

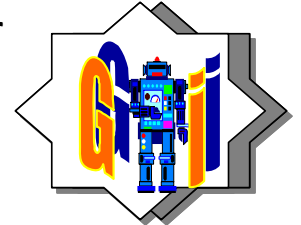
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
& de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE DE BATNA



Faculté des Sciences de l'ingénieur
Département Génie Industriel



Thèse
Doctorat en Sciences

Par :
BELLALA Djamel

Thème

**CONTRIBUTION À L'OPTIMISATION DES
SYSTÈMES DE CONVERSION
D'ÉNERGIE.
APPLICATION AUX SYSTÈMES
PHOTOVOLTAÏQUES**

Soutenue le :

devant le jury :

Qualité

Jury

Grade & Affiliation

Président :

Dr. BOUGUECHAL Nour-Eddine

Prof. U. Batna

Rapporteur :

Dr. SAIDI Lamir

M.C. U. Batna

Examineur :

Dr. BAHY Tahar

M.C. U. Annaba

Examineur :

Dr. BOUHARKAT Abdelmalik

M.C. U. Batna

Examineur :

Dr. CHAFAA Kheireddine

M.C. U. Biskra

Examineur :

Dr. BENZID Rédha

M.C. U. M'Sila

Remerciements

Je tiens, tout d'abord à remercier :

Monsieur **Lamir SAIDI**, Maître de Conférences de l'Université de Batna et Adjoint au Chef de département d'Électronique chargé de la Post Graduation, d'avoir accepté la direction scientifique de ce travail de recherche. Je lui exprime toute ma gratitude pour son expérience, son art de la multi - compétence, son soutien inconditionnel et ses qualités humaines.

Je remercie tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail :

Monsieur **BOUGUECHAL Nour-Eddine**, Professeur de l'Université de Batna et Doyen de la faculté des Sciences de l'Ingénieur, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse

Monsieur **BAHI Tahar**, Maître de Conférences de l'Université de Annaba pour la participation au jury en tant qu'examineur,

Monsieur **BOUHARKAT Abdelmalik**, Maître de Conférences de l'Université de Batna, pour la participation au jury en tant qu'examineur,

Monsieur **CHAFAA Kheireddine**, Maître de Conférences de l'Université de Biskra, pour la participation au jury en tant qu'examineur,

Monsieur **BENZID Rédha**, Maître de Conférences de l'Université de M'Sila, pour la participation au jury en tant qu'examineur,

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à tout le personnel du département Génie Industriel pour leurs compétences, leur disponibilité et leur gentillesse.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble de mes professeurs, mes collègues et plus particulièrement à Bachir ABDELHADI et Med DJARALLAH.

Merci à toute les personnes que je n'ai pas citées et qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce travail. Merci pour leur sympathie et simplement pour le plaisir que j'ai eu à les côtoyer quotidiennement.

Je voudrais remercier tout particulièrement mes parents ainsi que tous les membres de ma famille de leur soutien et leurs encouragements tout au long de mon cursus.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre 1	
CARACTERISATION DE LA TECHNOLOGIE DE L'ENERGIE RENOUVELABLE	6
1.1 Introduction	6
1.2 Génération d'énergie renouvelable	6
1.2.1 Génération de la chaleur	7
1.2.1.1 Thermo solaire	8
1.2.1.2 Géothermie	9
1.2.1.3 Biomasse	10
1.2.2 Génération d'électricité	12
1.2.2.1 Photovoltaïque	12
1.2.2.2 Hydraulique	14
1.2.2.3 Energie de la mer	15
1.2.2.4 Production éolienne	16
1.3 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie	17
1.3.1 Potentiel solaire	17
1.3.2 Potentiel éolien	18
1.3.3 Potentiel de l'énergie géothermique	19
1.3.4 Potentiel de l'hydroélectricité	19
1.3.5 Le potentiel de la biomasse	20
a) Potentiel de la forêt	20
b) Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles	20
1.3.6 Bilan des réalisations	20
a) Bilan des réalisations par wilaya	20
b) Répartition de la puissance installée par Application	22
c) Répartition de la puissance installée par ressource	22
1.4 Conclusion	23
Chapitre 2	
SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE, PRINCIPE, TECHNOLOGIE ET APPLICATIONS	24
2.1 Notion de lumière	24
2.1.1 Couleur et longueur d'onde	24
2.1.2 La photopile et la lumière	25
2.2 Rayonnement Solaire	25
2.2.1 Rayonnement solaire et atmosphère	26
2.2.2 Rayonnement global intégré	28
2.2.3 Orientation et inclinaison	29
2.3 Les Photogénérateurs	30
2.3.1 Conversion de la lumière en électricité	30

