

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE

Thème

Dimensionnement d'une installation photovoltaïque
autonome par les algorithmes génétiques

Soutenu le :

Présenté par :		Membres de jury :	
ABED Mebarka		Président :	
BADJEDI Mebrouka		Dr S. BENTOUBA	Univ.d'ADRAR
Encadré par :		Examineur	
Dr S.MAKHLOUFI	Univ.d'ADRAR	Mr A. MOULAY ALI	Univ.d'ADRAR

Décembre 2013

Dédicace

J'ai dédié ce travail à

ma cher mère.

mon cher père (qui dieu avoir pitié de lui),

mes sœurs et mes frères,

à tout Personnes de ma famille,

à mes amie et mes collègues dans le travail,

Abed Mebarka

*J'ai dédié ce travail à
mon cher père (qui dieu avoir pitié de lui),
ma cher mère. mes sœurs et me frère,*

BADJEDI Mebrouka

Remerciements

Avons tout nos remerciement vont à ALLAH, le tout puissance de nous avoir donner la foi, la force et la capacité.

Nous remerciant notre encadreur **Dr .MAKHLOUFI Salim**, docteur à université d'Adrar qui nous avons aidé dans le choix de sujet, nous remerciant pour sa grande responsabilité et sa patience et si précieux conseils.

Mes vifs remerciements vont à **Dr S. BENTOUBA**, docteur à université d'Adrar, d'avoir accepté la présidence du jury

Nous remerciant aussi Monsieur **A. MOULAY ALI**, d'avoir répondu à notre invitation afin d'examiner ce travail.

Nous remercions tous les travailleurs de direction d'énergie solaire notamment son directeur **Pr. M .HAMOUDA**, qu'ils ont aidé pendant toute la durée de notre travail.

Dans notre travail nous avons présenté la production d'électricité à partir d'un système photovoltaïque totalement autonome avec un système de stockage à Adrar en utilisant les moyennes mensuelles de la température et de l'ensoleillement, présentes sur le site de la NASA.

L'objectif a été de diminuer le cout du système photovoltaïque grâce à un dimensionnement optimal, en prenant en compte son bon fonctionnement.

La méthode d'algorithme génétique nous a permis de dimensionner ce système pour déterminer les deux valeurs optimales (la puissance crête du panneau et la capacité de la batterie).

Dans ce travail nous avons appliqué cette méthode pour faire l'optimisation d'un système d'éclairage autonome sur le site d'Adrar.

On a utilisé aussi la méthode classique du mois le plus défavorable pour enfin faire une comparaison entre les deux méthodes.

Mots clés :

Photovoltaïque – modélisation – dimensionnement – méthode d'Algorithme génétique

Dédecace1	1
Dédecace2.....	2
Remerciements.....	3
Résumé.....	4
Sommaire.....	5
Liste des figures.....	8
Nomenclature.....	9
introduction générale.....	12
Chapitre1 : Étude et Présentation de système photovoltaïque	
1. Introduction.....	15
2. Histoire	16
3. Rayonnement solaire :.....	16
3.1 Spectre du rayonnement :.....	17
3.2 Composants du rayonnement :.....	17
A- Le rayonnement direct.....	17
B - Le rayonnement diffus.....	17
C -Le rayonnement réfléchi.....	18
D -Le rayonnement global :.....	18
4. Masse d'air	18
5. Photovoltaïque	19
5.1 Principe de fonctionnement des capteurs solaires	19
6. La photopile et la lumière.....	20
7. Les différents types des cellules photovoltaïques.....	21
8. Type de système photovoltaïque	23
a-Système photovoltaïque autonome.....	23
b-Système photovoltaïque hybride.....	23
c-Système photovoltaïque connecté au réseau.....	23
8.1 Définition d'une installation photovoltaïque autonome	23
8.2. Composants du système photovoltaïque autonome	24
8.2.1. Module photovoltaïque	24
8.2.2. Le panneau solaire.....	25
8.2.3. La Batterie solaire.....	26
8.2.4.. Régulateur	27
8.2.5. Onduleur	28
9. Avantages et inconvénients du système photovoltaïque	28
9.1. Avantages.....	28
9.2. Inconvénients.....	28
Conclusion	29
Chapitre 2: Modélisation et Dimensionnement d'un Système photovoltaïque	
1.Introduction.....	31
2. Modèles de coordonnées soleil	32
3. Grandeurs énergétiques du site.....	34
3.1. Coefficient de clarté.....	34

3.2. Fraction d'ensoleillement.....	34
4. calcul de l'éclairement solaire	35
4.1 Angle d'incidence du rayonnement direct avec la normal à un plan d'orientation et d'inclinaison données	35
4.2 Rayonnement solaire	35
a – Le rayonnement direct S^*	35
b – Le rayonnement diffus D^*	36
5. Energie reçue sur un plan incliné	36
5.1Modèle de Liu et Jordan	37
6. Modélisation de la cellule photovoltaïque	38
7. puissance maximale d'une cellule PV	40
8. Performance de la cellule.....	41
8.1. Courant de court-circuit (I_{cc})	41
8.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})	41
9. Influence des paramètres sur le modèle de la cellule	42
a- Influence de la résistance série R_s	42
b- Influence de la résistance shunt R_{sh}	43
10. Comportement d'un générateur photovoltaïque.....	43
10.1. Influence de la température et l'ensoleillement sur le rendement.....	43
10. 2. Influence de l'ensoleillement.....	44
10.3. Influence de la température.....	45
10.4. Influence de la température sur les courbes $I(V)$ et $P(V)$	45
11. Association des générateurs photovoltaïques.....	46
11.1 Association en parallèle.....	47
11.2 Association en série.....	48
11.3 Association mixte des Générateurs photovoltaïques.....	48
12. Modélisation de stockage	49
a)Modèle de la charge de la batterie	49
b) Modèle de la décharge de la batterie	50
c) Rendement de la Batterie	51
13. Modélisation du système de conversion	51
14. Dimensionnement d'un système pv autonome	53
14.1. Les besoins de l'application en énergie: (Etape 1).....	53
14.2. Energie solaire récupérable (Etape 2)	54
14.3. Calcul de la puissance crête du système (Etape 3).....	55
14.4. Le stockage (Etape4).....	55
14.4.1. Détermination de la capacité de l'accumulateur.....	56
Conclusion.....	57
Chapitre 3 : Présentation de méthode d'algorithme génétique	
1. Introduction.....	59
2. Les propriétés d'algorithme génétique.....	60
3. Mécanismes de base des algorithmes génétiques	60
4. Séquence /chromosome /individu (codage binaire)	60
5. codage	61

6. Fitness d'une séquence	61
7. Construction de la fitness.....	63
8. Organigramme d'un algorithme génétique	64
8.1 Principe de base d'un AG standard.....	64
8.2 Principaux paramètres.....	65
8.2.1 La taille de la population N, et la longueur du codage de chaque individu l	66
8.2.2 La probabilité de croisement p_c	66
8.2.3 La probabilité de mutation p_m	66
9. Les operateurs des algorithmes génétiques	66
9.1 Opérateur de Sélection.....	66
9.1.1. Les types de sélection	67
9.2 Opérateur de croisement	68
9.2.1 Les types de croisement binaire.....	68
9.3 L'opérateur de mutation.....	69
10. Un exemple simple.....	70
10.1 Tirage et évaluation de la population initiale.....	70
10.2 Sélection.....	71
10.3 Le croisement.....	71
10.4 La mutation.....	71
10.5 Retour à la phase d'évaluation.....	72
11. Le codage réel.....	73
11.1 Opérateur de croisement	73
11.2 Opérateur de mutation	75
12. Applications	75
13. Principaux avantages et désavantages des A.G.....	76
13.1 Désavantage.....	76
13.2 Avantage	76
Conclusion	77
Chapitre 4 : Dimensionnement d'un système d'éclairage par la méthode d'algorithme génétique	
1. Introduction.....	79
2. Données météorologiques utilisées.....	80
3. Description de la méthode utilisée.....	80
4. La température et l'ensoleillement synthétique du site d'Adrar.....	81
5. Angle d'inclinaison des panneaux solaires.....	83
6. L'optimisation du système photovoltaïque par la méthode d'algorithme génétique.....	85
6.1 Le prix du panneau et de la batterie.....	86
6.2 Calcul du cout du système autonomie à différent angles d'inclinaison.....	86
6.3 La discussion.....	87
6.4 La charge et décharge de La batterie	88
7. méthode du mois le plus défavorable.....	90
7.1 Puissance consommation.....	90
7.2 Irradiation d'un jour de mois de décembre en Adrar.....	90
7.3 La puissance crête.....	91
7.4 La capacité de la charge de la batterie C_{bat}	91
8. La comparaison entre les deux méthodes	92
Conclusion	93

Sommaire

Conclusion générale.....	95
Bibliographie	

Listes des figures

N° de figure	Nom de figure	Page
Figure (1-1)	spectre solaire hors atmosphère.	17
Figure (1-2)	Composantes du rayonnement solaire au sol	18
Figure (1-3)	Définition de la masse d'air	18
Figure (1-4)	Rayonnement solaire et son utilisation	19
Figure (1-5)	Schéma de principe de fonctionnement PV	20
Figure (1-6)	Réponse spectrale de photopiles	20
Figure (1-7)	La cellule en silicium monocristallin	21
Figure (1-8)	La cellule en Silicium polycristallin	22
Figure (1-9)	le Cellule photovoltaïque amorphe	23
Figure (1-10)	Composants du système photovoltaïque autonome	24
Figure (1-11)	Description d'un module photovoltaïque	24
Figure (1-12)	Panneau de solaire	25
Figure (1-13)	une batterie solaire AGM typique	26
Figure (2-1)	Repérage du soleil et notations utilisées.	33
Figure (2-2)	Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.	38
Figure (2-3)	Puissance maximale idéale et pratique	41
Figure (2-4)	Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant - tension	42
Figure (2-5)	Influence de R_s sur le modèle à une exponentielle	42
Figure (2-6)	Influence de R_{sh} sur le modèle à une exponentielle	43
Figure (2-7)	Courbes I(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^\circ\text{C}$	44
Figure (2-8)	Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^\circ\text{C}$	44
Figure (2-9)	Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$	46
Figure (2-10)	Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$	46
Figure (2-11)	Associations des cellules PV en parallèle	47
Figure (2-12)	Association des cellules en série	48
Figure (2-13)	Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique I(V)	49
Figure (2-14)	Rendement de l'onduleur	52
Figure (2-15)	Inclinaison et orientation d'un panneau solaire	54
Figure (3-1)	Schéma récapitulatif	64
Figure (3-2)	Organigramme d'un Algorithme génétique standard.	65
Figure (3-3)	le croisement en codage binaire.	68
Figure (3-4)	représentation schématique du croisement en 1 point.	69
Figure (3-5)	représentation schématique du croisement en 2 points.	69
Figure (3-6)	une mutation	70
Figure (3-7)	la roue de loterie biaisée : opération de sélection.	71
Figure (4-1)	L'application de (AG) dans notre travaille	81
Figure (4-2)	la température d'Adrar en une année.	82
Figure (4-3)	Ensoleillement sur un plan horizontal en Adrar.	82
Figure (4-4)	la puissance p_{\max} au plan horizontale.	82
Figure (4-5)	le développement de la charge de batterie en cas horizontale.	83
Figure (4-6)	Ensoleillement en Adrar sur un plan incliné ($=41^\circ$).	83
Figure (4-7)	La puissance \max ($=41^\circ$).	84
Figure (4-8)	la charge et la décharge de batterie ($=41^\circ$).	84
Figure (4-9)	Le système d'éclairage photovoltaïque de l'université d'Adrar	85
Figure (4-10)	Coût du système photovoltaïque autonome (€).	87

Listes des figures

Figure (4-11)	la charge et la décharge de la batterie.	88
Figure (4-12)	Coût de système photovoltaïque autonome.	89
Figure (4-13)	la charge et la décharge d'une batterie.	89

Nomenclatureur :

Ds : Diamètre de soleil

Dt :Diamètre de la terre

Lts :Distance moyenne soleil_ terre

 : latitude du lieu

 : angle horaire

 : déclinaison du soleil

K :Coefficient de clarté

G_h : L'énergie reçue sur une surface horizontale au sol

G_0 : L'énergie reçue sur une surface horizontale hors atmosphère.

S : est la durée effective du jour

d : le nombre de jour depuis le 21 Mars

„ : coefficient dépendant de la latitude

G^* : Le rayonnement global

S^* : rayonnement direct parallèle

D^* : un rayonnement diffus

S^* : L'énergie reçue par un plan

I^* : l'éclairement qui arrive au sol sous incidence normale

ρ : coefficient d'albédo

P :la puissance totale reçue par un plan d'inclinaison

G_h :est l'énergie reçue sur une surface horizontale

G_s : est l'énergie calculée sur un plan incliné

R : est le rapport entre les deux énergies

D : l'éclairement diffus moyen mensuel

R_b : le rapport entre les rayonnements directes incliné et horizontal. Il sera calculé pour chaque mois

S : est l'angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale

... : est l'albédo du sol

$\%_{\alpha S}$: est l'angle horaire

$\%_{\alpha S_1}$: est l'angle horaire du coucher du soleil par rapport à un plan horizontal

$\{$: la latitude du lieu (en degré)

u : la déclinaison du soleil

K_T : est l'indice de clarté moyen sur la journée ou le mois.

V : tension de sortie de la cellule

I : courant de sortie de la cellule

I_{ph} : courant photo-généré

I_0 : courant de saturation de la cellule

A : facteur d'identité

k : constante de Boltzmann ($13805 \cdot 10^{-23} \text{ Nm}/^\circ\text{K}$)

$I_{ph,ref}$: courant photo-généré conditions de référence

T : température de la cellule PV ($^\circ \text{K}$)

T_r : température de Référence ($^\circ \text{K}$)

q : charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$)

R_s : résistance série de la cellule PV ()

I_{cc} : courant de court-circuit

: ensoleillement (W/m^2)

: barrière de potentiel du silicium (1.10 eV)

I_{oref} : courant de saturation de la cellule PV aux conditions de référence

$P_{\text{max-idéale}}$ (W) : la puissance fournie par la cellule PV

V_{co} (V) : la tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV

I_{cc} (A) : l'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie

N_a : Le nombre de jours d'autonomie

V_b : La tension du système

DOD : Le profondeur de décharge

η_{bat} : Le rendement de la batterie

P_{fourni} : la puissance fournie par une batterie

P_{incid} : la puissance incident par une batterie

: Taux de charge

P_n : puissance nominale de l'onduleur

P_{Ch} : puissance à la sortie de l'onduleur

E_{prod} : Energie électrique produite (Wh)

N : Nombre d'heures d'exposition aux conditions STC (h)

P_c : La puissance crête (W)

E_{sol} : Energie solaire journalière par unité de surface (Wh/m²/j)

N_e : Nombre d'heures équivalentes (h/j)

Abréviations :

TSV: temps solaire varie (heures)

PV : photovoltaïque

AG : Algorithme Génétique.

Introduction générale

L'Algérie, riche par le pétrole et le gaz sources d'énergie considérables, et aussi un pays très ensoleillé, 3500 heures d'ensoleillement par an, encourage le développement des énergies renouvelables. En effet le 14 juillet 2011 a été inaugurée la première centrale électrique de type hybride, gaze et solaire, à Hassi R'mel avec une puissance de 150 MW, permettant d'économiser 7 millions de mètres cubes de gaz pour d'autres applications et de réduire la quantité des gaz brûlés soit environ 33000 tonnes de Co₂ émis par an. En Algérie, le potentiel d'énergie solaire est équivalent à huit fois les réserves de gaz [11].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans ce mémoire est l'énergie solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire photovoltaïque devient de plus en plus une solution qui promet de substituer les énergies fossiles; ceci grâce à ces avantages dont on peut citer l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout points du globe terrestre. C'est aussi une énergie fiable (aucune pièce mécanique en mouvement), modulable (taille adaptable des installations), et qui peut être produite au plus proche du lieu de consommation.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des microturbines. L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

L'objectif de ce travail est l'optimisation des dimensions d'un système PV autonome. Pour cela on va appliquer une méthode intelligente appelée *algorithme*

génétique pour trouver le coût minimal qui assure un bon fonctionnement de l'installation PV autonome.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter des généralités sur les systèmes photovoltaïques, les différents types des cellules photovoltaïques ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque type. Nous allons détailler aussi Les différents Type des Système photovoltaïque, ainsi que les Composants d'un système PV Autonome.

Dans le deuxième chapitre nous allons présenter la Modélisation de la cellule photovoltaïque, la Modélisation du stockage, la modélisation du système de conversion ainsi que le dimensionnement d'un système PV.

Dans le troisième chapitre nous allons donner une brève description des algorithmes génétiques. On définira les trois éléments qui sont la sélection, le croisement et la mutation qui représentent la base de cette méthode.

Dans le quatrième chapitre on va présenter une méthode de dimensionnement optimale, utilisant les *Algorithme génétique* (AG), d'un système d'éclairage solaire autonome sur la région d'ADRAR.

Chapitre I

Étude et Présentation de système photovoltaïque

1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque. On distingue deux types de mise en œuvre d'une installation photovoltaïque selon qu'elle fonctionne de manière non autonome qu'elle est raccordée à un réseau public de distribution d'électricité. Dans cette étude, nous allons nous intéresser aux installations isolées qui ne sont pas connectées au réseau, mais qui doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque seule n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments

- Un ou plusieurs modules PV.
- Le système de régulation.
- Une ou plusieurs batteries
- L'onduleur.

Dans ce chapitre nous étudions la conception d'un système photovoltaïque et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

2. Histoire :

Le principe de l'effet photoélectrique (transformation directe d'énergie portée par la lumière en électricité) a été appliqué dès 1839 par Antoine Becquerel et son fils Edmond Becquerel qui a noté qu'une chaîne d'éléments conducteurs d'électricité donnait naissance à un courant électrique spontané quand elle était éclairée. Plus tard, le sélénium puis le silicium (qui a finalement pour des raisons de coût supplanté le cadmium-tellure ou le cadmium-indium-sélénium également testés) se sont montrés aptes à la production des premières cellules photovoltaïques (posemètres pour la photographie dès 1914, puis 40 ans plus tard (en 1954) pour une production électrique). La recherche porte également aujourd'hui sur des polymères et matériaux organiques (éventuellement souples) susceptibles de remplacer le silicium [1].

3. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tout les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [2].

Sa lumière, à une vitesse de 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale dans l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5µm, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k [3].

- Diamètre de soleil :

$$D_s = 1.39 \cdot 10^9 \text{ m} \quad (1.1)$$

- Diamètre de la terre :

$$D_t = 1.27 \cdot 10^7 \text{ m} \quad (1.2)$$

- Distance moyenne soleil_ terre :

$$L_{ts} = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ m} \quad (1.3)$$

3.1 Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM_0 . Sa distribution en énergie est répartie en [3]:

Ultraviolet UV	$0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$	6.4%
Visible	$0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$	48.0%
Infrarouge IR	$0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$	45.6%

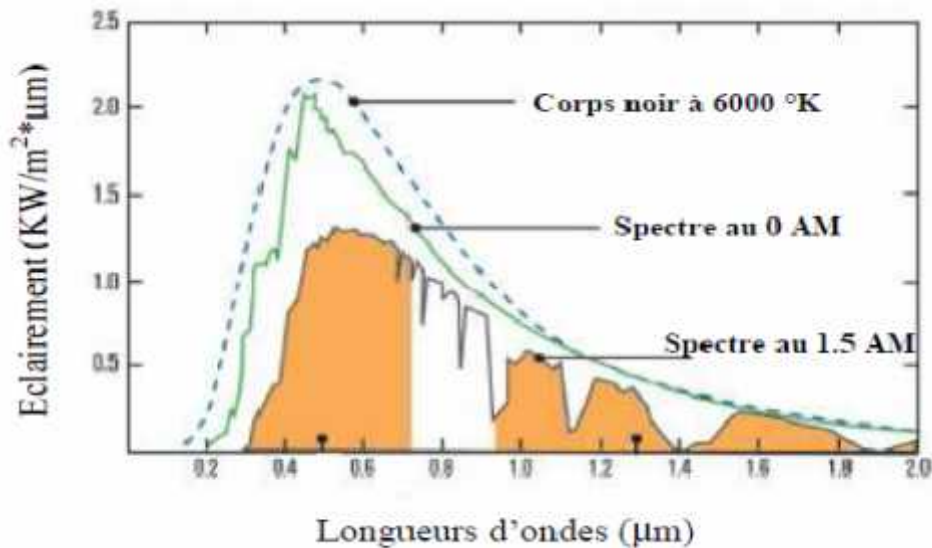


Figure (1-1) : spectre solaire hors atmosphère [3].

3.2 Composants du rayonnement :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes [4]:

A- Le rayonnement direct : est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peuvent être concentré par des miroirs [4].

B - Le rayonnement diffus : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle et une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions dans le ciel, ce sont à la fois les

molécules d'air, et les gouttelettes d'eau et les poussières qui produisent cet éclatement des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [4].

C -Le rayonnement réfléchi : est la partie réfléchi par le sol et dépend de l'environnement du site [4].

D -Le rayonnement global : est tout simplement la somme de ces diverses contributions comme le montre la figure (1-1) [4].

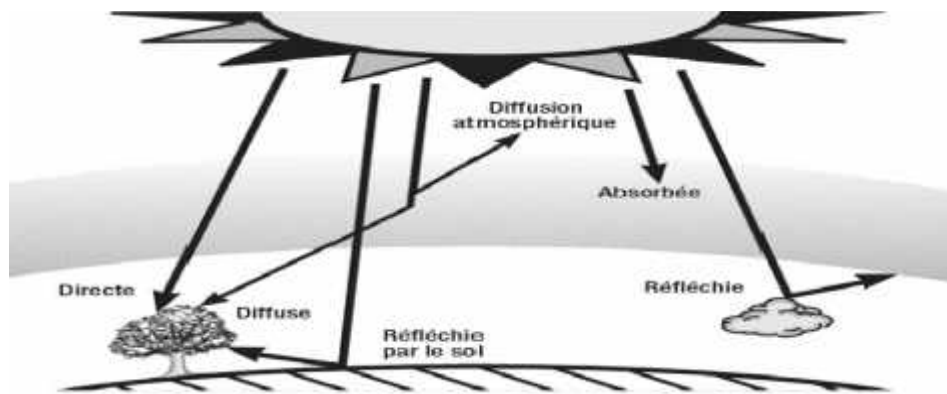


Figure (1-2): Composantes du rayonnement solaire au sol [4]

4. Masse d'air :

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir de transformations ; On appelle masse d'air le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu ; Cela dépend aussi de la hauteur angulaire du soleil [4].

