-7 mai 2003.
- [140] S. Harrouni and A. Guessoum, "Regulator role in the successful operating of a 720 Wp PV power system", *World Conference on Energy for Sustainable Development: Technology Advances & Environmental Issues*, Cairo (Egypt), 6-9 December, 2004.
- [141] Sonelgaz - ENEL - CREL:
 "Description et mode d'emploi de l'équipement photovoltaïque."
 "Normes pour l'installation du système d'enregistrement de données Grant".
 "Installation et fonctionnement du système d'acquisition « Grant »".
 Documentation technique interne.
- [142] <http://www.evcl.com/solar/components.html>
- [143] http://www.evcl.com/914/Pics/DCP_2592640.JPG
- [144] City of Palo Alto Utilities
 Photovoltaic Demo Projects Data Monitoring
 RFP #122619
 Document PDF.
- [145] G. Blaesser, "The activities of ESTI (European Solar Test Installation) in the fields of PV testing and monitoring", *Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources*, Trieste (Italy), 30 August-17 September 1993.
- [146] G. Blaesser, "PV system measurements and monitoring, The European experience", *Solar Energy materials and solar cells*, Vol. 47, pp. 167-176, 1997.
- [147] A. Maafi and A. Adane, "Analysis of the performances of the first-order two-state Markov model using solar radiation properties", *Renewable Energy*, Vol. 13, pp. 175-193, 1998.
- [148] G. E. P. Box, G. M. Jenkins and G. C. Reinsel, "Time series analysis: forecasting and

- control”, 3rd ed. San Francisco: Prentice-Hall, 1994.
- [149] G. Matheron, “Principles of geostatistics”, *Economic Geology*, Vol. 56, pp. 1246-1266, 1963.
 - [150] M. B. Priestley, “Spectral analysis and time series”, London: Academic Press, 1981.
 - [151] R. F. Voss, “Random fractals forgeries. In: Earnshaw, R. a. (Ed.), Fundamental algorithms for computer graphics, NATO Series”, Vol. F17, pp. 805-835, Berlin: Springer, 1985.
 - [152] A. Grossmann and J. Morlet, “Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape”, *SIAM journal on Mathematical Analysis*, Vol. 15, pp. 723-736, 1984.
 - [153] B. D. Malamud and D. I. Turcotte, “Self-affine time series: measures of weak and strong persistence”, *Journal of statistical planning and inference*, Vol. 80, pp. 173-196, 1999.
 - [154] H. E. Hurst, R.P. Black and Y. M. Simaika, “Long-term storage: An experimental study”, London: Constable, 1965.
 - [155] H. E. Hurst, “Long-term storage capacity of reservoirs”, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 116, pp. 770-808, 1951.
 - [156] I.M. De la Fuente, L. Martinez, J. M. Aguirregabiria & J. Veguillas, “R/S analysis in strange attractors”, *Fractals*, Vol. 6, pp. 95-100, 1998.
 - [157] C.-K. Peng, S. V. Buldyrev, S. Havlin, M. Simons, H. E. Stanley, and A. L. Goldberger, “Mosaic organization of DNA nucleotides”. *Physical Review E*, Vol. 49, pp. 1685–1689, 1994.
 - [158] <http://solardat.uoregon.edu/SolarData.html>
 - [159] <http://eos-webster.sr.unh.edu/data/SR.jsp>
 - [160] S. Harrouni, et A. Guessoum, “Etude de la persistance à long terme d'une variable climatique: le rayonnement solaire”, *Proceedings du 18^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, Gênes (Italie), Septembre 2005.