2.3.2	Structure d'un photogénérateur	32
2.3.2.1.	Photogénérateur au silicium cristallin	32
2.3.2.2	Photogénérateur au silicium amorphe	34
2.3.3	Fonctionnement d'un photogénérateur	34
2.3.4	Point de puissance maximale	35
2.3.5	Puissance crête/rendement	36
2.3.6	Couplage d'un photogénérateur avec un récepteur	36
a)	1 ^{er} cas : Charge résistive	36
b)	2 ^{ème} cas : charge d'une batterie	37
2.3.7	Schéma équivalent d'un photogénérateur	37
2.3.8	Influence de l'éclairement et de la température	39
2.3.8.1	Sous un ensoleillement fort (utilisation en extérieur)	39
2.3.8.2	Sous éclairage faible (en usage intérieur)	39
2.4	Différentes technologies	39
2.4.1	Arséniure de Gallium (GaAs)	39
2.4.2	Silicium monocristallin	40
2.4.3	Silicium poly (ou multi-) cristallin	40
2.4.4	Silicium amorphe	40
2.4.5	CuInSe ₂ (CIS)	41
2.4.6	Tellure de Cadmium (CdTe)	42
2.5	Stockage de l'énergie	42
2.5.1	Autonomie « sans apport solaire »	43
2.5.2	Principe du couplage photogénérateur batterie	43
2.5.3	Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système	44
2.5.4	Principales caractéristiques des accumulateurs	44
2.5.4.1	Tension nominale	44
2.5.4.2	Tension de charge	45
2.5.4.3	Capacité de la batterie	45
2.5.4.4	Charge de la batterie	45
2.5.4.5	Décharge de la batterie	46
2.6	Technologies d'accumulateurs et leur adéquation au solaire	46
2.6.1	Les accumulateurs au plomb « ouvert »	46
2.6.2	Les accumulateurs Plomb étanche	47
2.6.3	Les accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd)	48
2.6.4	Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH)	48
2.6.5	Les accumulateurs au Lithium	49
2.6.6	Les condensateurs et super capacités	49
2.7	Contrôle de charge	49

2.7.1 Les diodes anti-retour	49
2.7.2 Fonctions d'un régulateur de charge	50
2.8 Secteurs d'application	52
2.8.1 Produits grand public employés en intérieur	52
2.8.2 Produits grand public à usage extérieur	53
2.8.3 Habitat isolé	53
2.8.4 Raccordement au réseau	53
2.8.5 Equipements professionnels	54
2.8.6 Centrales solaires	54
2.9 Optimiser et économiser	54
2.9.1 Optimiser le temps de fonctionnement	55
2.10 Dimensionnement d'une application	55
2.10.1 Evaluer la consommation	56
2.10.2 Le stockage	56
2.10.3 Détermination de la capacité de l'accumulateur	56
2.10.4 Choix de la technologie	56
2.10.5 Contraintes	57
2.11 Evaluation de l'énergie solaire (ou lumineuse) récupérable	57
2.11.1 En intérieur	57
2.11.2 En extérieur	57
2.11.3 Les photogénérateurs et le choix de la tension de fonctionnement	57
2.12 Puissance du photogénérateur	58
2.12.1 En extérieur	58
2.12.2 En intérieur	59
2.12.3 Photopiles pour usage intérieur	59
2.12.4 Applications en courant alternatif	59
2.13 Conclusion	60

Chapitre 3

MODELISATION ET ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

3.1 Introduction	62
3.2 Modèle idéal	62
3.3 Modèle avec pertes ohmiques	64
3.4 Modèle à une diode (one diode model)	64
3.5 Modèle à deux diodes	66
3.6 Simulation et interprétation des courbes	67

3.6.1 Modèle général de l'organigramme du calcul de la caractéristique courant

$I = f(V)$ et puissance tension	67
3.6.2 Modèle idéal	68
3.6.3 Modèle avec une résistance série	69
3.6.4 Modèle avec une diode (résistance série et parallèle)	70
3.6.5 Modèle avec deux diodes	71
3.7 Comparaison des caractéristiques par modèle	72
3.7.1 Cas de l'éclairement AM1.5 (conditions STC)	72
3.7.2 Effet de la température sur le photogénérateur	73
3.7.3 Effet de la température sur la tension du circuit ouvert	76
3.7.4 Effet de la température sur le courant de court circuit	77
3.7.5 Effet de la température sur le facteur de forme	77
3.7.6 Effet de la température sur le rendement énergétique	78
3.8 Etude comparative par erreur quadratique	78
3.8.1 Erreur simple	79
3.8.2 Erreur quadratique	81
3.9 Conclusion	82