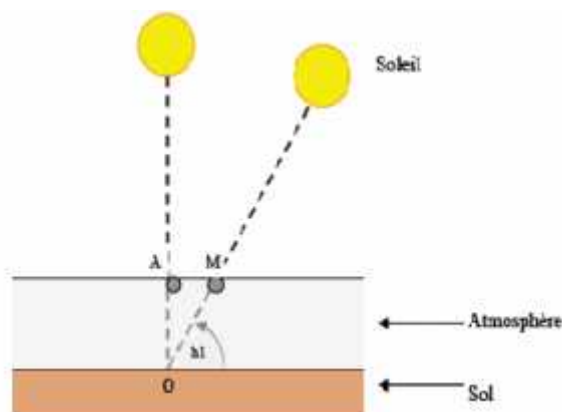


Figure (1-3) : Définition de la masse d'air [4].

A l'aide des points O, A et M et cet angle « h1 » sur la figure (1.3), on décrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère [4] :

$$OM = OA / \sin h1 \quad (1.4)$$

$OM/OA = 1/\sin h1$ est l'expression de la masse d'air [4].

5. Le photovoltaïque :

Le soleil est à l'origine de toutes les formes d'énergie présentes sur terre (à l'exception de l'énergie nucléaire). Le rayonnement solaire apporte à la terre de la Chaleur et de la lumière [5].

Cette énergie peut être captée de trois façons : en utilisant directement la chaleur (chauffage solaire direct, capteurs thermiques), en transformant la lumière en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en transformant la chaleur en électricité (Centrales électriques solaires) [5].

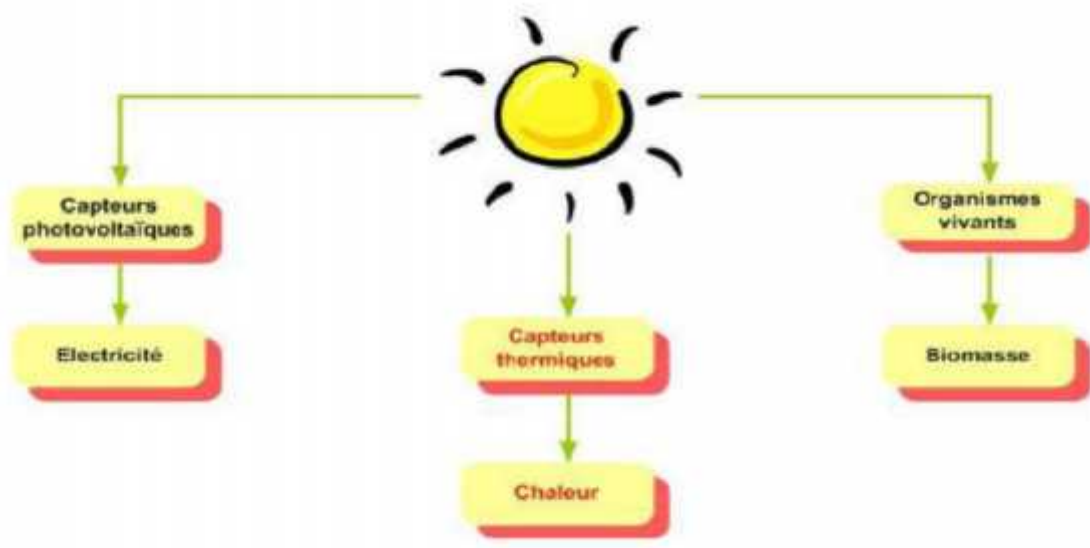


Figure (1-4): Rayonnement solaire et son utilisation [6]

5.1 Principe de fonctionnement des capteurs solaires :

Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique [7].

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque [7].

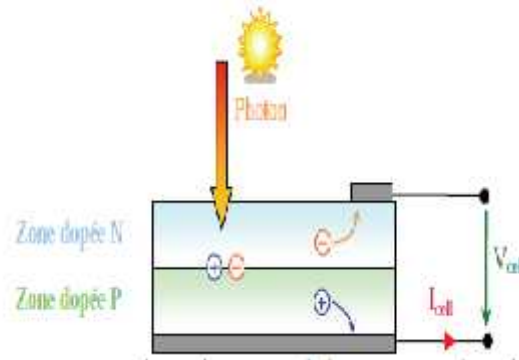


Figure (1-5): Schéma de principe de fonctionnement PV [7]

6. La photopile et la lumière :

Les photopiles se différencient par leur sensibilité spectrale, ou capacité à convertir certaines longueurs d'onde. Les photopiles au silicium amorphe ont une sensibilité spectrale très proche de celle de l'œil (figure 1-6). Ainsi, le silicium amorphe est particulièrement bien adapté en éclairage intérieur car les tubes néon et fluorescents ont un spectre d'émission qui est prévu pour l'œil humain [5].

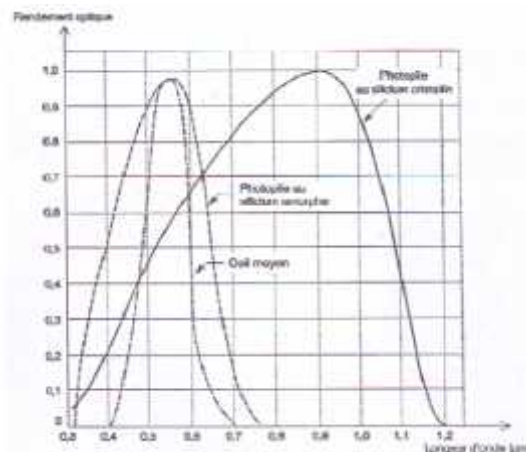


Figure (1-6) : Réponse spectrale de photopiles [5].

La photopile au silicium cristallin est destinée à un usage extérieur sous fort ensoleillement, à cause de sa sensibilité plus grande au proche infrarouge et de son médiocre comportement dans le bleu [5].

7. les différents types des cellules photovoltaïques

7.1 Silicium monocristallin

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.

Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie : 20 à 30 ans [8].

Avantage :

- bon rendement, de 12% à 18%
- bon ratio Wc/m^2 (environ 150 Wc/m^2) ce qui permet un gain de place si nécessaire
- nombre de fabricants élevé [8].

Inconvénients :

- coût élevé
- rendement faible sous un faible éclaircissement [8].



Figure (1-7): La cellule en silicium monocristallin [8].

7.2 Silicium polycristallin (multicristallin)

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux.

La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [8].

Avantage:

- cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module
- moins cher qu'une cellule monocristalline [8].

Inconvénient :

- moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15%
- ratio Wc/m² moins bon que pour le monocristallin (environ 100 Wc/m²)
- rendement faible sous un faible éclairement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans [8].



Figure (1-8): La cellule en Silicium polycristallin [8].

7.3 Silicium amorphe

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre.

La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

Avantage :

- fonctionne avec un éclairement faible ou diffus (même par temps couvert)
- un peu moins chère que les autres technologies
- intégration sur supports souples ou rigides [8].

Inconvénients :

- rendement faible en plein soleil, de 6% à 8%
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m^2 plus faible, environ $60 Wc/m^2$)
- performances qui diminuent avec le temps (environ 7%) [8].



Figure (1-9): le Cellule photovoltaïque amorphe [9].

8. Type de Système photovoltaïque :

a-Système photovoltaïque autonome

Système photovoltaïque non connecté à un réseau de distribution d'électricité.

b-Système photovoltaïque hybride

Système photovoltaïque comportant d'autres sources de production d'électricité, tel une éolienne ou un groupe électrogène au diesel.

c-Système photovoltaïque connecté au réseau

Le Système photovoltaïque peut être raccorde au réseau de distribution électrique. Ce raccordement ne peut se faire qu'après transformation, à l'aide d'un onduleur, du courant continu de tension variable fourni par les panneaux en courant alternatif adapte aux caractéristiques du réseau. Ce système est actuellement soutenu par les pouvoirs publics.

Les installations photovoltaïques raccordées au réseau et intégrées au bâti produisent de l'électricité sur le lieu de consommation [10].

8.1 Définition d'une installation photovoltaïque autonome :

Une installation photovoltaïque (PV) est dite autonome – ou isolée – quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système PV autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau. Il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation

de bornes téléphoniques le long de l'autoroute, etc. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques [11].

Le système autonome doit être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse [11].

Pendant cette période, il faudra plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été. Les batteries donnent une autonomie au système pour des applications nocturnes ou quand les panneaux ne fournissent pas assez de courant [11].

8.2 Composants d'un système PV Autonome :

Cette installation se compose de :

- un ou plusieurs modules photovoltaïques.
- un régulateur de charge .
- une ou plusieurs batteries .
- un onduleur.

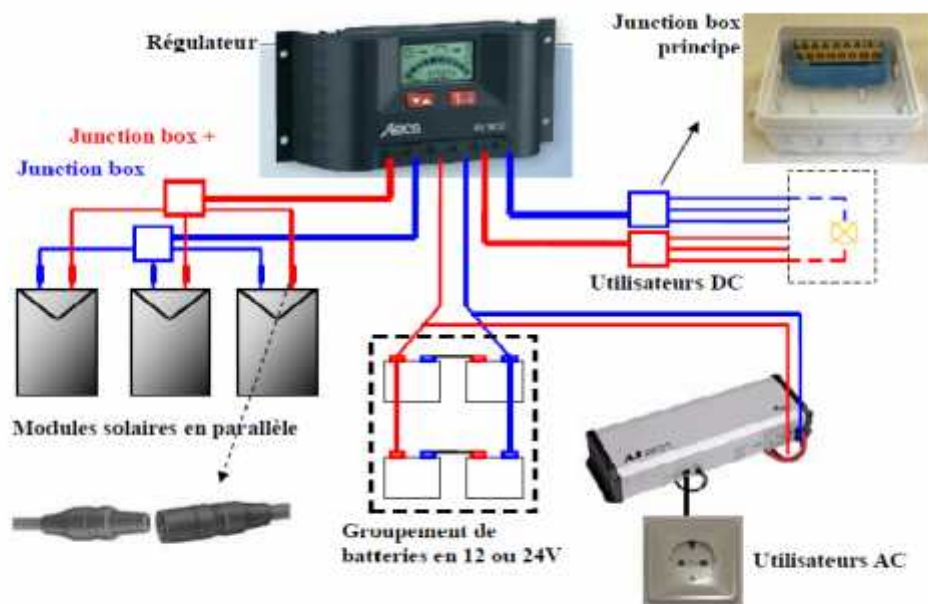


Figure (1-10): Composants du système photovoltaïque autonome [11].

8.2.1 Le module photovoltaïque :

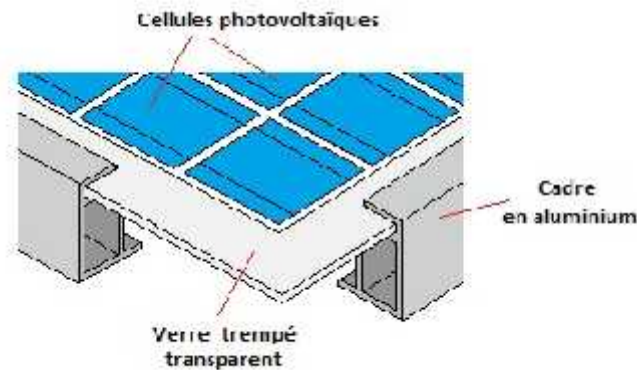


Figure (1-11): Description d'un module photovoltaïque [12].

Un module photovoltaïque (également appelé panneau solaire photovoltaïque) est un générateur électrique de courant continu. Autrement dit, c'est un appareil qui crée de l'électricité lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil [12].

Le module est composé d'un cadre rigide (le plus souvent en aluminium) permettant la fixation, et d'une vitre transparente en verre trempé sur le dessus. A l'intérieur se trouve un nombre variable de [cellules photovoltaïques](#) connectées électriquement. En réalité, ce sont elles qui génèrent l'électricité. On les regroupe à l'intérieur du module afin de cumuler leur puissance et de les rendre plus résistantes à l'environnement extérieur [12]. La taille du module varie en fonction du nombre de cellule qu'il contient [12].

8.2.2 Le panneau solaire :

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [2].



Figure (1-12) : Panneau de solaire [2]

La quantité d'électricité dans l'ensemble des composants des panneaux PV dépend :

- ✓ des besoins en électricité.
- ✓ la taille du panneau.
- ✓ L'ensoleillement du lieu d'utilisation.
- ✓ La saison d'utilisation.

La puissance délivrée par un panneau est importante dans les heures d'ensoleillement maximal, ce qui nécessite un élément de stockage [2].

8.2.3 La batterie solaire :

Une batterie solaire est un appareil destiné à stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Le courant qui y entre ou qui en sort est forcément continu (DC) et non alternatif (AC, comme dans le réseau électrique domestique). Les batteries sont indispensables dans les installations autonomes car les modules photovoltaïques ne fonctionnent que quand il y a de la lumière. Pour consommer de l'électricité le soir ou la nuit, il faut donc que les batteries en aient emmagasiné la journée [13].

Le terme exact, quand on parle de batterie, est "batterie d'accumulateurs". Elles sont en effet constituées de plusieurs éléments (les accumulateurs) ayant chacun une tension de 2V. Pour obtenir une tension supérieure, ces éléments sont assemblés en série. On peut trouver des batteries solaires de 2V, 6V, 12V (le plus courant), 24V ou même 48V [13].



Figure (1-13) : une batterie solaire AGM typique [13].

8.2.3.1 Les différents modèles de batterie solaire :

Les difficultés qu'il y a à stocker l'énergie ont amené les chercheurs et les industriels à développer de nouvelles technologies. Malgré ces recherches, la batterie parfaite n'existe toujours pas. Chacune des technologies citées plus haut comporte des avantages et des inconvénients. Selon la manière dont aura lieu son exploitation, certaines batteries seront plus adaptées que d'autres [14].

A. Batterie plomb-acide :

Facile à trouver, à entretenir et disposant d'un bon circuit de recyclage, la [batterie au plomb](#) domine le marché. Le plomb est toxique mais il est stocké de façon totalement étanche. C'est le meilleur rapport qualité/prix, aussi bien à court qu'à long terme. Ses seuls défauts sont le poids et le volume, mais dans la majorité des cas elle reste le meilleur choix [14].

B. Batterie NiCD (Nickel-Cadmium):

De moins en moins utilisée à cause de son prix et de la toxicité du cadmium, elle a été remplacée par les batteries NiMH. Elle souffre d'un effet mémoire, c'est-à-dire qu'il faut complètement la décharger avant de la recharger, car dans le cas contraire sa capacité diminue définitivement. Une réglementation Européenne, visant à interdire l'usage du cadmium par les particuliers, a été mise en place [14].

C. Batterie NiMH (Nickel-Métal-Hydrure) :

Ces batteries remplacent les NiCD car elles sont moins toxiques. Elles sont cependant assez chères et sont utilisées dans les installations haut de gamme. Leur [durée de vie](#) est beaucoup plus grande que celle des batteries au plomb (50% de plus) mais leur [capacité](#) est extrêmement faible (quelques Ah au maximum) et leur [autodécharge](#) est très forte. Leur

utilisation commerciale se fait davantage autour des batteries de téléphones et d'ordinateurs portables que dans des installations solaires [14].

D. Batterie Li-ion (Lithium-ion) :

Son énergie massique est très importante ce qui fait de la batterie Li-ion une des moins lourdes et des moins volumineuses. Son rendement est excellent et son autodécharge relativement faible. Le gaspillage est donc réduit. Un système de sécurité supplémentaire y est intégré car cette batterie présente des risques d'explosion lorsqu'elle est surchargée, trop déchargée ou court-circuitée... Sa durée de vie est d'environ 3 ans [14].

8.2.4 Les régulateurs :

Les régulateurs sont des dispositifs électroniques conçus pour contrôler la charge et la décharge de l'accumulateur (batterie). La fonction générales des régulateurs son :

- une fonction de régulation de charge de la batterie.
- une fonction de limitation de décharge de la batterie

La tache principale d'un régulateur est de protéger l'accumulateur contre la décharge profonde, la surcharge, le court circuit et les surtensions .d'autre part, protéger les autres composants du système. Les circuits d'un régulateur sont composés d'une partie de puissance, d'une de commande, de la signalisation et d'une partie de protection [15].

La partie de commande englobe des circuits intégrés, des résistances et des transistors. Cette partie sert pour la commande des interrupteurs électroniques reliant la batterie au panneau pour la phase de charge [15].

La partie de puissance est généralement composée par de transistors avec leurs radiateur de triacs, de relais et des diodes anti-retour pour contrôle la décharge de la batterie [15].

8.2.5 L'onduleur :

Transforme l'énergie disponible dans les batteries en énergie alternative 230V.

9. Avantages et inconvénients de système photovoltaïque :

9.1 Avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- D'abord, une haute fiabilité (elle ne comporte pas de pièces mobiles), qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au MégaWatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

Malgré tous ces avantages il y a aussi des inconvénients [16] .

9.2 Inconvénients

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.
- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru [16].

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système photovoltaïque comme la cellule, Le panneau solaire, la batterie, le régulateur, ainsi que les principes de fonctionnement de chaque élément, ce qui permet d'introduire a la modélisation et l'analyse de ce système, chose qu'on va présenter dans le chapitre II

Chapitre II

Modélisation et Dimensionnement d'un Système photovoltaïque

1. Introduction

Dans ce chapitre, on développe les différents modèles des éléments constituant un système photovoltaïque. Entre autre le modèle d'une cellule photovoltaïque, le modèle des batteries de stockage et le modèle du système de conversion. Puis le problème de dimensionnement du système qui revient à déterminer le nombre nécessaire de panneaux solaire constituant le champ photovoltaïque ainsi que la capacité de charge de la batterie pour obtenir un système PV assurant la couverture des besoins de la charge à tout instant, sera abordé. Ces deux éléments sont le plus importants en raison du coût élevé qu'ils totalisent.

2. Modèles de coordonnées soleil :

2.1 Angles solaires :

Les angles solaires nécessaires sont pour le calcul de rayonnement solaire sont :

- **la latitude** (ϕ) : est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré et le centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif [2].
- **la longitude** (λ) représente l'angle formé par le plan méridien du lieu considéré et le plan méridien origine. Ce dernier passe par l'Observatoire de Greenwich et a pour longitude 0° . Les longitudes situées à l'Est de ce méridien sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [2].
- **la déclinaison** (δ) est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Sa valeur varie entre $-23^\circ 7'$ (Au solstice d'hiver) et $+23^\circ 7'$ (au solstice d'été) et s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne. Cet angle varie très peu pendant une journée, ce qui permet d'approcher le mouvement quotidien du soleil par une rotation sur un cône d'axe l'équateur, de demi angle au sommet [2] :

$$\delta' = 90^\circ - \delta \quad (2-1)$$

L'angle δ est donc fonction du jour de l'année [17].

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{2\pi(284+n)}{365} \right] \quad (2-2)$$

Ou

n est le jour de l'année, par exemple pour le 1er janvier $n=1$.

- **Angle horaire :**

L'angle horaire est l'angle entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu [18] :

L'angle horaire est donné par [18] :

$$=15(TSV-12) \quad (\text{degrés}) \quad (2-3)$$

TSV: temps solaire varie (heures)

- **Azimet du soleil:**

L'azimet du soleil (a) est l'angle entre la projection du rayonnement solaire sur le plan horizontal et la direction sud [18].

$$\sin a = (\cos \delta \sin \varpi) / \cos h \tag{2-4}$$

(δ, ϖ) représentent les coordonnées équatoriales du soleil

a : varie entre -180° et $+180^\circ$

- **Hauteur du soleil:**

La hauteur du soleil (h) est l'angle de la direction du soleil au-dessus de l'horizon. Elle est donnée par la relation [18]:

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega \tag{2-5}$$

Avec:

ϕ : latitude du lieu

ω : angle horaire

δ : déclinaison du soleil

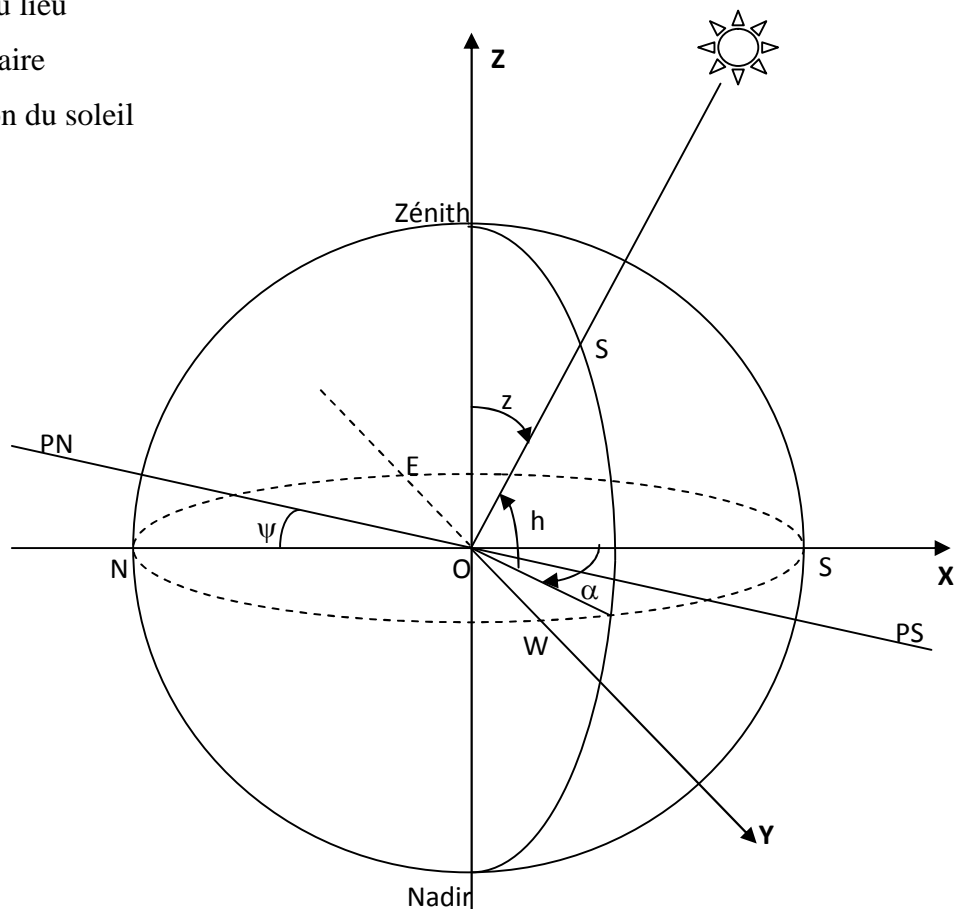


Figure (2-1): Repérage du soleil et notations utilisées [18].