Chapitre 4

THÉORIE DE LA DECISION, MODELISATION ET OPTIMISATION	84
4.1 Introduction	84
4.2 Programmation Linéaire	85
4.2.1 Présentation	85
4.2.2 Forme Canonique	86
4.2.3 Propriétés	87
4.2.4 Solution du Problème	88
4.2.5 Forme Standard d'un Programme Linéaire	88
4.2.6 Solution de Base	89
4.2.7 Applications	89
4.2.7.1 Cas particulier des Problèmes de Transport	89
4.2.7.2 Cas particulier des Problèmes de Planification de la Production	90
4.2.8 Les Méthodes Numériques	93
4.2.8.1 Méthode du Simplex	93
4.3 Programmation dynamique	96
4.3.1 Processus de décision séquentiel (PDS)	97
4.3.2 Concept de la programmation dynamique	97
4.3.3 Un modèle de PDS déterministe	98
4.3.4 Algorithme de Bellmann-Ford	99
4.4 Conclusion	100

Chapitre 5	
OPTIMISATION DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	
	102
5.1. Introduction à l'Optimisation	102
5.1.1 Obtention de la Meilleure Solution	102
5.1.2 C'est quoi l'Optimisation?	102
5.2. Outils d'Optimisation	103
5.2.1. Solveur	104
5.2.1.1. Algorithme et Méthodes utilisés par le Solveur	104
5.2.1.2. Définition et Résolution d'un Problème à l'aide du Solveur	105
5.2.2. Les Algorithmes Génétiques	106
5.2.2.1. Mécanismes de Base des Algorithmes Génétiques (AGs)	107
a. Codage et Population Initiale	109
b. Les Opérateurs	110
b.1 Opérateur de Sélection	110
b.2 Opérateur de Croisement	111
b.3 Opérateur de Mutation	112
b.4 Autres paramètres	113
c. Le codage réel	114
d. Opérateur de croisement	115
e. Opérateur de mutation	117
5.3 Optimisation par Algorithme Génétique Continu du Point de Puissance sous Différentes Conditions Climatiques	1
5.3.1 Modélisation du Générateur Photovoltaïque	120
5.3.2. Organigramme de l'Algorithme Génétique	122
5.3.3. Résultats Analyse & Discussion	122
5.3.4. Représentation Graphique	124
5.3.5. Conclusion	127
Conclusion Générale	
	128
Bibliographie	
	130
Annexes	
	134

Introduction Générale

Suite aux prévisions de l'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie thermonucléaire (Uranium, Plutonium...), et suite aux changements climatiques dus à l'effet de serre, les chercheurs ont commencé à s'intéresser aux ressources dites " renouvelables " dont la source est le soleil, qui fournit chaque jour à la terre, par son rayonnement, l'équivalent de plusieurs milliers de fois la consommation énergétique totale de l'humanité pour ses activités d'aujourd'hui. [14][43]

L'utilisation des cellules solaires a débuté dans les années 40 et a pris son essor avec la conquête spatiale. Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais ce n'est qu'aux années soixante dix que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque (PV) et ses applications terrestres. [41][35]

Le photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, il a l'avantage d'être non polluant, souple et fiable. Il permet alors d'éviter l'installation de groupes électrogènes qui posent des problèmes de fiabilité et d'approvisionnement en carburant. [22]

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés du rayonnement et à celles des semi-conducteurs.

La cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées (en série et en parallèle) pour former un module photovoltaïque. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications de 12 V. Le courant de sortie ainsi que la puissance sont proportionnels à la surface du module. [43][35]

Un champ photovoltaïque est défini par l'interconnexion de modules entre eux (en série ou en parallèle) pour obtenir une grande puissance. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux besoins des récepteurs dit système de conditionnement. [41]

Le système photovoltaïque est l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation (charge). Ces performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques, empoussièrement, ... etc.), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements utilisés (régulateur, onduleur, batterie, ... etc.). [41] [22]

Le photovoltaïque est sur le point de célébrer ses cinquante ans. Pendant ce temps, l'industrie a connue un développement important allant des petites alimentations pour les satellites aux systèmes d'alimentations tout usage qui sont maintenant installés dans beaucoup de pays du monde. [43]

Des photogénérateurs solaires capables de produire une puissance allant jusqu'à 500 MW et plus ont été fabriqués en 2002,[39] alimentant une variété d'applications, ils s'étendent des petits produits de consommation, tels que les systèmes d'alimentation pour les habitations isolées aux équipements industriels et aux centrales électriques solaires.