3. Grandeurs énergétiques du site:

3.1 Coefficient de clarté

C'est le rapport du flux global au sol à celui du flux global hors atmosphère [18]

$$K = \frac{G_h}{G_0} \quad (2-6)$$

Il caractérise l'état de visibilité de l'atmosphère.

Avec:

G_h : L'énergie reçue sur une surface horizontale au sol

G_0 : L'énergie reçue sur une surface horizontale hors atmosphère.

3.2 Fraction d'ensoleillement

C'est le rapport de la durée effective d'ensoleillement et la durée théorique du jour. Elle exprime l'estimation du taux de non ensoleillement pour un site donné [18].

$$\delta \equiv \frac{s}{s_0} \quad (2-7)$$

Avec:

S : est la durée effective du jour

s_0 : est donné par la formule approchée suivante [18]:

$$s_0 = 12 + \theta \cdot \sin \frac{360 \cdot d}{365} \quad (\text{en heures}) \quad (2-8)$$

Avec:

d : le nombre de jour depuis le 21 Mars

θ : coefficient dépendant de la latitude.

4. calcul de l'éclairement solaire

4.1 Angle d'incidence du rayonnement direct avec la normal à un plan d'orientation et d'inclinaison données :

Soient θ l'angle d'incidence, β l'inclinaison de la surface sur l'horizontal et α l'azimut de la projection de la normale à la surface sur l'horizontal ; l'angle d'incidence θ est donné par [18] :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \alpha + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta + \cos \delta \sin \beta \sin \alpha \sin \omega \end{aligned} \quad (2-9)$$

4.2 Rayonnement solaire :

Le rayonnement global G^* est constitué d'un rayonnement direct parallèle S^* issu du soleil et d'un rayonnement diffus D^* provenant du ciel et des objets environnants. Il est mesuré par un pyranomètre [18].

$$G^* = S^* + D^* \quad (2-10)$$

a –Le rayonnement direct S^* :

Le rayonnement direct est l'éclairement énergétique reçu par une surface réceptrice normale aux rayons solaires. C'est le rayonnement provenant directement du disque solaire. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.

L'énergie S^* reçue par un plan s'écrit

$$S^* = I^* \cdot \cos h \quad (2-11)$$

I^* étant l'éclairement qui arrive au sol sous incidence normale, sa valeur est donnée ci-dessous.

$$I^*_{\text{moyen}} = 1230 \cdot \exp[-1/3,8 \sin(h+0,027925)] \quad \text{conditions normales}$$

$$I^*_{\text{max}} = 1210 \cdot \exp[-1/6 \sin(h+0,01743)] \quad \text{ciel pur}$$

$$I^*_{\text{min}} = 1260 \cdot \exp[-1/2,3 \sin(h+0,05236)] \quad \text{zone polluée}$$

I^* est exprimé en $W \cdot m^{-2}$ et h en radian.

b – Le rayonnement diffus D^* :

Soit une surface réceptrice située en P et oz l'axe vertical, on constate que le rayonnement diffus est constitué de deux parties :

- **une partie provenant du ciel** dont les rayons forment avec **OZ** un angle $\psi < \pi/2$ et dont la contribution à l'éclairement de la surface vaut :

$$E_1 = D_H^* (1 + \cos \gamma) / 2 \quad (2-12)$$

D_H^* étant l'énergie diffusée par le ciel et reçue par un plan horizontal ($\gamma = \pi/2$)

Pour des conditions de ciel moyennes, D_H^* est donnée par l'expression empirique suivante donnée par [18]:

$$D_H^* = 125(\sin h)^{0.4} \quad (2-13)$$

Avec D_H^* en $W.m^{-2}$ et h en degré.

On multiplie D_H^* par 4/3 par ciel pollué et par 3/4 par ciel très pur.

- **une partie provenant du sol** dont les rayons forment avec **OZ** un angle $\psi > \pi/2$, dont la valeur dépend de l'angle γ et de la luminosité du sol, donc proportionnelle à l'éclairement G_H^* de celui-ci ($G_H^* = S_H^* + D_H^*$). On peut donc écrire :

$$E_2 = \rho \cdot G_H^* \cdot (1 - \cos \gamma) / 2 \quad (2-14)$$

ρ : coefficient d'albédo.

La valeur totale du rayonnement diffus reçu par un plan d'inclinaison γ s'écrit :

$$D^* = D_H^* (1 + \cos^*) / 2 + \rho \cdot G_H^* (1 - \cos \gamma) / 2 \quad (2-15)$$

Finalement la puissance totale reçue par un plan d'inclinaison γ s'écrit :

$$P = I^* \cdot \cos \theta + D_H^* (1 + \cos \gamma) / 2 + \rho \cdot G_H^* (1 - \cos \gamma) / 2 \quad (2-16)$$

5. Energie reçue sur un plan incliné :

Le modèle de Liu et Jordan est le plus connu, le plus utilisé et sans doute le plus simple. Il est aussi appelé modèle isotropique puisqu'il se base sur l'hypothèse de la répartition isotropique du flux solaire diffus provenant du ciel constant en tout point [18].

5.1 Modèle de Liu et Jordan :

L'énergie recueillie sur une surface inclinée est donnée en fonction de celle reçue sur une surface horizontale par l'expression [18]:

$$G_{\beta} \equiv R \cdot G_h \quad (2-17)$$

Où:

G_h : est l'énergie reçue sur une surface horizontale

G_s : est l'énergie calculée sur un plan incliné

R : est le rapport entre les deux énergies

La constante R peut être calculée pour différents pas. Elle est donnée par la relation suivante:

$$R = \left(1 - \frac{D}{G_h}\right) R_b + \left(\frac{D}{G_h}\right) \left(\frac{1 + \cos S}{2}\right) + \dots \left(\frac{1 - \cos S}{2}\right) \quad (2-18)$$

Où:

D : l'éclairement diffus moyen mensuel

R_b : le rapport entre les rayonnement directes incliné et horizontal. Il sera calculé pour chaque mois.

S : est l'angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale.

... : est l'albédo du sol.

Pour une surface orientée vers le sud, R_b se calcule par l'expression:

$$R_b = \frac{\cos(\{\ - S) \cos(u) \sin(\%_0s_1) + (f / 180)\%_0s_1 \cdot \sin(\{\ - S) \sin(u)}{\cos(\{\) \cos(u) \sin(\%_0s) + (f / 180)\%_0s \cdot \sin(\{\) \sin(u)} \quad (2-19)$$

Avec:

$$\%_0s = \ar \cos(-tg(\{\) \cdot tg(u)) \quad (2-20)$$

$$\%_0s_1 = \min[\%_0, \ar \cos(-tg(\{\ - S) \cdot tg(u))] \quad (2-21)$$

Où:

$\%_0s$: est l'angle horaire

$\%_0s_1$: est l'angle horaire du coucher du soleil par rapport à un plan horizontal

$\{\$: la latitude du lieu (en degré)

u : la déclinaison du soleil

Connaissant l'éclairement global sur une surface horizontale, on peut calculer l'éclairement diffus en utilisant l'expression suivante [18]:

$$\frac{D}{G_h} = 0.775 + 0.347(\%_0s - \frac{f}{2}) - 0.505 + 0.261(\%_0s - \frac{f}{2}) - \cos[2(K_T - 0.9))] \quad (2-22)$$

Où:

K_T :est l'indice de clarté moyen sur la journée ou le mois.

6. Modélisation de la cellule photovoltaïque

La caractéristique I-V d'une cellule PV élémentaire est modélisée par le circuit équivalent bien connu de la figure (2-2). Ce circuit introduit une source de courant et une diode en parallèle, ainsi que des résistances série R_s et parallèle (shunt) R_{sh} pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule [16].

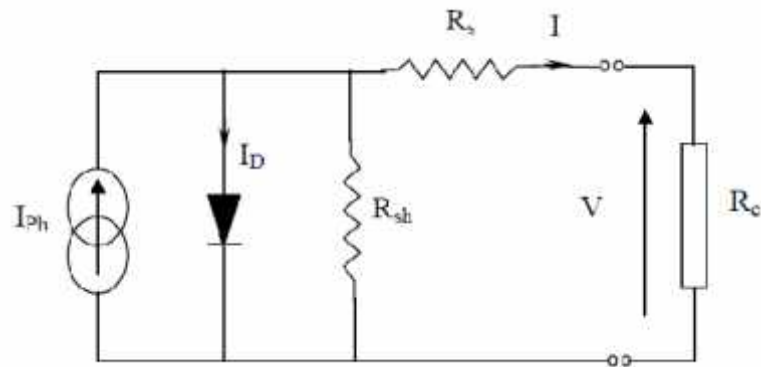


Figure (2-2) : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [16].

La résistance série est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière. La résistance parallèle est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule. Ce circuit peut être utilisé aussi bien pour une cellule élémentaire, que pour un module ou un panneau constitué de plusieurs modules.

L'équation reliant le courant délivré par une cellule PV et la tension à ses bornes est donnée par [16]:

$$I_{ph} = I_{R_{sh}} + I + I_D \quad (2-23)$$

Le courant qui traverse la résistance shunt est donnée par :

$$I_{R_{sh}} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-24)$$

Le courant de jonction est donné par:

$$I_D = I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right\} - 1 \right] \quad (2-25)$$

En remplaçant les expressions de I_D et $I_{R_{sh}}$ on obtient:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right\} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2-26)$$

Si on suppose que la résistance R_{sh} est très grande (cas de silicium monocristallin) L'expression de I devient [16] :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left\{ \frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right\} - 1 \right] \quad (2-27)$$

$$V = \frac{AKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} \right) - IR_s \quad (2-28)$$

Où :

$$I_{ph} = I_{ph,ref} \frac{\lambda}{\lambda_{ref}} \quad (2-29)$$

$$I_0 = I_{0ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{qE}{AK} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2-30)$$

Où :

V : tension de sortie de la cellule,

I : courant de sortie de la cellule,

I_{ph} : courant photo-généré,

I_0 : courant de saturation de la cellule,

A : facteur d'identité,

k : constante de Boltzmann ($13805 \cdot 10^{-23}$ Nm/°K),

$I_{ph,ref}$: courant photo-généré conditions de référence,

T : température de la cellule PV (° K),

T_r : température de Référence (° K),

q : charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C),

R_s : résistance série de la cellule PV (),

I_{cc} : courant de court-circuit,

: ensoleillement (W/m^2),

: barrière de potentiel du silicium (1.10 eV),

I_{0ref} : courant de saturation de la cellule PV aux conditions de référence,

7. puissance maximale d'une cellule PV :

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $P_{\text{max.idéale}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} [19]:

$$P_{\text{max.idéale}} = V_{\text{co}} \cdot I_{\text{cc}} \quad (2-31)$$

$P_{\text{max.idéale}}$ (W) : la puissance fournie par la cellule PV.

V_{co} (V) : la tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : l'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV "arrondie" (figure 2-3) et la tension au point de puissance maximale V_{pMax} est inférieur à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_{pMax} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc} . L'expression de la puissance en ce point est donnée par [19]:

$$P_{\text{max}} = V_{\text{pMax}} * I_{\text{pMax}} \quad (2.32)$$

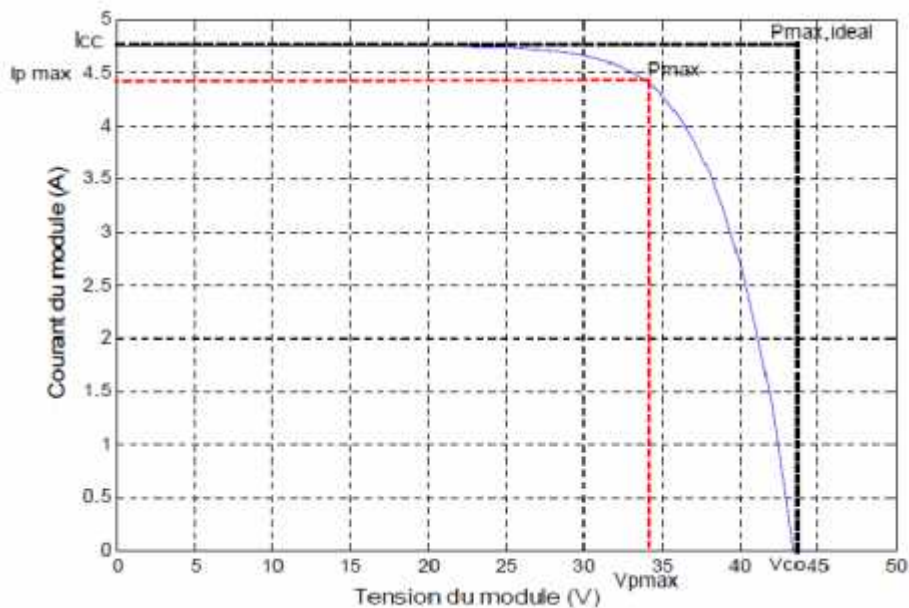


Figure (2-3): Puissance maximale idéale et pratique [19].

8. Performance de la cellule :

8.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (2-26), on obtient [20]:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} \cdot R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} \cdot R_{ser})}{R_{shu}} \quad (2-33)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} \cdot R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors [20]:

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad (2-34)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$ [20])

8.2 Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque) [20].

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{eV_{PV}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{PV}}{R_{shu}} \quad (2-35)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à [20]:

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (2-36)$$

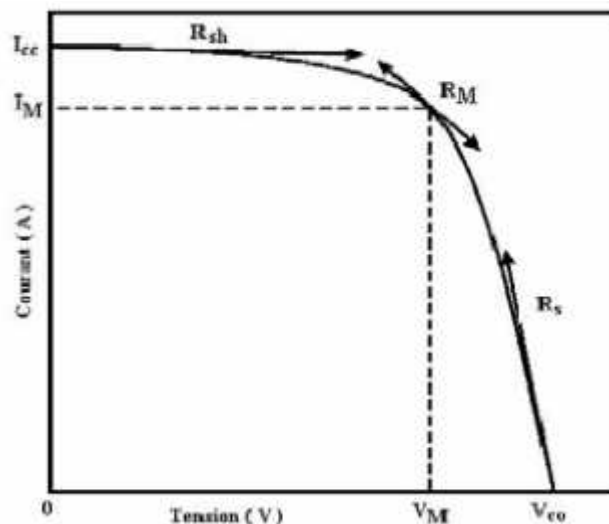


Figure (2-4): Points et valeurs remarquables de la caractéristique courant - tension [21].

9. Influence des paramètres sur le modèle de la cellule

a- Influence de la résistance série R_s :

La résistance série R_s influe légèrement sur la tension en circuit ouvert V_{co} qui diminue à partir d'une certaine valeur de R_s [21].

$$V = \frac{nkT}{q} \log \left\{ 1 + \frac{I_{ph} - I}{I_0} \right\} - R_s \cdot I \quad (2-37)$$

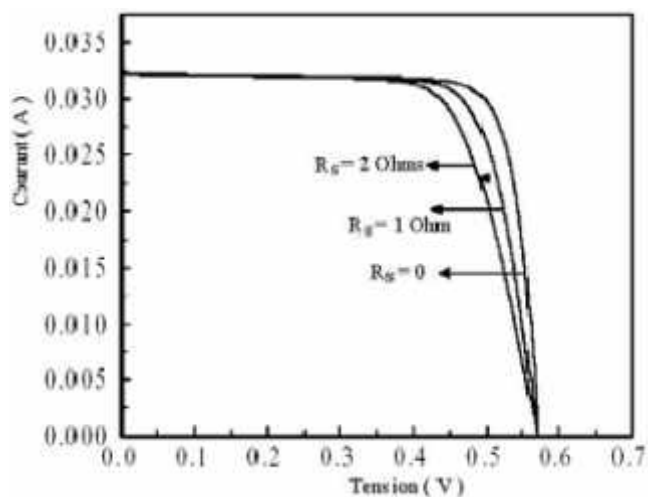


Figure (2-5) : Influence de R_s sur le modèle à une exponentielle [21].

b- Influence de la résistance shunt R_{sh} :

L'existence de fissures et de défauts de structure complexe devient le siège de phénomène physique assimilable à une résistance shunt, qui apparaît en parallèle sur le schéma électrique [21].

Cette résistance shunt est liée directement aux processus de fabrication, et son influence ne se fait sentir que pour de très faibles valeurs. La figure (2-6) montre que cette influence se traduit par une soustraction du photo-courant. Outre le courant direct de diode, un courant supplémentaire de fuite donné par [21] :

$$I^* = \frac{V^*}{R_{sh}} \quad (2-38)$$

En effet,

$$I = I_{ph} - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V+R_s I)}{nkT} \right] - 1 \right\} \quad (2-39)$$

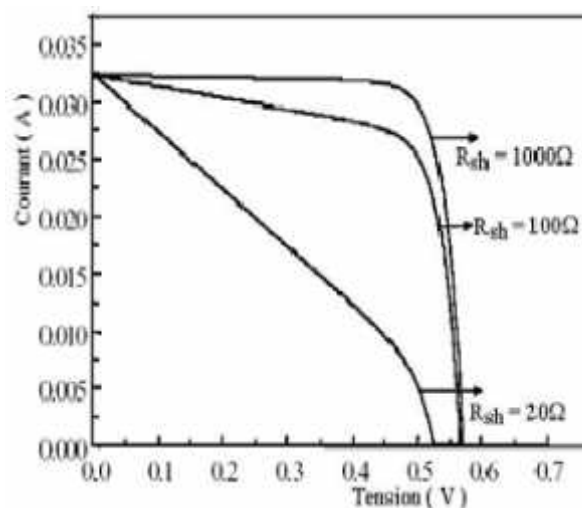


Figure (2-6) : Influence de R_{sh} sur le modèle à une exponentielle [21].

10. Comportement d'un générateur photovoltaïque

De par sa constitution, un générateur PV aura un comportement plus ou moins optimisé et pourra ainsi produire plus ou moins de puissance [19].

10.1 Influence de la température et l'enseillement sur le rendement

On peut remarquer que la caractéristique $I(V)$ d'un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'insolation et de la température [19].

10.2. Influence de l'enseillement

Une baisse de l'enseillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire ICCM proportionnelle à la variation de l'enseillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension v_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures [19].

Les graphes suivants représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ respectivement d'un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}C$) et un enseillement variable.

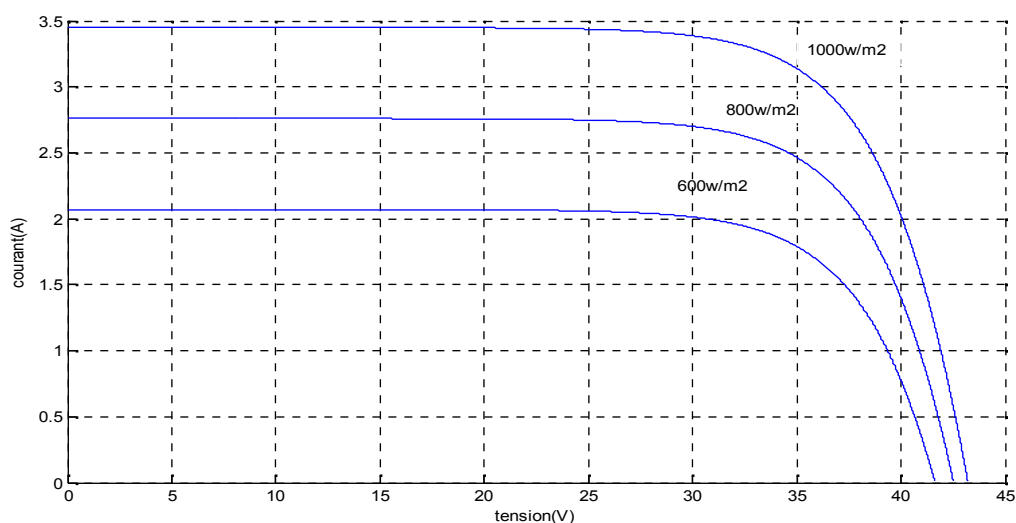


Figure (2-7) : Courbes $I(V)$ d'un panneau à divers enseillements à $T=25^{\circ}C$.

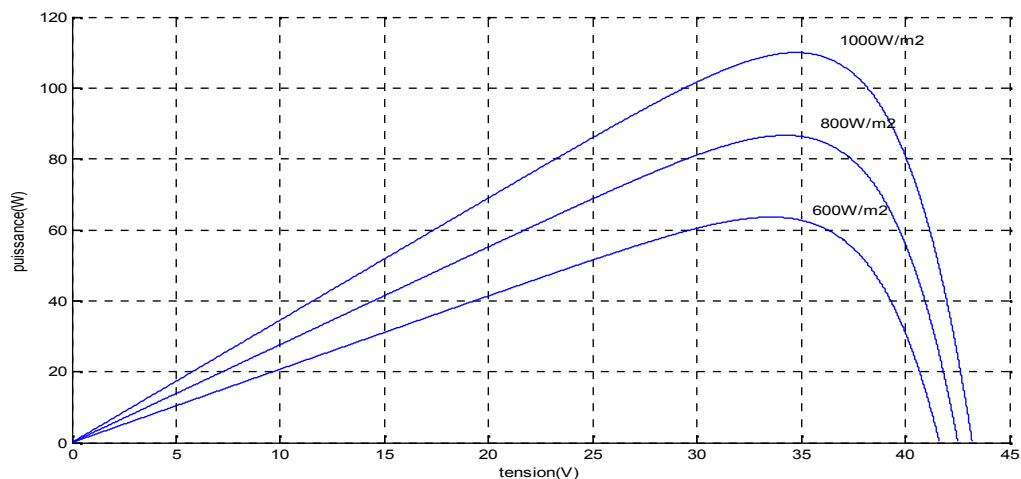


Figure (2-8) : Courbes P(V) d'un panneau à divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$.