L'électricité des systèmes photovoltaïques est produite avec zéro émissions, elle est modulaire et peut produire de l'énergie n'importe où la lumière existe. Les petits systèmes PV autonomes ont prouvé leur existence dans beaucoup de secteurs surtout où la connexion avec le réseau local est trop coûteuse ou impraticable. De tels systèmes, une fois couplés à une batterie de stockage, peuvent alimenter des charges telles que la radio, les systèmes de commande, les répéteurs de téléphone et les systèmes d'éclairage. Les modules PV peuvent être installés dans les bâtiments en tant qu'élément de toiture, des murs et/ou des fenêtres. [14]

Le circuit de conditionnement d'un système photovoltaïque est composé d'un convertisseur DC/DC dit MPPT (Maximum Power Point Tracker) en cascade avec un autre convertisseur DC/AC (dit onduleur), pour des applications DC/AC. Pour des applications

DC/DC, l'onduleur est absent de cette structure. Notre objectif consiste en la commande numérique (algorithme de contrôle) d'un MPPT par un microprocesseur. Dans cet MPPT (dit aussi régulateur), un circuit mesure en permanence la tension et le courant du photogénérateur afin d'en tirer de l'énergie au point de puissance maximale. Ceci permet le fonctionnement du système photovoltaïque avec le maximum d'énergie produite, quelque soient les conditions atmosphériques (température et éclairage). En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant ou en abaissant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale du photogénérateur et un deuxième circuit transforme la tension et le courant pour l'adapter au type de batterie. [41]

Suite aux changements brusques et fréquents des conditions climatiques tels que la température et l'éclairage, le point de fonctionnement (intersection de la courbe de charge avec celle du générateur photovoltaïque) change de manière conséquente, ce qui rend la poursuite du point de puissance maximale plus que nécessaire afin de minimiser les pertes en puissance du photogénérateur.

Le problème a maigrement fait l'objet d'investigations par les chercheurs et reste un champ d'actualité. Une solution simple à ce problème est présentée dans [20] dans laquelle l'auteur exploite les dérivées de l'équation de puissance du générateur pour extraire la solution optimale.

La commande du système MPPT consiste donc en l'ajustement de ce convertisseur à récupérer le maximum d'énergie produite par le photogénérateur, c'est-à-dire minimiser voire éliminer les pertes d'énergie. Le modèle de la caractéristique courant tension est non linéaire, avec des contraintes de température et l'ensoleillement qui varient d'une manière aléatoire ce qui nous confronte à un problème d'optimisation non linéaire. Dans ce sens, l'objectif de cette thèse est d'élaborer une structure de commande contrôlant le MPPT en vue d'optimiser le point de puissance maximale émanant du générateur photovoltaïque en utilisant une technique plus élaborée en l'occurrence la technique des algorithmes génétiques. En réalité, ce type de problème ne peut être résolu efficacement que par l'utilisation des techniques de résolution heuristiques dites "Swarm Intelligent Techniques", parmi lesquelles on cite les algorithmes génétiques, les algorithmes de fourmis, ... etc. Ce sont des techniques heuristiques basées sur la randomisation, largement utilisées surtout dans le domaine du management des projets.

Outre l'introduction et la conclusion générales, cette thèse comprend cinq (05) chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la caractérisation de la technologie de l'énergie renouvelable. Le principe de base de chaque type d'énergie, ses sources, son processus d'exploitation, son application, ainsi que son aspect technico-économique y sont explicités. L'investigation du potentiel algérien en énergie renouvelable ainsi que les bilans des investissements que le gouvernement a réalisé dans ce domaine par type d'énergie et par site ont également été présentés.

Le deuxième chapitre est dédié à une étude détaillée du système photovoltaïque. Sa topologie ainsi que les composants semi-conducteurs utilisés dans la fabrication des photogénérateurs sont clairement explicités. Une bonne partie de ce chapitre est également consacrée au stockage de l'énergie photovoltaïque dans des accumulateurs, d'où l'investigation des types de batteries, leur processus de charge, leur processus de décharge ainsi que leurs durées de vie.

Le troisième chapitre est consacré à une modélisation détaillée du comportement de la cellule photovoltaïque en allant du modèle idéal le plus simple au modèle à deux diodes considéré par plusieurs chercheurs de très compliqué car il prend en compte presque tous les phénomènes influençant la dynamique de la cellule. Le chapitre se termine par une étude comparative entre les modèles simulés du photogénérateur, ainsi que l'étude de l'effet de la température sur les performances de la cellule photovoltaïque.

Le quatrième chapitre traite de la théorie de décision par les techniques de la programmation linéaire et non linéaire dont le but est de chercher l'extremum (le maximum ou le minimum) d'une fonction dite objective. Dans notre cas il s'agit du modèle "à une diode" de la cellule photovoltaïque avec un ensemble d'équations et/ou d'inéquations linéaires ou non qui constituent les contraintes sur le système. Le but de ce chapitre est de se familiariser avec les techniques de la recherche du meilleur point de fonctionnement d'où optimisation.

Le cinquième chapitre est consacré à l'optimisation du point de puissance maximale MPP (pour Maximum Power Point) sous différentes conditions climatiques en

utilisant la technique des algorithmes génétiques, qui est une technique basée sur la randomisation. C'est une technique qui trouve un vaste champ d'applications notamment dans le domaine du management et récemment dans le domaine de l'engineering.