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairage.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension [19].

10.3 Influence de la température

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV. Si on considère le réchauffement d'un module PV de 25°C à 50°C et si l'on considère en première approximation que la température face arrière de chaque cellule est proche de la température de la jonction PN, alors on peut considérer l'influence de la température. On s'aperçoit que la tension de circuit ouvert décroît en fonction d'une augmentation de la température. Par conséquent, on perd de la puissance disponible aux bornes du module PV [19].

10.4 Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

La figure (2-9) présente des courbes I(V) et P(V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante [19].

Nous remarquons que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C [19].

Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 100 W/m², la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique).

Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin [19].

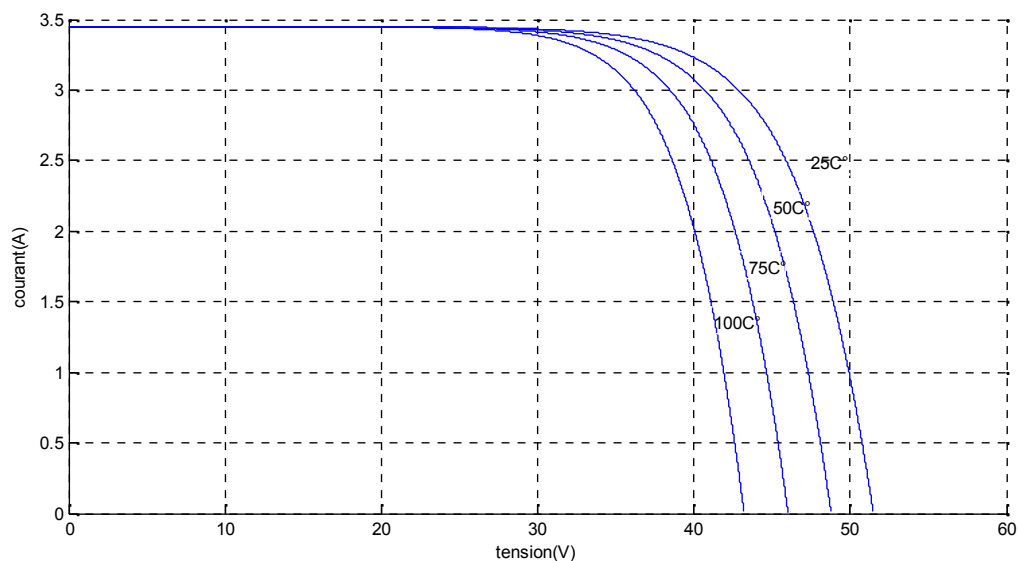


Figure (2-9) : Courbes I(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

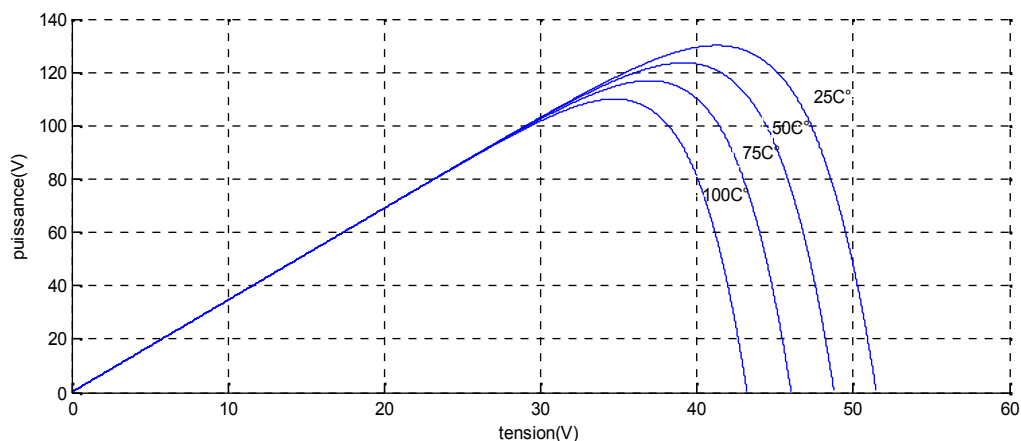


Figure (2-10): Courbes P(V) d'un générateur PV pour différentes températures à $G=1000\text{W/m}^2$.

11. Association des générateurs photovoltaïques

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible .il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et de rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. Les puissances des modules disponibles sur le marché s'échelonnent entre quelque watt crête et quelque dizaines de watt crête, 1 m² de cellule produit environ 100W, En fait l'association de cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant. en série : leurs tensions s'ajoutent, En parallèle : leurs courants s'ajoutent [22].

11.1 Association en parallèle

Dans le cas d'une association en parallèle, les cellules délivrent la même tension mais elles peuvent fonctionner avec des courants différents. Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la Moins performante .dans ce cas il est préférable

d'ajouter une diode anti retour, mais cette solution occasionne une chute de tension additionnel [22].

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = U_n \quad (2-40)$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (2-41)$$

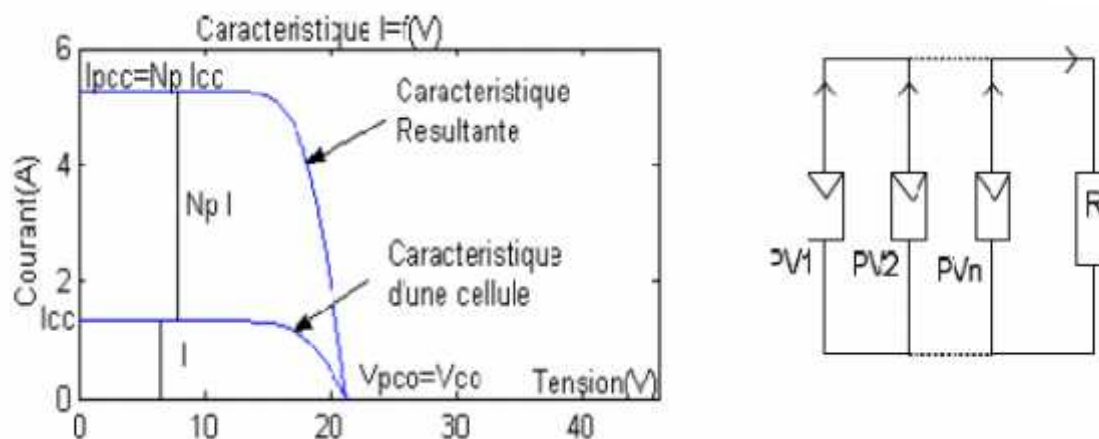


Figure (2-11) : Associations des cellules PV en parallèle [22].

11.2 Association en série

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V [22].

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n \quad (2-42)$$

$$I = I_1 = I_2 = I_n \quad (2-43)$$

Dans ce cas, le courant qui traverse les cellules est le même mais les cellules peuvent fonctionner à des tensions différentes. Si une cellule est occultée (si elle ne reçoit plus qu'une faible partie de l'énergie solaire reçue par les cellules voisines), elle ne peut délivrer qu'un courant limité. Elle fonctionne donc en inverse (comme un récepteur soumis à une tension inverse de celle produite En direct) par rapport aux autres cellules du module qui elles,

délivrent un courant supérieur à ce courant limité. En fonctionnant ainsi, un échauffement de la cellule apparaît et peut provoquer le claquage de la cellule [22].

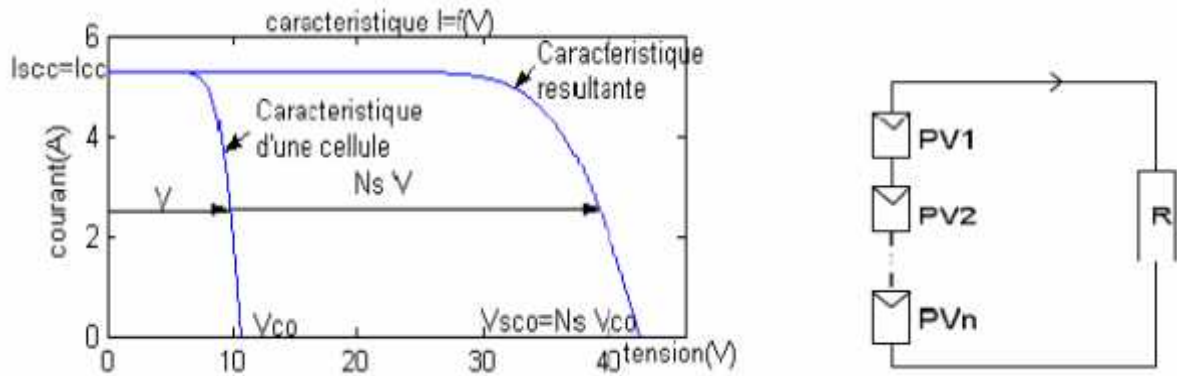


Figure (2-12) : Association des cellules en série [22].

11.3 Association mixte des Générateurs photovoltaïques

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïques on est obligé à grouper les cellules photovoltaïques en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent.

L'équation relative à un groupement mixte formé par la mise en série N_s cellules et N_p parallèle est la suivante [22] :

$$I = N_p I_{ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(N_s V + \frac{N_s}{N_p} I R_s \right)}{N_s n K T} \right) - 1 \right] - \frac{\left(N_s V + \frac{N_s}{N_p} I R_s \right)}{\frac{N_s}{N_p} R_{sh}} \quad (2-44)$$

La courbe de puissance d'un groupement série parallèle est analogue à celle d'un générateur photovoltaïque élémentaire tous les paramètres de celle-ci sont appliqués pour un générateur mixte, mais certaines conditions doivent être respectées [22].

S'assurer que les cellules connectées en série ont le même courant de court-circuit.

Il faut connecter en parallèle que des cellules ayant la même tension de circuit ouvert V_{co} [22].

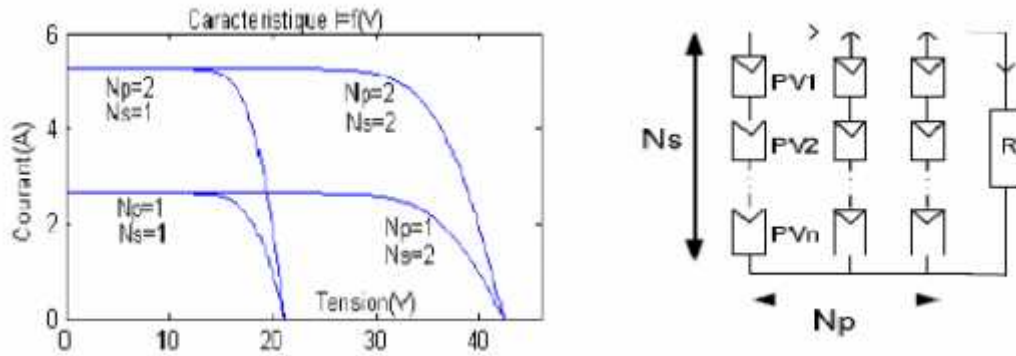


Figure (2-13) : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique I(V) [22].

12. Modélisation de stockage :

Vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent, une représentation très empirique du comportement de la batterie peut être établie. Le système de stockage utilisé dans une installation photovoltaïque est une batterie d'accumulateur au plomb. Jusqu'à maintenant, il existe plusieurs modèles de la charge de batterie ont été proposés [23] .

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle qui permet de calculer la capacité de stockage en fonction de la puissance produite par le générateur photovoltaïque et la charge demandée [23].

a) Modèle de la charge de la batterie :

Quand la puissance de générateur PV est plus grande que la charge, les batteries sont à l'état de charge, la capacité des batteries au temps t peut être décrite par [23] :

$$C_{\text{Bat}}(t) = C_{\text{Bat}}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_{\text{pv}}(t) - P_{\text{L}}(t)/\eta_{\text{inv}}) \cdot \eta_{\text{Bat}} \quad (2-45)$$

$C_{\text{Bat}}(t)$ et $C_{\text{Bat}}(t-1)$ sont les quantités de la charge et la décharge des batteries au temps (t) et $(t-1)$ respectivement, σ est le taux horaire de la charge spontanée, P_{pv} est la puissance du générateur PV, P_{L} est la charge demandée au temps t , η_{ond} et η_{Bat} sont le rendement de l'onduleur et de la batterie successivement.

Pendant la charge de la batterie, le rendement est 0.65–0.85 selon le chargeant courant), par contre pendant le processus de décharge, le rendement de batterie a été mis égal à 1 [23].

b) Modèle de la décharge de la batterie :

Quand la demande de charge est plus grande que la puissance produite, la capacité des batteries au temps t peut être exprimée comme suite [23]:

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_L(t)/\eta_{inv} - P_{pv}(t)) \quad (2-46)$$

A tout moment, la quantité de charge des batteries est sujette aux contraintes suivantes [23]:

$$C_{Bat\ min} \leq C_{Bat}(t) \leq C_{Bat\ max} \quad (2-47)$$

Ici, la capacité de la batterie maximale prend la valeur de la capacité nominale de la batterie ($C_{Bat\ max} = C_{Bat\ min}$), et la capacité minimum est déterminée par le profondeur de la charge (DOD) [23] :

$$C_{Bat\ min} = DOD \cdot C_{Bat.N} \quad (2-48)$$

La valeur maximale de l'état de charge (SOC) est égale à 1, et le minimum est déterminé par le maximum de profondeur de décharge $SOC_{min} = 1 - DOD$,

Selon les caractéristiques des fabricants, la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum si DOD prend les valeurs de 30-50% [23].

La capacité de stockage est une fonction de la charge demandée et de son autonomie.

Elle peut être estimée par la relation suivante [2]:

$$C_{Bat} = \frac{E_L \cdot N_a}{\eta_{Bat} \cdot F_{déch} \cdot DOD} [Wh] \quad (2-49)$$

$$C_{Bat}[Ah] = \frac{C_{Bat}}{V_b} [Wh] \quad (2-50)$$

C_{Bat} : La capacité de stockage de la batterie.

N_a : Le nombre de jours d'autonomie.

V_b : La tension du système.

DOD : Le profondeur de décharge.

c) Rendement de la Batterie :

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{incid}} \quad (2-51)$$

En pratique, le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité de l'ordre de 100A/h. donc la puissance fournie par une batterie peut s'écrire comme suit [2]:

$$P_{fourni} = \eta_{bat} \cdot P_{incid} \quad (2-52)$$

P_{incid} : puissance du générateur

13. Modélisation du système de conversion :

L'onduleur est un dispositif de conversion, il est important de connaître la relation liant la puissance à l'onduleur à celle entrante [2].

Cette caractéristique est représentée par la fonction [2]:

$$\eta_o = f(P_{ch}) \quad (2-53)$$

Ou encore

$$\eta_o = f(\text{taux de charge}) \quad (2-54)$$

La charge étant alimentée en courant alternatif, un onduleur est donc présent entre le bus continu et la charge. Il existe diverses équations pour définir le rendement d'un onduleur en fonction de la puissance délivrée [2].

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, d'une énergie de type continu provenant soit du système de stockage, soit directement de champ PV. De tels dispositifs devraient délivrer une tension alternative à fréquence déterminée c'est-à-dire le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible [2].

Ces onduleurs sont largement utilisés, mais les appareils existant ont l'inconvénient majeur de présenter des pertes, à vide ou à faible charge, très élevées, leur rendement n'est donc acceptable qu'à pleine charge [2].

L'onduleur monophasé est caractérisé par son rendement en fonction de la puissance fournie à l'utilisation. Le modèle de rendement se traduit par la relation empirique suivante [2]:

$$\eta_{\text{ond}} = a \cdot (1 - \exp(b \cdot \tau)) \quad (2-55)$$

Où :

a et b sont des constantes (a = 0,9559 ; b = -609164)

τ : Taux de charge, donnée par :

$$\tau = \frac{P_{\text{ch}}}{P_n} \quad (2-56)$$

P_n : puissance nominale de l'onduleur.

P_{Ch} : puissance à la sortie de l'onduleur.

La variation du rendement de l'onduleur en fonction de taux de charge est représentée sur la figure suivante [2]:

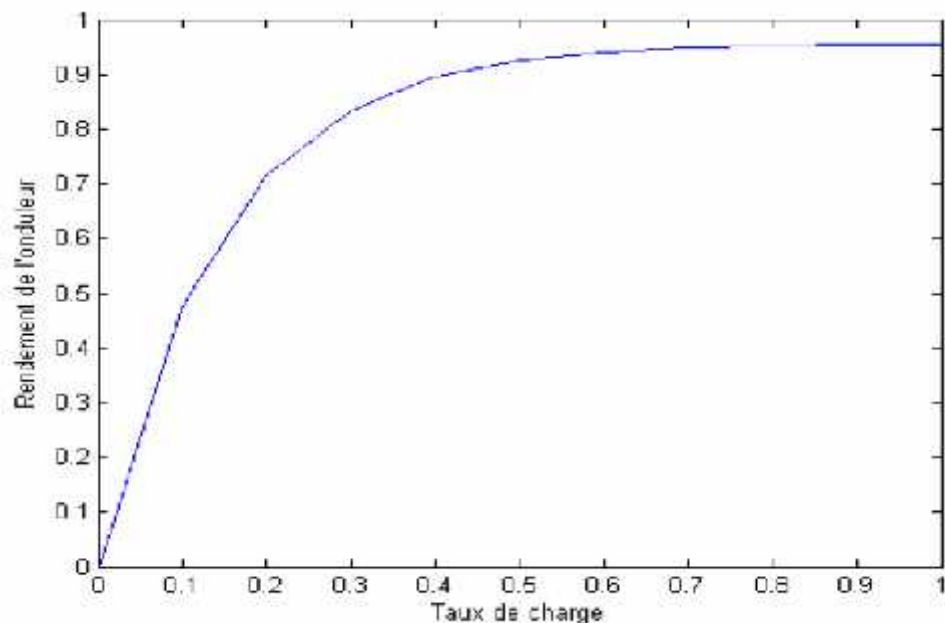


Figure (2.14) : Rendement de l'onduleur [2].

Nous verrons par la suite que le choix de la puissance nominale de l'onduleur en fonction de son application est primordial si l'on veut éviter des pertes énergétiques importantes [2].

14. Dimensionnement d'un système PV autonome :

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée par deux critères essentiels qui sont : le gisement solaire et la demande de l'énergie .Cette gestion d'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle utilisés [2].

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire de panneaux solaire constituant le champ photovoltaïque pour adopter un système PV suffisant pour couvrir les besoins de la charge à tout instant ainsi que la capacité de charge de la batterie .Ces deux éléments sont les plus importants en raison du coût élevé qu'ils totalisent (plus de 50% du prix de l'installation) et du degré de satisfaction [23].

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système PV : par la fonction utilisabilité horaire, par la probabilité de pertes d'énergie, par les méthodes itératives...etc [2]

14.1 Les besoins de l'application en énergie: (Etape 1)

Evaluer sérieusement nos besoins en énergie permet que l'on dispose d'un système bien adapté, sachant que toute exigence supplémentaire se traduira par une augmentation de la puissance à mettre en œuvre : plus de panneaux, plus de batterie[4].

La puissance « P » est une donnée instantanée par contre l'énergie « E » c'est le produit de la puissance par le temps « t » : $E = P \cdot t$

Relation qui permet de calculer les besoins journaliers en énergie de nos applications.

En effet, comme un système photovoltaïque fournit son énergie le jour, il est naturel de prendre la période de 24h comme unité de temps. On notera Econs l'énergie électrique consommée en 24h par l'application, en Wh/j. on l'appelle consommation journalière [4].

Pour calculer la consommation totale de nos applications, on calcule l'énergie électrique consommée en 24h par chaque appareil ou chaque fonction électrique et on les additionne : $E_{cons} = P1 \cdot t1 + P2 \cdot t2 + P3 \cdot t3 + \dots$

Lorsque tous les appareils fonctionnent à la même tension, la consommation journalière peut également se chiffrer en ampère heure « Ah », unité plus pratique pour les systèmes liés à une batterie [4].

14.2 Energie solaire récupérable (Etape 2) :

Orientation et inclinaison :

La question qui vient immédiatement à l'esprit est: comment placer les panneaux solaires pour récupérer un maximum de rayonnement solaire et comment savoir quelle énergie on va récupérer ?

Pour installer un panneau solaire on doit se préoccuper à la fois de l'orientation et de l'inclinaison (voir figure 2-15). L'orientation indique tout simplement vers quel point cardinal un panneau est exposé : il peut faire face au Sud, au Nord, à l'Est, à l'Ouest... tout comme la façade d'une maison. L'inclinaison, quant à elle, est l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal [5].

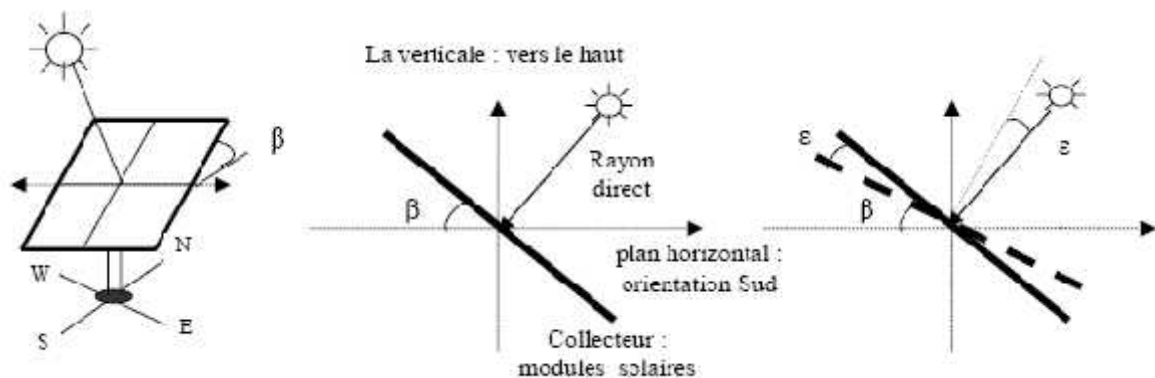


Figure (2-15) : Inclinaison et orientation d'un panneau solaire [5].

Etant donné que la position du soleil dans le ciel varie constamment, il faudrait idéalement que le panneau suive le soleil. Il existe de tels dispositifs «suiveurs», mais ils consomment une part de l'énergie et sont souvent assez onéreux (pour supporter tous les climats) et demandent de l'entretien. Ils sont surtout justifiés pour de gros systèmes avec concentration et pour des rayonnements directs uniquement [5].