Cette thèse est parachevée par une conclusion générale dans laquelle sont valorisés les différents développements effectués. Des perspectives pour ce modeste travail sont également exposées.

CARACTERISATION DE LA TECHNOLOGIE DE L'ENERGIE RENOUVELABLE

1.1 Introduction

Les énergies, vaste sujet ! Aussi vaste que l'univers connu, où se déchaîne l'énergie de milliards de galaxies en mouvement, contenant chacune des milliards d'étoiles rayonnantes de lumière et de chaleur. Parmi ces multitudes d'étoiles, notre soleil qui, de ses rayons généreux, maintient la vie de la plupart des organismes terrestres. Et parmi ces organismes, l'homme à qui, depuis bien longtemps, l'énergie de ses seuls muscles ne suffit plus.

L'humanité a bâti une civilisation industrielle avancée et, pour la construire et la faire fonctionner, a successivement maîtrisée les énergies offertes par la nature : le vent, les chutes d'eau, la combustion du bois et, plus récemment, des formes d'énergies plus difficilement accessibles ou cachées comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel, la fission nucléaire...

Aujourd'hui, l'homme arrive à un tournant de son histoire. Les formes d'énergies les plus utilisées vont se raréfier dans les prochaines décennies, car elles ne se reconstitueront qu'après des millions d'années. Il n'y a pas de solution miracle : plusieurs pistes existent, des économies d'énergie jusqu'aux énergies du futur encore à l'état de recherches, en passant par le développement des énergies renouvelables : à chacun de participer à sa manière à la résolution de ce formidable défi [15].

1.2 Génération d'énergie renouvelable [4]

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est liée au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé «sans gros problèmes» vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de «l'extraction» de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les

mers. Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques.

La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les jours d'ensoleillement sont plus courts. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne.

1.2.1 Génération de la chaleur

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables.

1.2.1.1 Thermo solaire

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermiques. Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage (Figure 1.1). La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [15]. Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couvertes de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines).

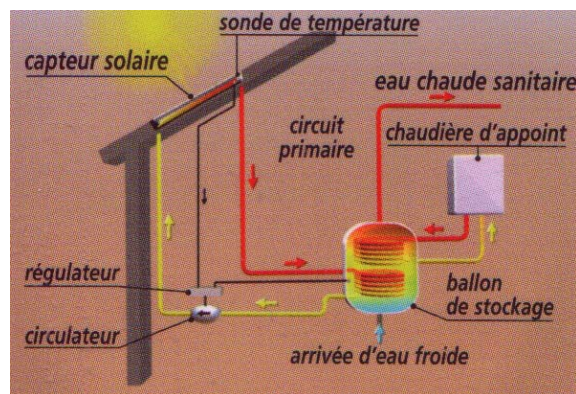


Fig.1.1. Principe du Capteur Solaire

Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement. La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé.

Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent.

1.2.1.2 Géothermie

La température du sous-sol s'élève avec la profondeur. C'est ce qu'on appelle le « gradient géothermique ». En moyenne, on gagne 3 °C de plus tous les 100 m. Ainsi, la température de l'eau située dans une roche-réservoir à 1500 m de profondeur peut atteindre 60 à 70 °C [15]. Le principe de la géothermie consiste à pomper ces eaux chaudes afin de les utiliser pour le chauffage ou, si elles sont suffisamment chaudes, pour produire de l'électricité. L'énergie géothermique est une énergie renouvelable, à condition de gérer l'extraction de l'eau prudemment, car elle se réchauffe très lentement dans le sous-sol. Un complexe géothermique comporte deux forages, l'un d'où l'on extrait l'eau chaude et l'autre où on la réinjecte après récupération de la chaleur (Figure 1.2).

Quand la température de l'eau est comprise entre 30 et 100 °C, on parle de géothermie basse énergie. La profondeur des réservoirs est comprise entre 1000 et 2500 m. L'eau est utilisée pour le chauffage, mais il y a souvent des problèmes de corrosion.

Pour une température comprise entre 100 et 180 °C, on parle de géothermie moyenne énergie. Ces eaux proviennent des réservoirs à grande profondeur (2500 à 4000 m) ou bien moins profonds mais dans des régions volcaniques où le gradient géothermique est très fort. On les utilise pour produire de l'électricité. Quand la température de l'eau est comprise entre 180 et 300 °C, on parle alors de géothermie haute énergie. L'eau est utilisée sous forme de vapeur pour produire de l'électricité. On rencontre de telles températures dans les régions volcaniques (Islande, Philippines, Nouvelle-Zélande... sont des pays qui utilisent abondamment la géothermie haute énergie pour leur production électrique). [15]