En pratique, l'inclinaison optimale pour une utilisation annuelle, est déterminée par la règle suivante [5]:

$$\text{Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle} = \text{Latitude du lieu} + 10^\circ$$

Cet emplacement idéal se justifie, encore une fois, surtout pour les rayonnements directs et les panneaux qui convertissent le mieux ce rayonnement, en l'occurrence les panneaux au silicium cristallin. Les panneaux au silicium amorphe, quant à eux, convertissent très bien le rayonnement diffus, et pourront être placés par exemple à l'horizontale sans perdre trop d'énergie solaire dans les climats où il y a beaucoup de rayonnement diffus [5].

14.3 Calcul de la puissance crête du système (Etape 3)

Si le soleil est la seule source d'énergie du système autonome, sans générateur d'appoint, les modules photovoltaïques doivent alors fournir toute l'énergie consommée, en incluant les pertes à tous les niveaux. La batterie est une capacité tampon qui permet de stocker cette énergie pour en disposer en dehors des périodes de production photovoltaïque, mais elle ne sera jamais une source d'énergie en tant que telle [4].

14.3.1 Production électrique d'un module en une journée

Un module photovoltaïque se caractérise avant tout par sa puissance crête P_c (W), puissance dans les conditions STC (1000 W/m^2 à 25 °C). Si le module est exposé dans ces conditions STC, il va produire à un instant donné une puissance électrique égale à cette puissance crête, et si cela dure N heures, il aura produit pendant ce laps de temps une énergie électrique E_{prod} égale au produit de la puissance crête par le temps écoulé [4] :

$$E_{\text{prod}} = N \times P_c \quad (1)$$

E_{prod} : Energie électrique produite (Wh).

N : Nombre d'heures d'exposition aux conditions STC (h).

P_c : La puissance crête (W).

Cette loi n'est pas strictement applicable, compte tenu d'un rayonnement qui varie tout au long de la journée. On définit le nombre d'heures équivalentes correspondants à la réception d'un éclairage de 1000 W/m^2 pendant un certain nombre d'heures. Ce nombre correspondra à l'énergie produite par un module photovoltaïque pendant une journée d'ensoleillement qui présente un certain profil énergétique [4].

Grâce à la valeur du rayonnement de référence (1000 W/m^2), le nombre d'heures équivalentes se trouve numériquement égale à l'énergie solaire intégrée que l'on exprime en $\text{kWh/m}^2/\text{j}$. $E_{\text{sol}} = N_e \times 1000$

Esol : Energie solaire journalière par unité de surface (Wh/m²/j)

Ne : Nombre d'heures équivalentes (h/j)

1000 W/m² : Puissance dans les conditions STC [4]

14.4 Le stockage (Etape4)

Si l'application doit fonctionner en direct sans stockage, on prendra un photogénérateur dont la puissance maximale à l'éclairement de travail correspond à la puissance de l'appareil [4].

14.4.1 Détermination de la capacité de l'accumulateur

Pour déterminer la capacité de l'accumulateur, multiplier la consommation électrique en Ah de l'application par la durée d'autonomie désirée, et appliquer un coefficient de sécurité [5] :

$$C(Ah) = \frac{\text{Conso. du système sur 24 h (Ah)} \times \text{Durée d'auto. en jours}}{0.6} \quad (2-57)$$

Le coefficient de 0.6 est une valeur typique, qui dépend énormément de la technologie de l'accumulateur, et surtout de la réduction de sa capacité de stockage aux températures basses. Introduire ce coefficient revient à dire que la capacité réellement disponible sur le terrain est à tout moment égale à 60 % de la capacité nominale. On appelle capacité utile cette capacité réduite [5]:

$$\text{capacité utile} = \text{capacité nominale} \times \text{pourcentage utile} \quad (2-58)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié la modulation du système photovoltaïque, nous avons présenté l'influence de la température et de l'ensoleillement sur le courant et la puissance et nous avons étudié les étapes de dimensionnement d'un système photovoltaïque totalement autonome. Dans le chapitre suivant nous allons donner un bref aperçu sur les algorithmes génétiques en vue de les utiliser pour le dimensionnement de notre système photovoltaïque autonome.

Chapitre III

Présentations de méthode d'algorithme génétique

1. Introduction

Les techniques de recherche et d'optimisation sont en général classées en trois catégories énumératives, déterministes et stochastiques. Les AG font partie de la troisième catégorie [24].

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Leur fonctionnement est extrêmement simple. On part avec une population de solutions potentielles (chromosomes) initiales arbitrairement choisies. On évalue leur performance (fitness) relative. Sur la base de ces performances on crée une nouvelle population de solutions potentielles en utilisant des opérateurs évolutionnaires simples : la sélection, le croisement et la mutation. On recommence ce cycle jusqu'à ce que l'on trouve une solution satisfaisante [25].

Les (AGs) ont été initialement développés par [26] [27]. Leurs champs d'application sont très vastes. Outre l'économie, ils sont utilisés pour l'optimisation de fonctions [28], en finance [29], en théorie du contrôle optimal [30], ou encore en théorie des jeux répétés [31], et différentiels [32] [33] [34]. La raison de ce grand nombre d'application est claire : simplicité et efficacité. Bien sûr d'autres techniques d'exploration stochastique existent, la plus connue étant le *recuit simulé* (*simulated annealing* pour une association des deux méthodes) [25].

2. Les propriétés d'algorithme génétique :

Parmi Les propriétés des algorithmes génétiques on peut citer :

- Les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux mêmes.
- Les algorithmes génétiques travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique.
- Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire.
- Les algorithmes génétiques utilisent des règles de transition probabilistes, et non déterministes.

La simplicité de leurs mécanismes, la facilité de leur mise en application et leur efficacité même pour des problèmes complexes a conduit à un nombre croissant de travaux dans différents domaines [35].

3. Mécanismes de base des algorithmes génétiques :

Un algorithme génétique est défini par :

- **Individu/chromosome/séquence** : une solution potentielle du problème [5].
- **Un gène** : est un paramètre particulier d'un individu [36].
- **Population** : un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche [5].
- **Une génération** : est une population à un moment donné.
- **Un parent** : est un individu choisi comme base pour en créer un autre de la génération suivante [36].
- **Environnement** : l'espace de recherche.
- **Fonction de fitness** : la fonction que nous cherchons à maximiser/minimiser [5].

Avant d'aller plus loin il nous faut définir quelques termes importants généralement définis sous l'hypothèse de codage binaire.

4. Séquence /chromosome /individu (codage binaire) :

Un chromosome est une suite de bits en codage binaire, appelé aussi chaîne binaire. Un chromosome A est donc une suite de longueur l de la forme :

$$A = a_1 + a_2 + \dots + a_l \text{ avec } \forall i \in [1, l] \quad a_i \in V = \{0,1\} \quad (3.1)$$

Dans le cas d'un codage non binaire, tel que le codage réel, la suite A ne contient qu'un point, on a donc :

$$A = \{a\} \text{ Avec } a \in \mathbb{R} [5].$$

5. Codage :

Le codage utilisé par un AG est représenté sous forme d'une chaîne de bits qui contient toute l'information nécessaire pour représenter un point de l'espace de recherche. Le codage binaire est le code le plus utilisé, l'inconvénient majeur du code binaire étant que deux points proches dans l'espace des variables (voir la colonne 1 du Tableau 3.1) ne sont pas nécessairement codés par deux chaînes de bits voisines (colonne 2 du Tableau 3.1). On remédie en général à ce problème en utilisant le codage de Gray qui conserve une distance de Hamming de « 1 » entre deux chaînes (colonne 3 du Tableau 3.1). La distance de Hamming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffère de l'une à l'autre. Pour les deux chaînes suivantes : 111 et 100, la distance est de 2 [24].

Le Tableau (3-1) montre un exemple du code binaire et le code Gray pour des variables entières allant de 0 et 7. On voit que la distance de Hamming est de 1 pour chaque entier dans le code Gray, alors que pour les nombres binaires, pour passer de 3 à 4, la distance de Hamming est de 3 [24].

Tableau (3-1) : Code de Gray et code binaire pour une chaîne à trois bits [24].

Variabes entières	Code binaire	Code Gray
0	000	000
1	001	001
2	010	011
3	011	010
4	100	110
5	101	111
6	110	101
7	111	100

6. Fitness d'une séquence :

On appelle fitness d'une séquence toute valeur positive notée $f(A)$, où f est typiquement appelée fonction de fitness.

La fitness est donc donnée par une fonction à valeurs positives réelles. Dans le cas d'un codage binaire, l'on utilise souvent une fonction de décodage d qui permettra de passer d'une chaîne binaire à un chiffre à valeur réelle : $d : \{0,1\}^l \rightarrow \mathbb{R}$ (ou l est la longueur de la chaîne). La fonction de fitness est alors choisie telle qu'elle transforme cette valeur en valeur positive, soit $f : d(\{0,1\}^l) \rightarrow \mathbb{R}_+^*$. Le but d'un algorithme génétique est alors simplement de trouver la chaîne qui maximise cette fonction f . Bien évidemment, chaque problème particulier nécessitera ses propres fonctions d et f [5].

Le décodage le plus souvent retenu est un simple changement de base. Ainsi la chaîne $A = \{0,0,0,1,1\}$ peut être décodée de manière à donner [25].

$$0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 0 + 0 + 0 + 2 + 1 = 3 \quad (3.2)$$

De manière plus générale toute chaîne binaire A peut donc être décodée en une valeur entière x selon la règle suivante [22]:

$$x = d(A) = \sum_{i=1}^l a_i 2^{l-i} \quad (3.3)$$

Cette approche peut être généralisée pour représenter les états d'une variable réelle. supposons que nous cherchons à maximiser f en fonction d'une variable réelle x .

Soit $D = [x_{\min}, x_{\max}]$ avec $D \subset \mathcal{R}$ l'espace de recherche permis avec x_{\min} et x_{\max} les bornes inférieures et supérieures [25].

Soit $prec$ la précision (cheffe après la virgule) avec laquelle nous cherchons x .

Soit $ld = x_{\max} - x_{\min}$ la longueur de l'intervalle D .

Nous devons alors diviser cet intervalle en $n_i = ld * 10^{prec}$ sous-intervalle égaux afin de respecter la précision [25].

La transformation d'une chaîne binaire $A = \{a_1, \dots, a_i\}$ en un nombre réel x peut s'exécuter en deux étapes [25]:

1-conversion (de base 2 en base 10):

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^s a_i 2^{s-i} \quad (3.4)$$

2-recherche du nombre réel correspondant :

$$x = x_{\min} + \hat{x} \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^s - 1} \quad (3.5)$$

Ou de manière plus directe :

$$x = x_{\min} + \frac{ld}{2^s - 1} \sum_{i=1}^s a_i 2^{s-i} \quad (3.6)$$

Exemple :

Soit

$$A = \left\{ \frac{1,1,0,0,1,0,1,0,0,0,0,1,1,0,1,1,1,1,1,1,1,1}{s=22} \right\} \quad (3.7)$$

Alors :

$$\hat{x} = \sum_{i=1}^{s=22} a_i 2^{s-i} = 1 * 2^{21} + 1 * 2^{20} + 0 * 2^{19} + \dots + 1 * 2^0 = 3311359 \quad (3.8)$$

Et

$$x = -1 + 3311359 \frac{2 - (-1)}{2^{22} - 1} = 1.368469 \in [-1, 2] \quad (3.9)$$

7. Construction de la fitness :

La fonction objective a deux buts : optimiser la fonction d'intérêt et prendre en compte d'éventuelles contraintes liées au problème d'optimisation. Nous allons donc distinguer la fonction liée au problème d'optimisation de départ, que nous nommerons fonction objectif et la fonction complète qui sera réellement optimisée par l'AG que l'on appelle fitness.

La fonction objective est plus ou moins simple à déterminer, cela dépend du problème posé. Dans certains cas (classification, régression, . . .), elle est évidente, mais dans d'autres cas, le choix de la fonction objectif représente la plus importante partie du travail. Admettons ici que l'on ait déterminé cette fonction. Il est alors très fréquent de vouloir en plus, rajouter des contraintes sur les solutions générées [37].

Les AG sont alors basés sur les phases suivantes :

- **initialisation** :une population initiale de N chromosomes est tirée aléatoirement.
- **évaluation** :chque chromosome est décodé,puis évalué.
- **sélection** :création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une methode de sélection appropriée .
- **reproduction** :possibilité de croisement et mutation au sein de la nouvelle population.
- **retour** à la phase d'évaluation jusqu'à l'arrêt de l'algorithme [5].

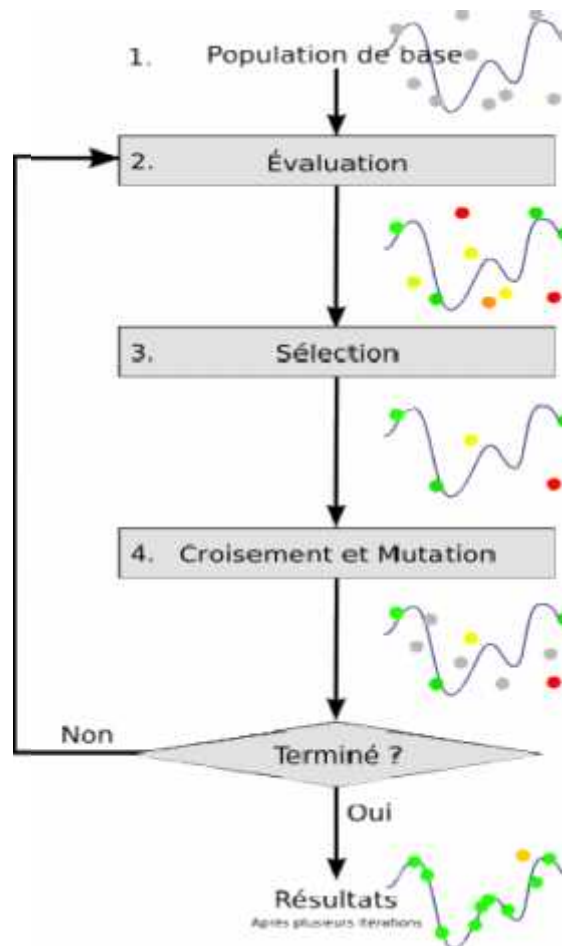


Figure (3-1) : Schéma récapitulatif [38]

8. Organigramme d'un algorithme génétique :

8.1 Principe de base d'un AG standard

Un AG standard nécessite en premier le codage de l'ensemble des paramètres du problème d'optimisation en une chaîne de longueur finie. Le principe d'un AG est simple, il s'agit de simuler l'évolution d'une population d'individus jusqu'à un critère d'arrêt. On commence par générer une population initiale d'individus (solutions) de façon aléatoire. Puis, à chaque génération, des individus sont sélectionnés, cette sélection est effectuée à partir d'une fonction objectif appelée fonction d'adaptation. Puis, les opérateurs de croisement et de mutation sont appliqués et une nouvelle population est créée. Ce processus est itéré jusqu'à un critère d'arrêt. Le critère le plus couramment utilisé est le nombre maximal de générations que l'on désire effectuer. La Figure (3-2) présente le principe de l'AG standard [24].

L'AG débute par la génération d'une population initiale et l'évaluation de la fonction d'adaptation de tous les individus qui composent cette première population. Puis, des individus sont sélectionnés aléatoirement pour la reproduction selon le principe de la survie du plus adapté. Ensuite, des individus « enfants » (ou les descendants) sont générés en appliquant les deux opérateurs génétiques suivants : le croisement et la mutation. Ces enfants sont placés dans une nouvelle population $P(I)$ et vont se substituer, en tout ou en partie, à la population de la génération précédente. De nouvelles populations d'individus vont ensuite se succéder, d'une génération (I) à la génération $(I+1)$, chaque génération représentant une itération jusqu'à l'atteinte du critère d'arrêt. L'AG présenté ci-dessus est dit générationnel car tous les individus enfants générés sont placés dans une population et vont remplacer entièrement la population des individus parents [24].

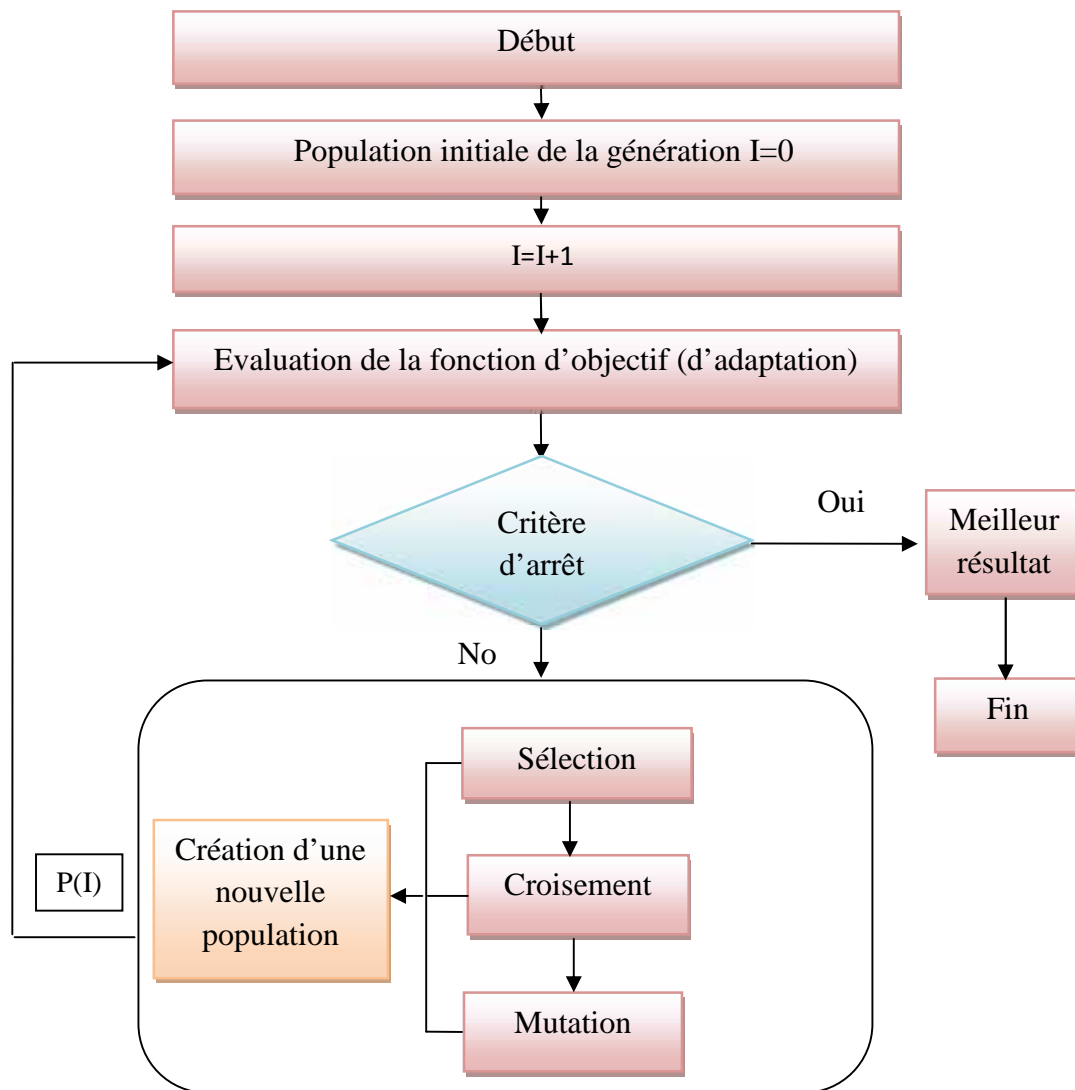


Figure (3-2) : Organigramme d'un Algorithme génétique standard.

8.2 Principaux paramètres

Les opérateurs de l'algorithme génétique sont guidés par un certain nombre de paramètres structurels donnés. La valeur de ces paramètres influence la réussite ou non et la rapidité d'un algorithme génétique. Nous allons maintenant discuter rapidement le rôle de ces paramètres dans la version simple que nous avons retenue des AG [25].

8.2.1 La taille de la population N , et la longueur du codage de chaque individu l

Si N est trop grand le temps de calcul de l'algorithme peut s'avérer très important ; si N est trop petit, il peut converger trop rapidement vers un mauvais chromosome. Cette importance

de la taille est essentiellement due à la notion de *parallélisme implicite* : plus N est grand, plus élevé est le nombre de solutions potentielles évaluées en parallèle par l'AG [25].

8.2.2 La probabilité de croisement p_c

Elle dépend en général de la forme de la fonction de performance. Son choix est bien souvent heuristique (tout comme pour p_m). Plus elle est élevée, plus la population subit de changements importants. Les valeurs généralement admises sont comprises entre 0.5 et 0.9 [25].

8.2.3 La probabilité de mutation p_m

Ce taux est généralement faible puisqu'un taux élevé risque de conduire à une solution sous-optimale en perturbant celle qui est optimale.

Plutôt que de réduire p_m , une autre façon d'éviter que les meilleurs individus soient altérés est d'utiliser *l'élitisme* : Ainsi, peut-on choisir, par exemple, de reproduire à l'identique les 5% meilleurs de la population à chaque génération, l'opérateur de reproduction ne jouant alors que sur les 95% restant [25].

Partant du constat que les valeurs des paramètres des différents opérateurs sont eux-mêmes inconnus et ne peuvent être améliorés au fur et à mesure que de façon expérimentale, certains auteurs, proposent d'utiliser une sorte de méta-AG : l'un pour trouver l'individu optimal et l'autre pour trouver la valeur optimale des paramètres. Ces deux algorithmes tourneraient alors simultanément ou séquentiellement. Toutefois, il est inévitable que le temps de calcul s'alourdisse en conséquence [25].

9. Les opérateurs des algorithmes génétiques :

9.1 Opérateur de Sélection

Cet opérateur détermine la capacité de chaque individu à persister dans la population et à se diffuser. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à sa performance relative au sein de la population. Cela traduit bien l'idée de la sélection naturelle : les gènes les plus performants ont tendance à se diffuser dans la population tandis que ceux qui ont une performance relative plus faible ont tendance à disparaître.