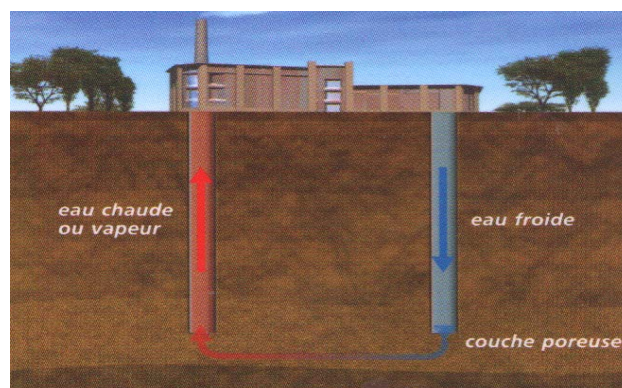


Fig.1.2. Principe de la géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croît depuis la surface vers le centre de la terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins

forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la terre dont les températures varient de 1000 °C à 4300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [17].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement :

- la haute (>180°C),
- moyenne (>100°C),
- basse (>30°C) et très basse énergie.

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages: chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... etc. La géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [42].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

1.2.1.3 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse.

Différents types sont à considérer : le bois- énergie, les biocarburants, le biogaz.

Le bois-énergie est une ressource très abondante (Figure 1.3). C'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois: les chutes ou déchets de production des

industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes, ... etc.). L'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15 MW [15].



Fig.1.3. Le bois source de l'énergie verte

Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. La principale motivation qui pousse à la production du biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représente une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré. Il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution. Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. De nos jours, la filière carburant ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. 80% provenait des décharges d'ordure ménagères [16]. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : une croissance de cette technologie est donc à prévoir.

1.2.2 Génération d'électricité

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

1.2.2.1 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. 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).

L'architecture solaire passive consiste à construire des bâtiments en fonction des effets bénéfiques du soleil. Les systèmes actifs de captation de la chaleur solaire sont des capteurs non vitrés (de gros tubes noirs utilisés pour le chauffage des piscines) ou vitrés (caissons où la chaleur s'accumule avant d'être transportée par de l'air ou de l'eau), qu'on utilise pour l'eau chaude ou le chauffage des bâtiments. Les plus performants de ces capteurs sont ceux qui fonctionnent sous vides : ils permettent d'atteindre de hautes températures et sont adaptés aux applications industrielles [15].

Les capteurs photovoltaïques sont des panneaux dans lesquels sont intégrées de nombreuses cellules appelées photopiles, où les photons lumineux produisent de l'électricité en percutant les atomes de silicium. Suivant l'affinement du silicium, le rendement varie de 5 à 16 %. Les cellules à meilleur rendement sont plus coûteuses. L'électricité photovoltaïque est chère, c'est pourquoi elle est subventionnée (en France, et aux états unis obligation de rachat par l'état à un tarif élevé, indication fiscale).

Les centrales solaires permettent de concentrer les rayons solaires pour obtenir des températures très élevées (500 à 800 °C suivant le type de centrale) dont on se sert pour produire de l'électricité. Elles occupent beaucoup d'espace et doivent être construites dans les régions très ensoleillées et où l'air est pur [15].

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT). Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne. Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises maritimes, ... etc.).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance. La Figure 1.4 montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle (la production est équivalente à la puissance installée).

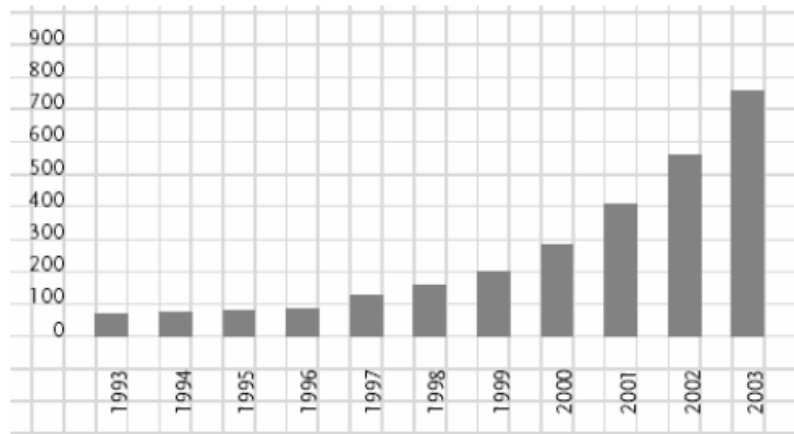


Fig. 1.4. Évolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en MW [12]