Il existe plusieurs méthodes pour représenter la reproduction. La méthode la plus connue et la plus utilisée est sans nul doute, la **sélection par roulette biaisée** (*roulette wheel*) de Goldberg (1989). Selon cette méthode, chaque chromosome sera dupliqué dans une nouvelle population proportionnellement à sa performance. On effectue, en quelque sorte, autant de tirages avec

remise qu'il y a d'éléments dans la population. Ainsi, dans le cas d'un codage binaire, la performance d'un chromosome particulier, étant $A_i, f(d(A_i))$, la probabilité avec laquelle il sera réintroduit dans la nouvelle population de taille N est [25] :

$$P[A_i] = \frac{f(d(A_i))}{\sum_{j=1}^N f(d(A_j))} \quad (3.10)$$

Plus la performance d'un individu est élevée par rapport à celle des autres individus de la même population, plus il a une chance d'être reproduit dans la population. Les individus ayant une grande performance relative ont donc plus de chance d'être sélectionnés. On parle alors de *sélection proportionnelle*. Le nombre espéré de chaque individu dans la nouvelle population qui va résulter de la sélection est alors égal à [25].

$$n_i = N \times P[A_i] = N \times \frac{f(d(A_i))}{\sum_{j=1}^N f(d(A_j))} = \frac{f(d(A_i))}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(d(A_j))} = \frac{f(d(A_i))}{\bar{f}} \quad (3.11)$$

9.1.1 Les types de sélection :

- **Roulette de casino :**

C'est la sélection naturelle la plus employée pour l'AG binaire. Chaque chromosome occupe un secteur de roulette dont l'angle est proportionnel à son indice de qualité. Un chromosome est considéré comme bon aura un indice de qualité élevé, un large secteur de roulette et alors il aura plus de chance d'être sélectionné [39].

- **N/2 –élitisme:**

Les individus sont triés selon leur fonction d'adaptation, seul la moitié supérieure de la population correspondant aux meilleurs composants est sélectionnée, nous avons constatés que la pression de sélection est trop forte, il est important de maintenir une diversité de gènes pour les utiliser dans la population suivante et avoir des populations nouvelles quand on les combine [39].

- **sélection par tournoi:**

Choisir aléatoirement deux individus et on compare leur fonction d'adaptation (combattre) et on accepte la plus adaptée pour accéder à la génération intermédiaire, et on répète cette opération jusqu'à remplir la génération intermédiaire ($N/2$ composants). Les individus qui gagnent à chaque fois on peut les copier plusieurs fois ce qui favorisera la pérennité de leurs gènes [39].

9.2 Opérateur de croisement :

L'opérateur de croisement permet la création de nouveaux individus selon un processus fort simple. Il permet donc l'échange d'information entre les chromosomes (individus). tout d'abord, deux individus, qui forment alors un couple, sont tirés au sein de la nouvelle population issue de la reproduction. puis un (potentiellement plusieurs) site de croisement est tiré aléatoirement (chiffre entre 1 et $l-1$). enfin, selon une probabilité P_c que le croisement s'effectue, les segments finaux (dans le cas d'un seul site de croisement) des deux parents sont alors échangés autour de ce site (voir figure 3.3) [5].

Cet opérateur permet la création de deux nouveaux individus. Toute fois, un individu sélectionné lors de la reproduction ne subit pas nécessairement l'action d'un croisement. ce dernier ne s'effectue qu'avec une certaine probabilité. Plus cette probabilité est élevée et plus la population subira de chargement [5].

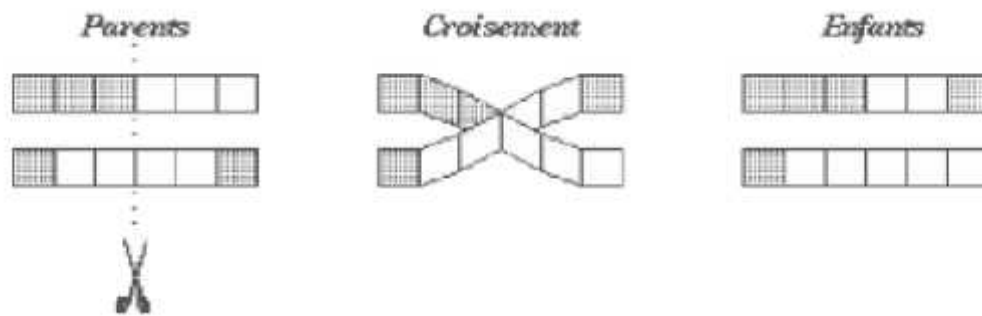


Figure (3 -3) : le croisement en codage binaire. [5]

9.2.1 Les types de croisement binaire :

- **croisement en un point :**

On choisit au hasard un point de croisement, pour chaque couple Figure (3 -4) Notons que le croisement s'effectue directement au niveau binaire, et non pas au niveau des gènes. Un chromosome peut donc être coupé au milieu d'un gène [39].

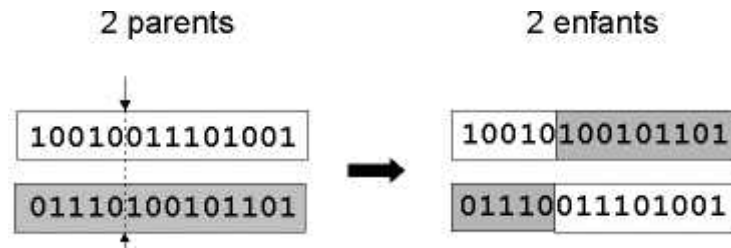


Figure (3-4) : représentation schématique du croisement en 1 point.

Les chromosomes sont bien sûr généralement beaucoup plus longs [39].

- **croisement en deux points:**

On choisit au hasard deux points de croisement Figure (3 -5) Par la suite, nous avons utilisé cet opérateur car il est généralement considéré comme plus efficace que le précédent. Néanmoins nous n'avons pas constaté de différence notable dans la convergence de l'algorithme [39].

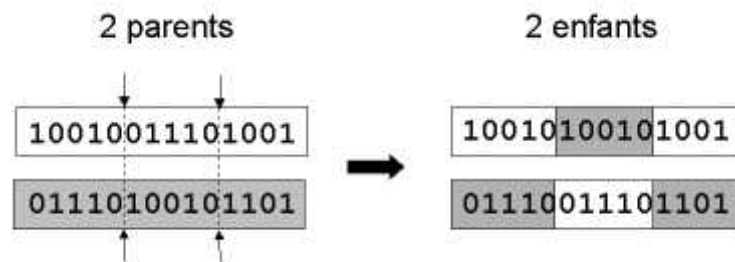


Figure (3 -5) : représentation schématique du croisement en 2 points [39].

Notons que d'autres formes de croisement existent, du croisement en k points jusqu'au cas limite du croisement uniforme [39].

9.3 L'opérateur de mutation :

Cet opérateur consiste à **changer** la valeur allélique d'un gène avec une probabilité P_m très faible, généralement comprise entre 0.01 et 0.001.

On peut aussi prendre $P_m = 1/l_g$ où l_g est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome [40].

Une mutation consiste simplement en l'inversion d'un bit (ou de plusieurs bits, mais vu la probabilité de mutation c'est extrêmement rare) se trouvant en un locus bien particulier et lui aussi déterminé de manière aléatoire [40].

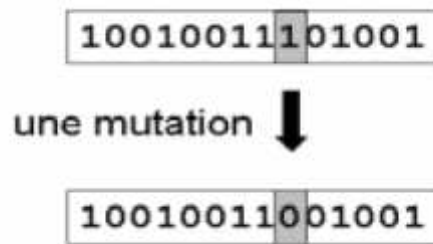


Figure (3-6) : une mutation [40].

L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de notre population de solutions. Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur", il introduit du "bruit" au sein de la population [40].

10. Un exemple simple

Nous reprenons ici l'exemple de Goldberg (1989). Il consiste à trouver le maximum de la fonction $f(x)=x$ sur l'intervalle $[0,31]$ où x est un entier. La première étape consiste à coder la fonction. Par exemple, nous utilisons un codage binaire de x , la séquence (chromosome) contenant au maximum 5 bits [35].

Ainsi, nous avons $x = 2 \quad \{0, 0, 1, 0\}$, de même $x = 31 \quad \{1, 1, 1, 1, 1\}$. Nous recherchons donc le maximum d'une fonction de fitness dans un espace de 32 valeurs possibles de x .

10.1 Tirage et évaluation de la population initiale

Nous fixons la taille de la population à $N = 4$. Nous tirons donc de façon aléatoire 4 chromosomes sachant qu'un chromosome est composé de 5 bits, et chaque bit dispose d'une probabilité $1/2$ d'avoir une valeur 0 ou 1.

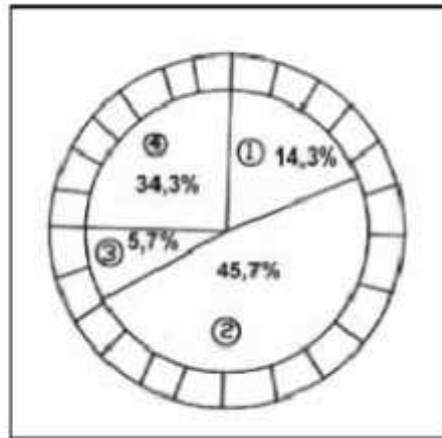
Le maximum, 16, est atteint par la deuxième séquence. Voyons comment l'algorithme va tenter d'améliorer ce résultat [35].

Tableau (3-2) : population initiale [35].

Numéro	Séquence	Fitness	% du total
1	00101	5	14.3
2	10000	16	45.7
3	00010	2	5.7
4	00110	12	34.3
Total		35	100

10.2 Sélection

Une nouvelle population va être créée à partir de l'ancienne par le processus de sélection de la roue de loterie biaisée [35].

**Figure (3-7) :** la roue de loterie biaisée : opération de sélection [35].

Nous tournons cette roue 4 fois et nous obtenons au final la nouvelle population décrite dans le tableau (3-3) [35].

Tableau (3-3) : nouvelle population.

Numéro	Séquence
1	10000
2	01100
3	00101
4	10000

10.3 Le croisement

Les parents sont sélectionnés au hasard. Nous tirons aléatoirement un lieu de croisement (site ou locus) dans la séquence. Le croisement s'opère alors à ce lieu avec une probabilité pc . Le tableau (3.4) donne les conséquences de cet opérateur en supposant que les chromosomes 1 et 3, puis 2 et 4 sont appariés et qu'à chaque fois le croisement s'opère (par exemple avec $pc = 1$) [35].

10.4 La mutation

Dans cet exemple à codage binaire, la mutation est la modification aléatoire occasionnelle (de faible probabilité) de la valeur d'un bit (inversion d'un bit). Nous tirons ainsi pour chaque bit un chiffre aléatoire entre 0 et 1 et si ce chiffre est inférieur à pm alors la mutation s'opère. Le tableau (3.5), avec $pm = 0.05$, met en évidence ce processus [35].

Tableau (3-4) : le croisement.

$l=3$	$l=2$
100 00	01 100
001 01	10 000
10001	01000
00100	10100

Tableau (3-5) : la mutation [35].

Anc. Chr.	Tirage aléat.	Nveau Bit	Nveau Chr.
10001	15 25 36 04 12	1	10011
00100	26 89 13 48 59	-	00100
01000	32 45 87 22 65	-	01000
10100	47 01 85 62 35	1	11100

Maintenant que la nouvelle population est entièrement créée, nous pouvons de nouveau l'évaluer [35].

10.5 Retour à la phase d'évaluation

Tableau (3-6) : nouvelle évaluation [35].

Numéro	Chaîne	Fitness	% du total
1	10011	19	32.2
2	00100	4	6.8
3	01000	8	13.5
4	11100	28	47.5
Total		59	100

Le maximum est maintenant de 28 (séquence 4). Nous sommes donc passés de 16 à 28 après une seule génération. Bien sûr, nous devons recommencer la procédure à partir de l'étape de sélection jusqu'à ce que le maximum global, 31, soit obtenu, ou bien qu'un critère d'arrêt ait été satisfait [35].

11. Le codage réel :

Tous ces opérateurs sont assez simples à mettre en place dans le cas du codage binaire. Malgré tout, quelques inconvénients existent.

- Il peut être difficile d'adapter ce codage à certains problèmes. La représentation binaire traditionnelle utilisée pour les algorithmes génétiques crée des difficultés pour les problèmes d'optimisation de grandes dimensions à haute précision numérique. Par exemple, si l'on doit utiliser 100 variables appartenant au domaine $[500, -500]$ et si l'on a besoin d'une précision de l'ordre de 10^{-6} , on doit utiliser des chromosomes d'une longueur de $l=3000$. Cela, en retour, génère un espace de recherche de l'ordre de 10^{1000} . Pour de tels problèmes, les algorithmes génétiques basés sur des représentations binaires ont de faibles performances [25].
- La distance de Hamming entre les codages binaires de deux nombres réels proches peut être assez grande : l'entier 7 correspond à la chaîne binaire 0111 et la chaîne 1000 correspond à l'entier 8, or la distance entre ces deux binaires est de 4. Ce qui crée bien souvent une convergence mais non l'obtention de la valeur optimale.
- Suivant le problème, la résolution de l'algorithme peut être coûteuse en temps.

- Le croisement et la mutation peuvent être inadaptés (pour la création, par exemple, d'individus n'appartenant pas à l'espace de recherche).

Une des améliorations majeures consiste alors à se servir directement de nombres réels. Des études que montrent que la représentation réelle aboutit souvent à une meilleure précision et qu'en règle générale le gain en termes de temps de calcul (CPU) est important [25]. Ils en concluent qu'une représentation plus *naturelle* du problème offre des solutions plus efficaces. En utilisant le codage réel, l'individu n'est alors plus qu'un nombre réel dans l'espace des valeurs permises : $A = \{a\}$, $a \in D \subset \mathbb{R}$. L'opérateur de sélection reste identique à celui de la roulette biaisée ou du tournoi. En revanche, on utilise de nouveaux opérateurs de croisement et de mutation [25].

11.1 Opérateur de croisement

L'opération de croisement simple du cas binaire ne peut plus être utilisée ici quand on a une seule variable puisque chaque individu est alors un scalaire et non une chaîne. Toutefois, pour une recherche de plus grande dimension, nous pouvons utiliser cet opérateur d'une façon similaire. Ainsi, soient $Y = (y_1, y_2, y_3)$ et $X = (x_1, x_2, x_3)$, deux membres (vecteur de dimension trois) de la population initiale. Nous recherchons donc trois points dans un espace de recherche de dimension trois [25].

L'opération de croisement simple est similaire dans son principe à celle décrite dans le cas binaire. Pour ce faire, nous générons un nombre aléatoire r à partir d'une distribution uniforme sur l'ensemble, et deux nouveaux individus, \tilde{X} et \tilde{Y} , sont créés selon la règle suivante [25] :

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} x_i, & \text{si } i < r \\ y_i, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.12)$$

$$\tilde{y}_i = \begin{cases} y_i, & \text{si } i < r \\ x_i, & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.13)$$

Il est aussi possible d'effectuer un *croisement arithmétique* (cette opération est alors valable même pour une recherche de dimension un). Ce croisement effectue une simple combinaison linéaire entre les parents. Soit, après avoir généré un nombre aléatoire, $U \in (0,1)$, les nouveaux parents sont [25] :

$$\bar{X} = X + (1 - U)Y \quad (3.14)$$

$$\bar{Y} = (1 - U)X + UY \quad (3.15)$$

Enfin, on peut aussi avoir recours à un *croisement heuristique*. Cet opérateur effectue une extrapolation linéaire des deux individus pour créer un nouvel individu qui va les remplacer. Ce nouvel individu, Z, est créé selon le processus suivant (sous l'hypothèse que $f(X) < f(Y)$, sinon X est permuté avec Y) qui utilise un nombre aléatoire $r \in [0,1]$ [25]:

$$Z = X + r(X - Y) \quad (3.16)$$

Il est possible qu'une valeur de r ne donne pas de valeur admissible. La procédure est alors répétée jusqu'à ce que l'on obtienne une valeur admissible ou qu'un nombre maximal de répétitions soit atteint. Cet opérateur est le seul des mécanismes de croisements à utiliser *directement* une information reliée à la performance. Quand le calcul de la performance n'est pas trop coûteux, cette méthode peut être utilisée pour améliorer l'efficacité de la recherche et le réglage fin (*fine tuning*) de l'AG au niveau local [25].

11.2 Opérateur de mutation :

La *mutation uniforme* : est identique à celle du codage binaire. Ainsi, chaque variable $x_i \in X$ est changée selon une certaine probabilité en un nombre aléatoire tiré dans une distribution uniforme sur l'intervalle $[b_1^i, b_2^i]$, avec b_1^i et b_2^i les bornes inférieures et supérieures pour x_i .

La *mutation non uniforme* : revient à changer la variable x_i en un nombre tiré dans une distribution non uniforme. Cette nouvelle variable \tilde{x}_i est telle que [25]:

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} x_i + (b_2^i - x_i)f(G), & \text{si } \alpha < 0.5 \\ x_i - (x_i - b_1^i)f(G), & \text{si } \alpha \geq 0.5 \end{cases} \quad (3.17)$$

Avec

$$f(G) = (\tilde{\alpha} (1 - \frac{G}{G_{max}}))^b \quad (3.18)$$

$\alpha, \tilde{\alpha}$ = nombres aléatoires (0.1),

G = la génération courante,

G_{max} = le nombre maximum de générations (i. e. de création de nouvelles populations)

b = un paramètre déterminant de degré de non uniformité.

Nous avons un dernier opérateur de mutation : la *mutation dans les bornes*. Avec cet opérateur, chaque variable x_i choisie pour muter prend pour valeur l'une des deux bornes ou b_1^i ou b_2^i avec équiprobabilité. A l'évidence, cet opérateur n'a d'intérêt et d'efficacité que si la solution est proche des bornes de l'espace de recherche. Notons qu'il est possible de combiner plusieurs opérateurs en même temps [25].

12. Applications :

Les applications des AG sont multiples :

- optimisation de fonctions numériques difficiles (discontinues...).
- traitement d'image (alignement de photos satellites, reconnaissance de suspects...).
- optimisation d'emplois du temps, optimisation de design, contrôle de systèmes industriels.
- apprentissage des réseaux de neurones.
- Les AGs peuvent être utilisées pour contrôler un système évoluant dans le temps (chaîne de production, centrale nucléaire...) car la population peut s'adapter à des conditions changeantes. Ils peuvent aussi servir à déterminer la configuration d'énergie minimale d'une molécule.
- Les AG sont également utilisées pour optimiser des réseaux (câbles, fibres optiques, mais aussi eau, gaz...),
- Des antennes, Ils peuvent être utilisés pour trouver les paramètres d'un modèle petit-signal à partir des mesures expérimentales [39].

13. Principaux avantages et désavantages des A.G.

13.1 Désavantage :

-Difficulté de mise en forme permettant de profiter pleinement du rôle des opérateurs génétiques : le choix de la représentation et la définition de la fonction de fitness nécessitent une certaine ingéniosité.

-Convergence prématurée difficile à détecter et à éviter. Pour lutter contre ce phénomène, une des méthodes les plus simples est appelée "**kick**".

Lorsqu'une certaine stagnation est observée, par exemple lorsque la fitness moyenne ne s'est pas ou très peu améliorée depuis un certain nombre d'itérations, un certain pourcentage de la population choisi arbitrairement est remplacé par de nouveaux individus tout à fait quelconques [41].

13.2 Avantage :

-Adaptation possible aux calculateurs parallèles via un nouvel opérateur (**migration**) et une découpe du domaine de recherche en sous-régions (dèmes). Toutes les I itérations, un certain nombre d'individus de chaque sous-population qui, jusque là, évoluait séparément migre vers d'autres sous populations choisies au hasard apportant à celles-ci du sang neuf. La migration peut évidemment être simulée sur un ordinateur classique sans gain de temps mais en gardant l'avantage de réduire le phénomène de convergence prématurée.

Possibilité d'intégration des A.G dans d'autres méthodes comme les systèmes d'apprentissage de façon à créer de nouveaux comportements ou les réseaux de neurones afin d'en améliorer la structure et l'apprentissage [41].

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les Algorithme génétique qui nécessitent initialement le codage des individus de la population. Ensuite, nous avons présenté les trois méthodes de base de l'opérateur de sélection. Cet opérateur détermine la capacité de chaque individu à persister dans la population et à se diffuser. Les opérateurs de croisement et de mutation qui permettent de créer une nouvelle population ont été aussi abordés. Nous avons donné les différents domaines d'application de cette méthode. Enfin nous avons présenté les avantages et les inconvénients de cette méthode.

Chapitre IV

Dimensionnement d'un système d'éclairage par la méthode d'Algorithme génétique

1. Introduction

Le but du dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome est essentiellement la détermination de deux éléments : le premier est la taille du champ photovoltaïque permettant de couvrir les besoins de la charge à tout instant, le deuxième est la capacité de la batterie. On présente dans notre travail une méthode de dimensionnement optimale, utilisant les *Algorithme génétique* (AG), d'un système d'éclairage solaire autonome sur la région d'ADRAR.

Un programme a été développé, en utilisant *MATLAB*, pour réaliser cette simulation.

L'objectif est d'assurer une autonomie totale avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal du système photovoltaïque.

On a déterminé, par cette simulation, la puissance crête optimale du module photovoltaïque ainsi que la capacité optimale de la batterie permettant la minimisation du coût.

2. Données météorologiques utilisées:

En utilisant les moyennes mensuelles de la température et de l'ensoleillement, présentes sur le site de la NASA [42]; des données synthétiques ont été générées par le logiciel PVSYS. Grâce à ces données, la puissance maximale produite par le système et l'évolution de la charge de la batterie ont été déterminés en utilisant le logiciel MATLAB, pour le site d'Adrar (27.51°N, 0.17°W).

Les données synthétiques précédentes concernent:

- la température ambiante (T_a) durant une année.
- l'ensoleillement (I_t) sur une surface horizontale durant une année.

3. Description de la méthode utilisée

La simulation est divisée en quatre étapes :

- **La première étape :** on va calculer la puissance maximale à la sortie d'un générateur PV de puissance crête valant 110 Wc pris comme référence et l'évolution de la charge d'une batterie de référence de capacité 1000Wh sur un plan horizontal ($\beta = 0$).
- **La deuxième étape :** on fait le même calcul précédent mais dans cette étape le panneau est incliné avec un angle β .
- **La troisième étape :** c'est l'étape la plus importante dans ce travail, on applique l'algorithme Génétique pour minimiser le coût d'installation PV et trouver la taille optimale du panneau et de la batterie.
- **La dernière étape :** on va faire la comparaison entre les résultats obtenus par la méthode intelligente (AG) et ceux d'une méthode classique (méthode du mois le plus défavorable).

Les paramètres du panneau de référence utilisé dans notre simulation figurent dans le tableau (4.1):

Tableau (4-1) : paramètre du panneau de référence

Paramètre	Valeur
Courant de court-circuit du module sous les conditions de référence (I _{ph_ref})	3.45A
Tension de circuit ouvert du module sous les conditions de références (v _{co})	43.5V
Ensoleillement de référence(E _{ref})	1000W /m ²
Température de référence(T _{ref})	298k°
Constant de Boltzmann K	1.3805e23j/K
La charge d'électron q	1.6e-19

L'organigramme général de la méthode est montré dans la figure (4-1).

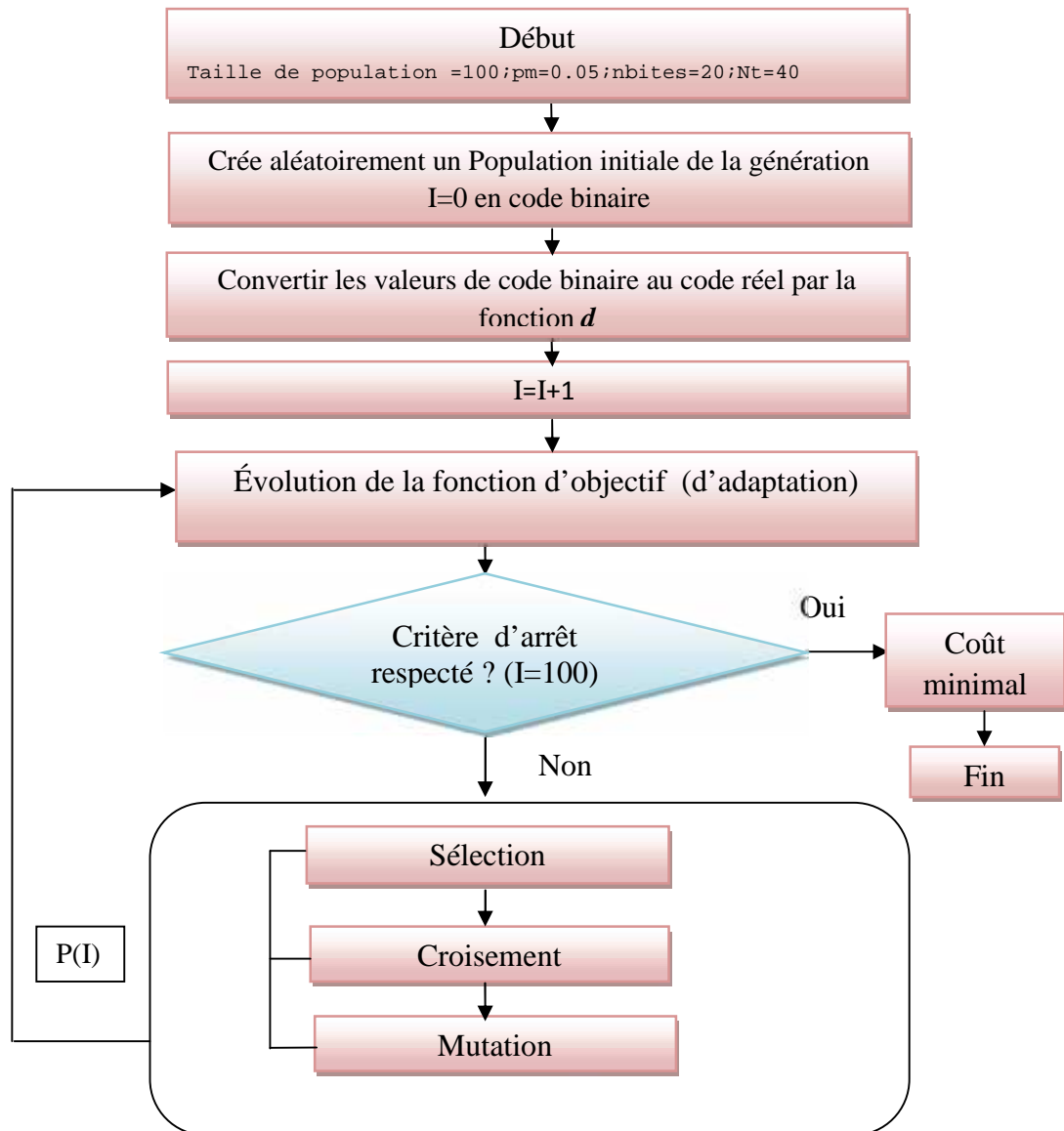


Figure (4-1) :L'application de (AG) dans notre travaille

4. La température et l'ensoleillement synthétique du site d'Adrar:

La figure (4-2) et Le figure (4-3) représentent respectivement la variation de la température ambiante et de l'ensoleillement par rapport au temps. Ces données sont générées en utilisant le logiciel PVSYST. On observe que la température et l'ensoleillement sont plus élevés dans l'intervalle [400,600] qui correspond à la saison d'été. Par contre il ya une réduction de ces deux paramètres dans les autres saisons.

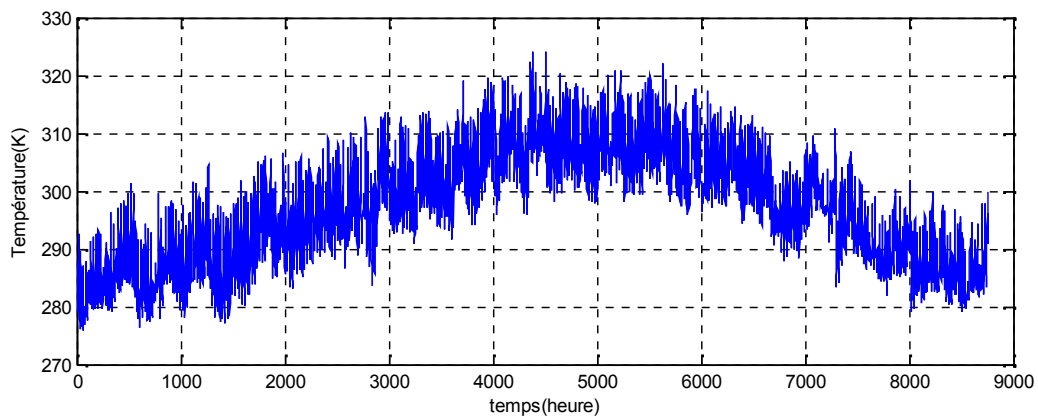


Figure (4-2) : la température d'Adrar en une année.

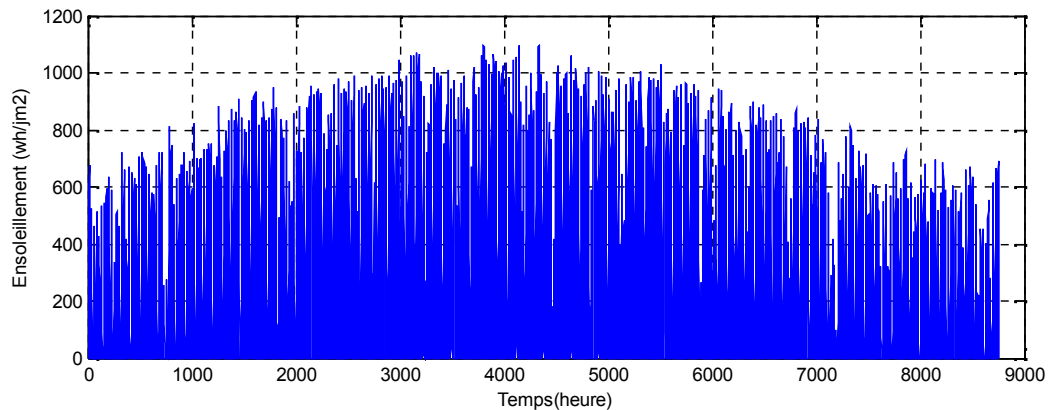


Figure (4-3) : Ensoleillement sur un plan horizontal en Adrar.

La figure (4-4) et la figure (4-5) représentent la puissance produite par le générateur de référence et la charge de batterie de référence respectivement, en fonction du temps, pour un plan horizontal. On trouve que le nombre des heures de non autonomies est égale à 540 heures avec un taux de décharge de la batterie de 50% .

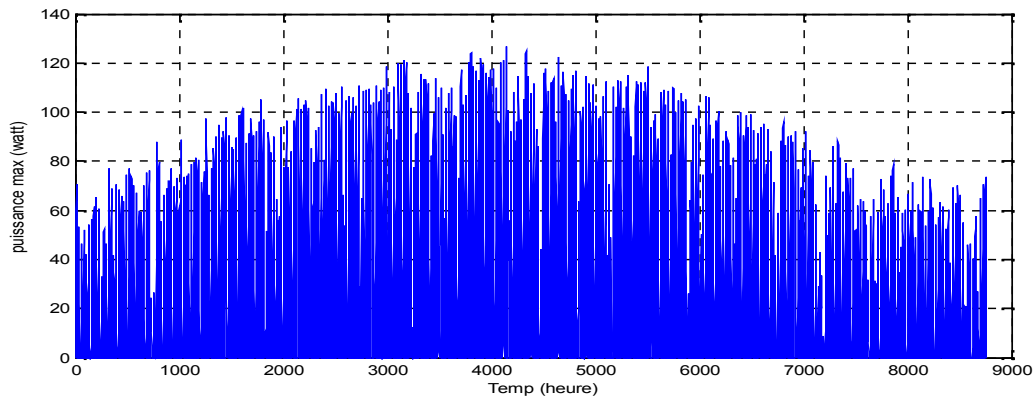


Figure (4-4) : la puissance p_{\max} au plan horizontale.

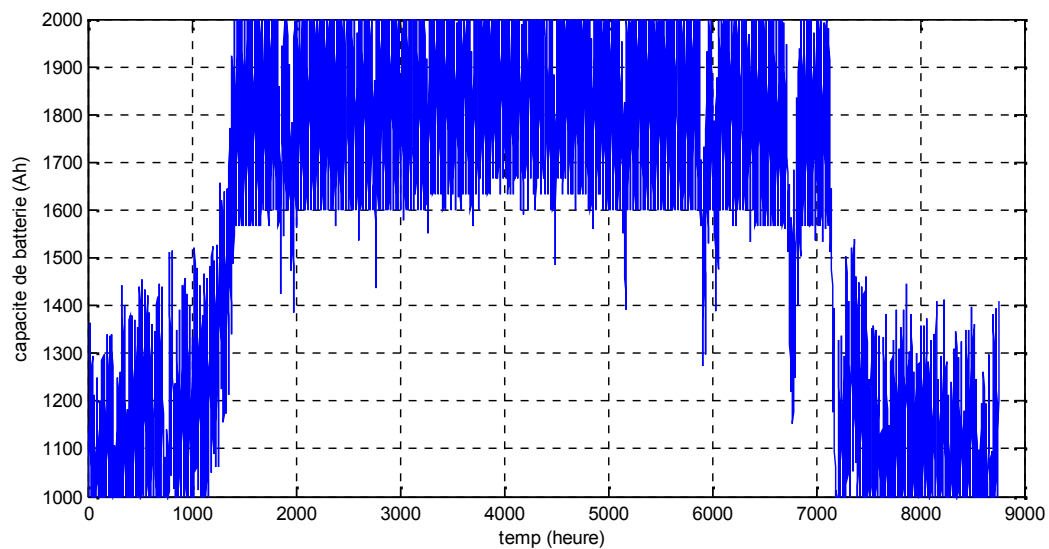


Figure (4-5) : le développement de la charge de batterie en cas horizontale.

5. Angle d'inclinaison des panneaux solaires

L'angle d'inclinaison des panneaux solaires est très important dans un system photovoltaïque pour obtenir le maximum de puissance possible. Le placement adéquat nous aide à récupérer un maximum de rayonnement solaire. après plusieurs essais nous avons trouvé que l'angle qui donne le meilleur résultat est $\approx 41^\circ$.

La figure (4-6) représente la variation d'ensoleillement sur un plan incliné d'un angle $\approx 41^\circ$ en fonction du temps, on observe que les valeurs d'irradiation sont presque au maximum durant les quatre saisons.

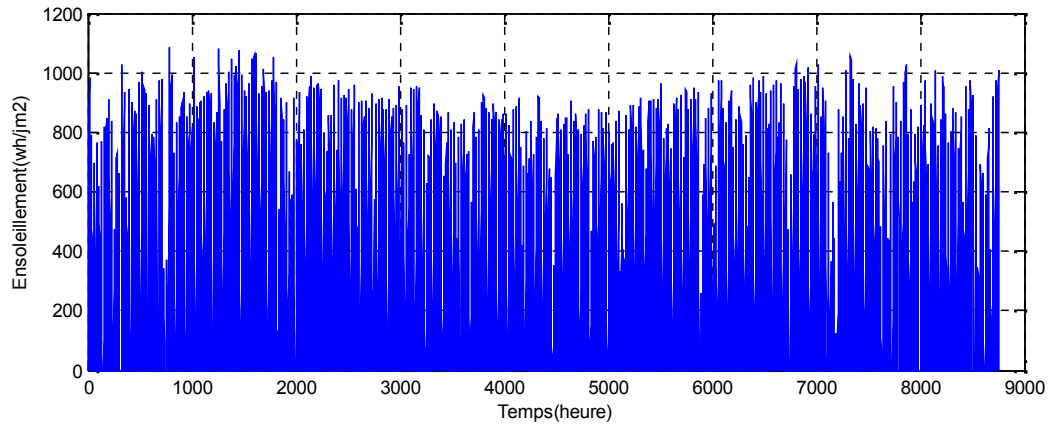


Figure (4-6) : Ensoleillement en Adrar sur un plan incliné ($\alpha = 41^\circ$).

Les deux figures (4-7) et (4-8) représentent la variation de la puissance max et de la charge de la batterie en fonction du temps mais sur un plan incliné ($\alpha = 41^\circ$).

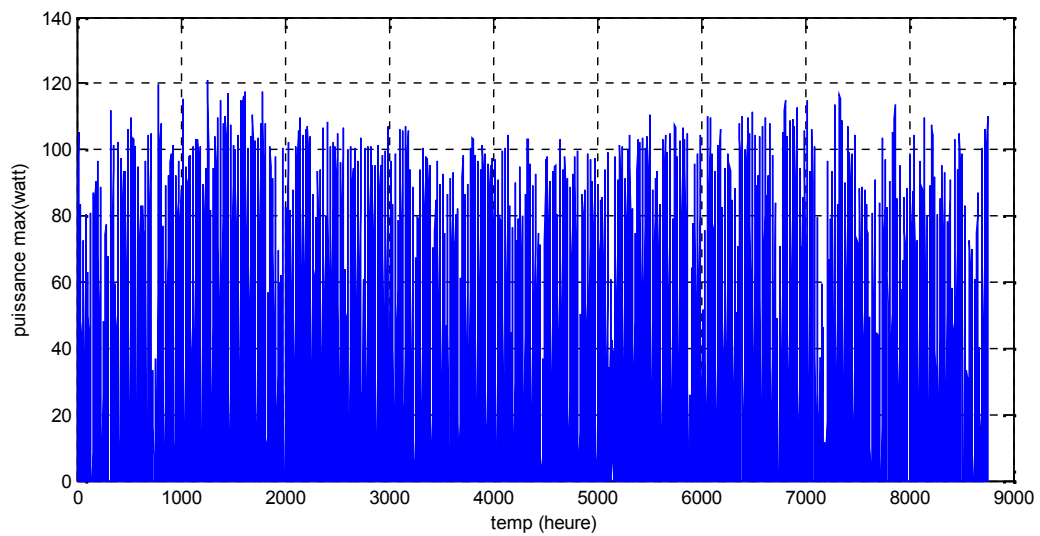


Figure (4-7) : La puissance max ($\alpha = 41^\circ$).

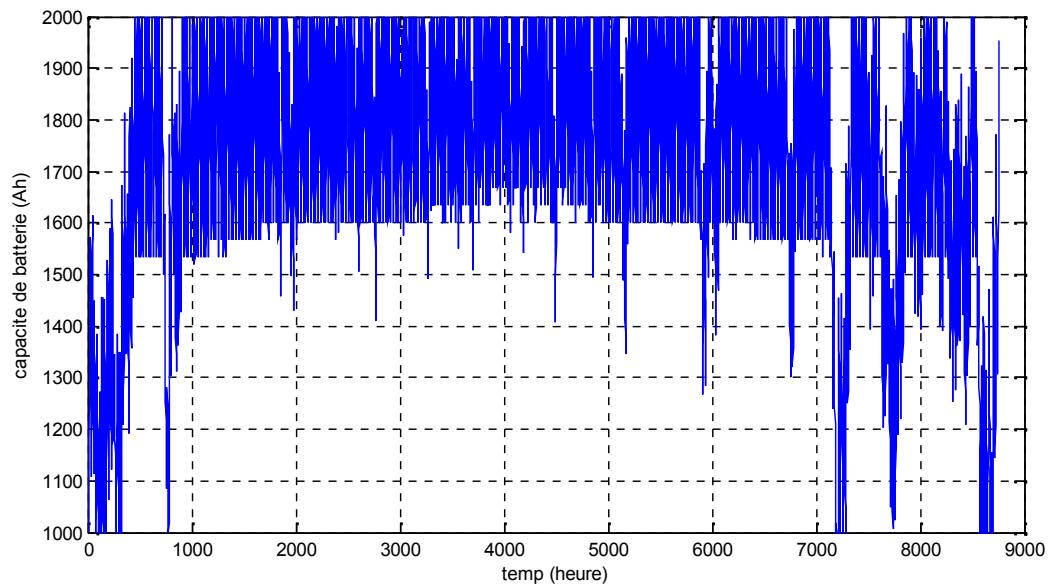


Figure (4-8) : la charge et la décharge de batterie ($\theta = 41^\circ$).

Résultat 1 :

Le nombre des heures est diminués de 540 dans le plan horizontale à 89 au plan incliné mais on veut encore diminuer le nombre pour cette raison on va appliqué la méthode d'algorithme génétique.

6. L'optimisation du système photovoltaïque par la méthode d'algorithme génétique :

Essentiellement, un système d'éclairage autonome (voir la figure (4-9)) est composé des éléments suivants:

- Un module photovoltaïque.
- Une batterie de stockage.
- Un lampadaire solaire.
- Un régulateur de charge.



(A)



(B)



(c)

Figure (4-9) : Le système d'éclairage photovoltaïque de l'université d'Adrar

6.1 Le prix du panneau et de la batterie :

Dans notre travail on s'est basée sur les prix moyen qui sont représentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau (4-2) : les prix moyens.

Le Prix moyen en 1watt (€)	
Panneau	2,43
Batterie	0,25

Les prix des autres éléments du système n'ont pas été pris en compte du fait qu'ils sont considérés comme constants.

6.2 Calcul du coût du système autonomie à différents angles d'inclinaison:

Le tableau suivant représente l'influence de l'angle d'inclinaison sur notre système d'éclairage photovoltaïque en utilisant l'algorithme génétique pendant une année.

A chaque valeur d'angle d'inclinaison il existe une variation de la capacité de la batterie et de la puissance de panneau tel que le coût du système est modifié.

Tableau (4-3) : l'influence de changement d'angle sur le coût d'installation PV.

Intervalle de temps (heure)	Angle d'inclinaison	Capacité de batterie (Wh)	Puissance de panneau (Wc)	Coût de système (€)
m=1 :8760	$= (\pi/6)=30^\circ$	2666	140.60	1.0082e+03
	$= (7\pi/36)=35^\circ$	1999	210.57	1.0116e+03
	$= (19\pi/90)=38^\circ$	2655	138.13	999.4413
	$= (13\pi/60)=39^\circ$	2661	137.24	998.7478
	$= (2\pi/9)=40^\circ$	2695	133.24	997.7383
	$= (41\pi/180)=41^\circ$	2694	133.22	997.2926
	$= (43\pi/180)=43^\circ$	2485	155.41	998.9013
	$= (\pi/4)=45^\circ$	2445	159.55	999.0097
	$= (12\pi/45)=48^\circ$	2729	141.43	1.0261e+03
	$= (\pi/3)=60^\circ$	2492	171.87	1.0408e+03
	$= (13\pi/36)=65^\circ$	2496	175.65	1.0509e+03

On remarque que l'angle α a une influence sur le coût d'installation PV et les résultats réalisés pour $\alpha=41^\circ$ sont représentés dans la figure (4-10) et le tableau (4-4) suivant :

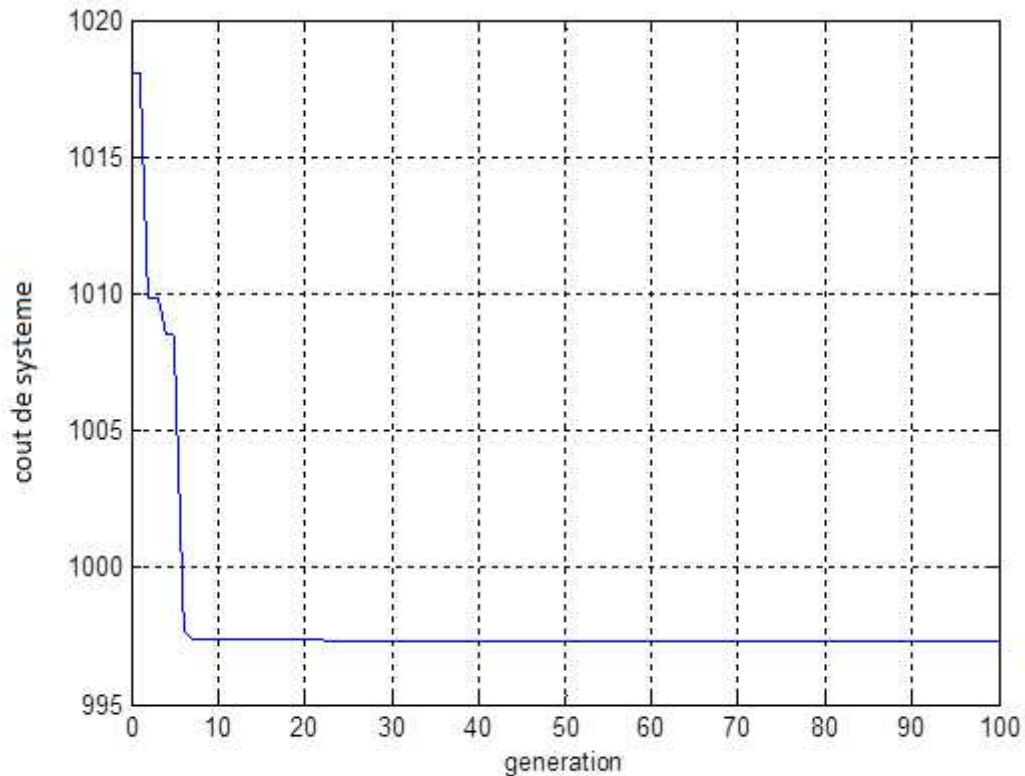


Figure (4-10) : Cout du système photovoltaïque autonome (€).