1.2.2.2 Hydraulique

L'expression, « l'énergie est le mouvement » s'applique aux précipitations. L'eau des océans, évaporée par le soleil et transportée jusqu'à la source des cours d'eau sous forme de pluie, acquiert une énergie potentielle, qu'elle dissipe peu à peu en retournant à la mer. C'est de l'énergie potentielle contenue dans une chute d'eau que profite une centrale hydroélectrique, pour la transformer en électricité. L'énergie d'une chute d'eau est proportionnelle à sa hauteur et à son débit. Une centrale hydroélectrique (figure 1.5) comporte en général trois éléments : un barrage pour créer une chute d'eau importante, un canal de dérivation (conduite, galerie souterraine, ou canal à ciel ouvert) qui prélève l'eau nécessaire au fonctionnement de la centrale et l'usine où la chute d'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur d'électricité. Outre produire de l'électricité, un barrage permet aussi de réguler le cours d'eau et d'offrir un réservoir d'eau pour l'irrigation ou, parfois même, pour les sports nautiques. La sécurité d'un barrage doit être maximale : il doit résister aux crues du cours d'eau, aux séismes, aux infiltrations. Son impact écologique sur la vie aquatique en amont et en aval doit être étudié et limité autant que possible. L'hydroélectricité est une énergie renouvelable et non polluante. Au niveau mondial, on pense que le potentiel restant est cinq fois supérieur au potentiel exploité, mais avec de grandes disparités géographiques : ainsi, l'Europe et l'Amérique du Nord ont exploité plus de la moitié de leur potentiel (et une grande partie pour la France). Le frein principal au développement de l'hydroélectricité est le coût financier, écologique et humain (personnes déplacées des zones inondées) des grands barrages [15].

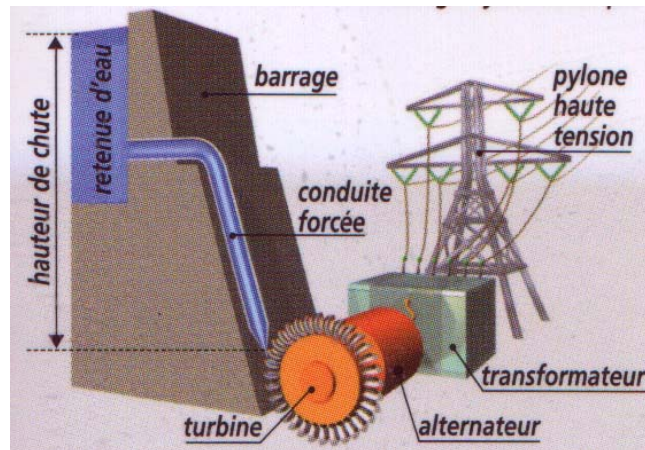


Fig. 1.5. Principe de fonctionnement d'un barrage hydroélectrique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable». Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique [13]. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage.

1.2.2.3 Energie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique [44].

Une autre façon de la récupérer de l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle de Annapolis au Canada. L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette

énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées.

1.2.2.4 Production éolienne

Les grandes éoliennes commencent à devenir habituelles dans les paysages des régions où le vent souffle souvent (Figure 1.6). Et elles le deviendront sans doute de plus en plus, car l'électricité éolienne est particulièrement propre : pas de gaz à effet de serre, entièrement renouvelable. Leurs seuls inconvénients sont la transformation des paysages et un bruit léger qui empêche de pouvoir les construire trop près des habitations. Les éoliennes sont des machines très hautes (le mât mesure de 80 à 100 m pour les plus puissantes), parce que le vent est plus régulier et plus fort à quelques dizaines de mètres d'altitude qu'en surface. L'hélice, en général munie de trois pales, est généralement de grandes dimensions (jusqu'à 110 m de diamètre), parce que la puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par les pales. La nacelle, située à l'arrière de l'hélice et du nez de l'éolienne, abrite les équipements qui produisent de l'électricité. Les éoliennes ont besoin d'une vitesse minimale du vent de 10 à 15 km/h pour pouvoir fonctionner. Au delà de 90 km/h, elles sont arrêtées pour ne pas subir trop d'efforts qui les useraient prématurément.

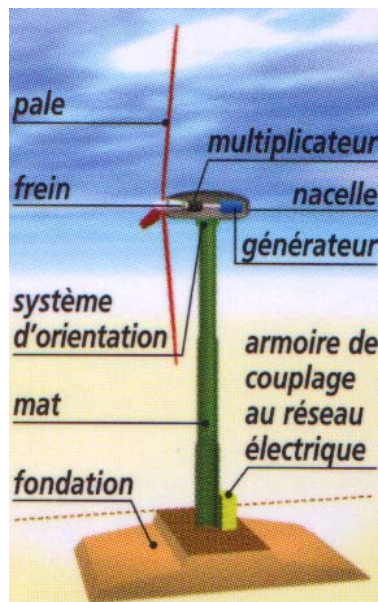


Fig.1.6. Principe d'une éolienne

Aujourd'hui, l'électricité éolienne est plus chère que celle produite par des centrales thermiques à charbon ou nucléaires. Elle doit donc être subventionnée. Mais cela pourrait rapidement changer dans les années à venir. Certains pays ont choisi

d'encourager fortement la filière éolienne, comme le Danemark, où près du quart de l'électricité produite provient du parc éolien. A l'avenir, ces espaces couverts de dizaines d'éoliennes (on les appelle des « fermes éoliennes ») devraient se multiplier, sur des sites à terre et sans doute aussi en mer (îles artificielles). [15]

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27000 MW pour 40000MW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70000 MW [32].