Tableau (4-4) : meilleurs résultats obtenus par les AG

Résultat	Valeur
Capacité de batterie (Wh)	2694
Puissance de panneau (Wc)	133.22
Le cout minimal	997.2926€
nombre d'heures non autonome	0

6.3 La discussion :

La figure (4.10) représente la variation du cout de l'installation PV d'une génération à une autre, le coût diminue et devient stable finalement dans la valeur 997.2926€

On conclue que l'algorithme génétique fait l'optimisation de notre système et le coût minimal est égal à 997.2926€.

6.4 La charge et décharge de La batterie :

La figure (4-11) représente le développement de la charge de la batterie pendant une année avec la batterie complètement chargé à l'état initial.

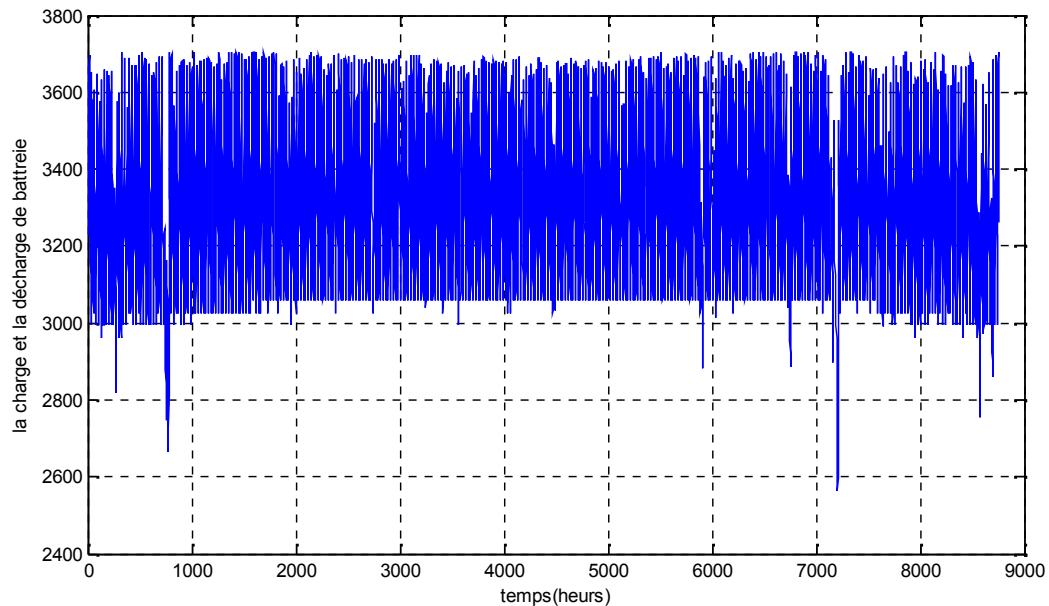


Figure (4-11) : la charge et la décharge de la batterie.

Résultat 2 :

Nombre des heures non autonomes et égale à 0.

Remarque 1 :

Après la comparaison entre le deux résultat 1 et 2 on remarque que le nombre des heures non autonomes est diminuée de 89 à 0 alors la méthode d'algorithme génétique fait l'optimisation de système PV autonome.

Remarque 2 :

Si la capacité initiale de batterie est égale à $C_b/2$ on trouve le résultat suivant :

Tableau (4-5) : des résultats de méthode AG.

Résultat	Valeur
Capacité de batterie (Wh)	2629
Puissance de panneau (Wc)	140.21
Le cout minimal	8.0000e+10€
Nombre d'heures non autonome	4961

La figure (4-12) représente la variation de cout dans chaque génération. On observe que le cout d'installation est égale 8^e+10€ donc la capacité initiale est très importante dans notre étude.

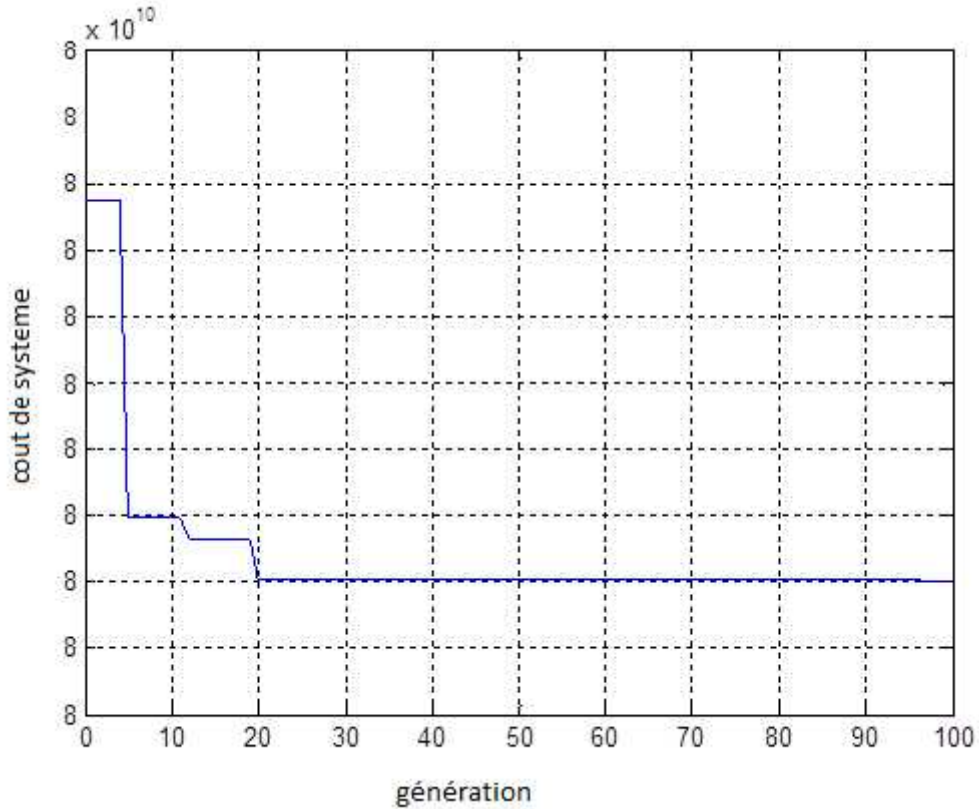


Figure (4-12) : Coût de système photovoltaïque autonome.

La figure (4-13) représente le développement de la charge de batterie, on obtient un mauvais résultat en début, puis que la charge de batterie initialement n'est pas approprié.

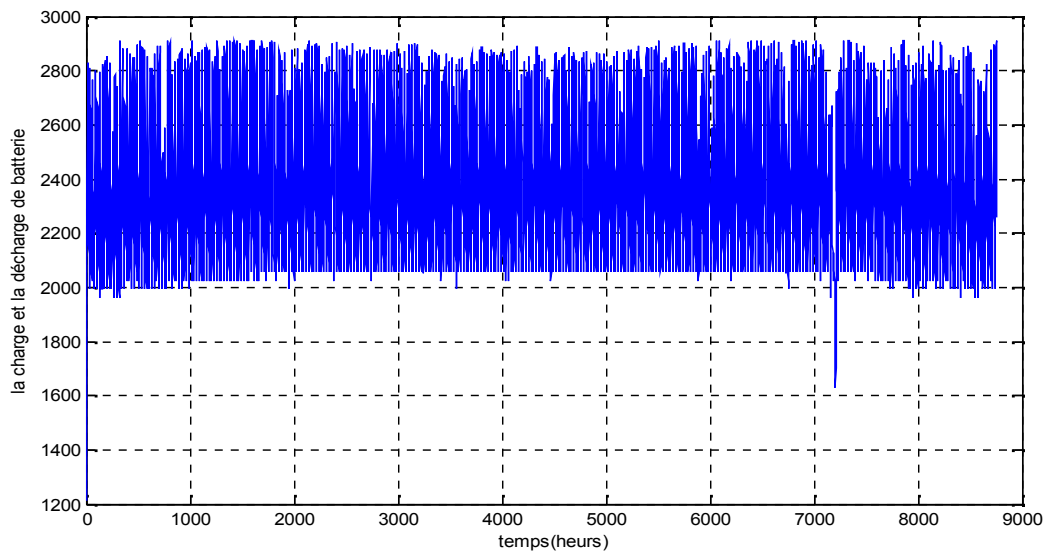


Figure (4-13) : la charge et la décharge d'une batterie.

7. méthode du mois le plus défavorable:

Cette méthode est appliquée dans le mois le plus défavorable en irradiation solaire de telle sorte que les besoins en énergie électrique soient couverts toute l'année avec les hypothèses prises sur le nombre de jours d'autonomie sans soleil, un moyen de stockage comme des batteries est nécessaire pour l'utilisation de l'énergie en temps différé [43].

On applique cette méthode sur le même système d'éclairage précédent en prenant l'angle d'inclinaison égale 41° .

7.1 Puissance consommation :

On calcule la puissance de consommation journalière en moins décembre par la relation suivante :

$$P_{con} = P_c * N \quad (4.1)$$

Tel que:

$$N = \frac{\text{la somme des heures de nuit de moins décembre}}{31} \quad (4.2)$$

On a:

$$P_c = 30 \text{ watt}$$

N=14.75 heure

Donc :

$$P_{con} = 442.26wh/j$$

P_{con} : puissance de consommation.

P_c : puissance de consommation nominale de la lampe d'éclairage

N : nombre moyenne des heures de nuit de moins décembre.

7.2 Irradiation d'un jour de mois de décembre en Adrar :

D'après le tableau (4-6) ci-dessous, le mois le plus défavorable en terme d'éclairement est le mois de décembre [42].

Tableau (4-6) : l'irradiation moyenne sur plan horizontale en région d'Adrar

Irradiation (I_r) (wh/jm ²)											
Jan	fév	mar	avr	mai	Juio	jui	aoû	sept	octo	nov	déc
3.68	4.74	5.90	6.84	7.32	7.70	7.45	6.96	5.86	4.60	3.83	3.32

L'irradiation d'un jour de mois de décembre sur un plan incliné est la somme d'irradiation sur un plan incliné de ce moins divisé sur de nombre totale de jour de même moins. On trouve donc :

$$I_r = 5178.6wh/jm^2$$

7.3 La puissance crête :

$$P_c = \frac{P_{con}}{k_{conv} + k_t + I_r} \tag{4.3}$$

k_{conv} : coefficient de conversion.

k_t : coefficient de température.

$$P_c = \frac{442.26}{0.9 \cdot 0.8 \cdot 5178.6} = 118.61 \text{wc}$$

7.4 La capacité de la charge de la batterie C_{bat} :

La capacité C_{bat} des batteries se calcule en fonction des besoins journaliers P_{con} en énergie électrique, du nombre de jours N_j de stockage désirés et d'un facteur K_b pour les différentes pertes (on a pris $K_b = 0,9$), par la formule ci-après [41]:

$$C_{\text{bat}} = \frac{\left[\frac{P_{\text{con}} \cdot N_j}{0.9} \right]}{K_b} \quad (4.4)$$

Le tableau ci-dessous représente les résultats obtenu par variation du nombre de jour de stockage de batterie N_j .

Tableau (4-7) : les résultats obtenu de la méthode de mois le plus défavorable.

Puissance crête de panneau (wc)	Capacité de batterie (Wh)	Nombre de Jours de stockage de batterie (autonomie)	Coût du système (€)	Nombre des heures de non autonomie
118.61	2730	5	970.72	12
118.61	3003	5.5	1039	4
118.61	3276	6	1107.2	3
118.61	3549	6.5	1175.5	0
118.61	5460	10	1653.2	0

6.5 Jours c'est la durée minimale de stockage de batterie qui donne le nombre des heures de non autonome égale à 0.

8. La comparaison entre les deux méthodes :

Dans le tableau (4-8) on donne les meilleurs résultats des deux méthodes.

Tableau (4-8) : la comparaison entre les deux méthodes.

caractéristiques méthodes	Puissance crêt de panneau(Wc)	Capacité de batterie (Wh)	Coût d'installation PV(€)
La méthode d'algorithme génétique	113.22	2694.3	997.2926
Méthode du mois le plus défavorable	118.61	3549	1175.5

Après la comparaison on conclut que la méthode d'algorithme génétique est meilleure par rapport à la deuxième méthode puisque le cout du système photovoltaïque calculé par la deuxième méthode est supérieur que le cout calcule par l'algorithme génétique.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons appliqué les algorithmes génétiques (AG) pour le dimensionnement d'un système d'éclairage photovoltaïque. Pour cela nous avons utilisé les données horaires (l'ensoleillement et la température ambiante) pour une année sur le site d'Adrar.

Cette méthode est appliquée pour optimiser la puissance crête du panneau PV et de la capacité de la batterie du système d'éclairage autonome qui conviennent pour le bon fonctionnement.

Enfin nous avons fait la comparaison entre les résultats obtenus par la méthode intelligente (AG) et les résultats de méthode classique (le mois le plus défavorable). On a trouvé que la méthode d'algorithme génétique est meilleure par rapport à la deuxième méthode puisque le coût du système photovoltaïque calculé par la deuxième méthode est supérieur que le coût calculé par l'algorithme génétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans notre travail nous avons présenté la production d'électricité à partir d'un système photovoltaïque totalement autonome avec un système de stockage à Adrar en utilisant les moyennes mensuelles de la température et de l'ensoleillement, présentes sur le site de la NASA.

L'objectif a été de diminuer le coût du système photovoltaïque grâce à un dimensionnement optimal, en prenant en compte son bon fonctionnement.

La méthode d'algorithme génétique nous a permis de dimensionner ce système pour déterminer les deux valeurs optimales (la puissance crête du panneau et la capacité de la batterie).

Dans la première partie, nous avons montré les différentes notions en relation avec ce système photovoltaïque ; ainsi que les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans la deuxième partie, on a étudié la modélisation et les étapes essentielles du dimensionnement de ce système autonome

Dans la troisième partie nous avons mis l'accent sur la méthode d'algorithme génétique et ses opérateurs de base, la sélection, le croisement et la mutation.

Dans la dernière partie nous avons appliqué cette méthode pour faire l'optimisation d'un système d'éclairage autonome sur le site d'Adrar.

On a utilisé aussi la méthode classique du mois le plus défavorable pour enfin faire une comparaison entre les deux méthodes.

Les résultats obtenus montrent que la méthode utilisant les algorithmes génétiques donne de meilleurs résultats par rapport à la méthode classique car elle permet une meilleure précision dans le calcul du coût minimum. Les résultats montrent aussi qu'il est recommandé de complètement charger la batterie avant de la placer dans le système. Notre étude a montré que le meilleur angle d'inclinaison pour le générateur PV vaut 41° .

Comme perspectives pour ce travail, nous recommandant :

Conclusion générale

- d'ajouter l'angle d'inclinaison dans les paramètres d'optimisation.
- Utiliser cette méthode pour optimiser d'autre type de systèmes photovoltaïques

- [1] fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovoltaique.
- [2] BELHADJ Mohammed, «Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome», mémoire de magister, Universitaire De Bechar ,2007-2008.
- [3] M. Dahbi ,« Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, 2007.
- [4] BOUZID Allal .M et AZIZI.M , « Dimensionnement d'un système photovoltaïque l'alimentation d'une ferme .Étude de l'onduleur triphasé lié à cette application », Mémoire de projet de fin d'étude, Université d'Oran « Mohamed Boudiaf », 23 juin 2008.
- [5] BELLALA Djamel, «Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques», Thèse Doctorat, Université de Batna.
- [6] www.magnetosynergie.com/.../LeRayonnementSolaireEtLePhotovoltaiqu...
- [7] www.energie-environnement-upmc.fr/userfiles/file/.../MasterEESolaire.p...
- [8] www.ac-noumea.nc/jules-garnier/phyapp/solaire/doc/cours_photo.pdf
- [9] http://www.ecosources.info/dossiers/Types_de_cellules_photovoltaiques
- [10] BRIGAND Sylvain Ingénieur de formation. Directeur dupôle Recherche et développement du bureau d'études GAEA Groupe, spécialisé dans le domaine de l'environnement et notamment de l'énergie renouvelable. «Les principes de l'énergie solaire photovoltaïque»,2008.
- [11] Installations photovoltaïques - Systèmes autonomies, Belpower division de reibel (Belgium) S.A.
- [12] http://www.arebor-energie.fr/encyclopedie/index.php/D%C3%A9finition_d%27un_module_photovolta%C3%A9
[Fque](#)

[13] http://www.areborenergie.fr/encyclopedie/index.php/D%C3%A9finition_d%27une_batterie_solaire

[14] http://www.areborenergie.fr/encyclopedie/index.php/Les_diff%C3%A9rents_mod%C3%A8les_de_batterie_solaire

[15] MILOUDI. Leila, «étude et simulation de la poursuite de la trajectoire du soleil par un panneau solaire photovoltaïque».Mémoire de majesté. Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES ,11 janvier 2012.

[16] Doctorat MAKHLOUFI Salim, « contribution a l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes», Thèse de doctorat, université HA D J L A K H D A R B A T N A ,19 janvier 2013

[17] G.N.Tiwari and Swapnl Dubey, «Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications».

[18] projet s'inscrit dans le cadre d'un programme national de recherche de développement qui vise la constitution d'une base de données dynamique (système d'information géographique) pour une gestion durable des ressources naturelles renouvelables dans un écosystème saharien.

[19] DJERIOU Salim, « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone» Thèse de Magister, Université ferhat abbas de setif 03/07/2011.

[20] BENSACI Wafa, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT», Thèse de master en génie électrique,2011 /2012.

[21] W.C. Benmoussa*, S. Amara et A. Zerga, «Etude comparative des modèles de la caractéristique courant-tension d'une cellule solaire au silicium monocristallin». Unité de Recherche des Matériaux et des Energies Renouvelables, 'U.R.M.E.R' Faculté des Sciences, Université Abou Bekr Belkaïd, B.P. 119, Tlemcen, Algérie

- [22] MEHIMMEDETSI Boudjemâa ,«Application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque» Thèse de Magister, 2007.
- [23] M.Belhadj, T.Benouaz et A.Cheknane , « Approche appliquée à l'optimisation et dimensionnement d'un système photovoltaïque : Application dans le site de Bechar (Algérie) », Université Amar Telidji de Laghouat, ALGERIE.
- [24] Mme DRDI Le Laila , «les algorithmes génétiques». Thèse de doctorat, 2005.
- [25] Thomas Vallée et Murat Yıldızolu , « Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie». Décembre 2003.
- [26] Holland, J. H. (1975), *Adaptation In Natural And Artificial Systems*, University of Michigan Press.
- [27] Goldberg, D. (1989), *Genetic Algorithm In Search, Optimization And Machine Learning*, Addison-Wesley.
- [28] Jong, K. D. (1980), 'Adaptive systeme design : A genetic approach', *IEEE Transactions on Systems, Man, andCybernetics* **10**(3), 556–574.
- [29] Pereira, R. (2000), Genetic algorithm optimisation for finance and investment, Technical report, La Trobe University.
- [30] Krishnakumar, K. & Goldberg, D. (1992), 'Control system optimization using genetic algorithm', *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* **15**(3), 735–740.
- [31] Axelrod, R. (1987), The evolution of strategies in the iterated prisoner's dilemma, in L. D. Davis, ed., 'Genetic algorithms and simulated annealing', Morgan Kaufmann.
- [32] Özyildirim, S. (1996), 'Three country trade relations: A discrete dynamic game approach', Department of Economics, Bilkent University 06533 Ankara, Turkey
- [33] Özyildirim, S. (1997), 'Computing open-loop noncooperative solution in discrete dynamic games', *Evolutionary Economics* **7**(1), 23–40.

- [34] Özyildirim, S. & Alemdar, N. (1998), Learning the optimum as nash equilibrium. Working Paper.
- [35] Thomas Vallée et Murat Yıldızolu, «Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie», 7 septembre 2001, v. 1.2
- [36] BRICHE Julien, «Adaptation d'un algorithme génétique pour la reconstruction de réseaux de régulation génétique : COGARE. ». Thèse de doctorat, l'Université du Sud Toulon-Var, 9 Septembre 2009
- [37] REYNES Christelle, « Etude des Algorithmes Génétiques et Application aux Données de Protéomique». Thèse de doctorat, L'UNIVERSITE MONTPELLIER I, 20 juin 2007.
- [38] fr.wikipedia.org/wiki/Algorithme_génétique
- [39] Université de Jijel / Institut d'Ingénieur / Département d'Electronique / Mini projet « Algorithme génétique »
nabil18000.unblog.fr/files/2007/08/algorithmesgenetiques.doc
- [40] Souquet Amédée et Radet Francois-Gérard «algorithmes génétiques».TE de fin d'année, 21/06/2004.
- [41] www.info.fundp.ac.be/.../Partie%203%20Algorithmes%20Genetiques.doc..
- [42] <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- [43] <http://ines.solaire.free.fr/solpv/page14.html>

Annexe

Valeurs des constants utilisé dans les simulations

$n_c=0.9$; $n_{bat}=0.9$; $\sigma_{bat}=0$; $P_c=30$;

$A=120$;

$K=1.3805^e-23$;

$I_{ph_ref}=3.45$;

$I_0_ref=2.86^e-6$;

$R_s=0.2421$;

$T_{ref}=298$;

$q=1.6^e-19$;

$E_{ref}=1000$;