1.3 Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie [3]

1.3.1 Potentiel solaire

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays[3]

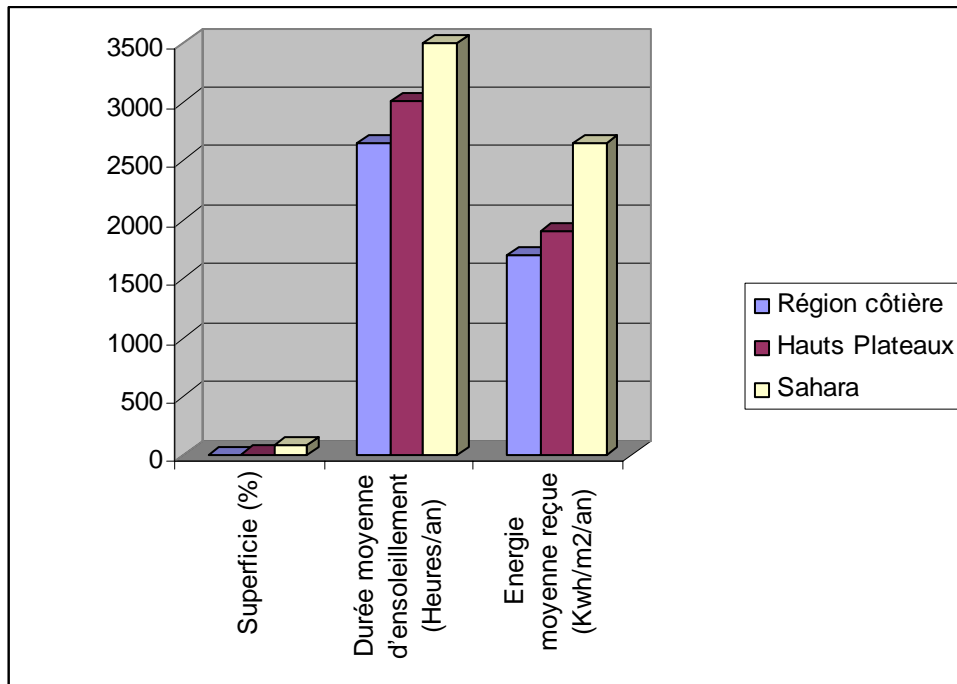


Fig.1.7.Potentiel solaire en Algérie

1.3.2 Potentiel éolien [3]

L'Algérie a un régime de vent modéré (2 à 6 m/s). Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux (Figure 1.8).

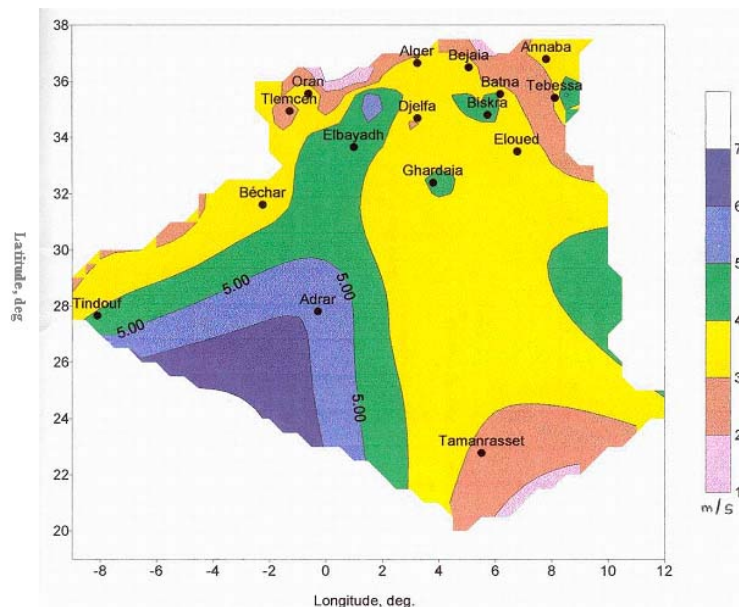


Fig.1.8. Carte des vents en Algérie

1.3.3 Potentiel de l'énergie géothermique [3]

La compilation des données géologiques, géochimiques et géophysique a permis de tracer une carte géothermique préliminaire (Figure 1.9). Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays. Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra.

Des études sur le gradient thermique ont permis d'identifier trois zones dont le gradient dépasse les 5°C/100m

- Zone de Relizane et Mascara
- Zone de Aïne Boucif et Sidi Aïssa
- Zone de Guelma et Djebel El Onk

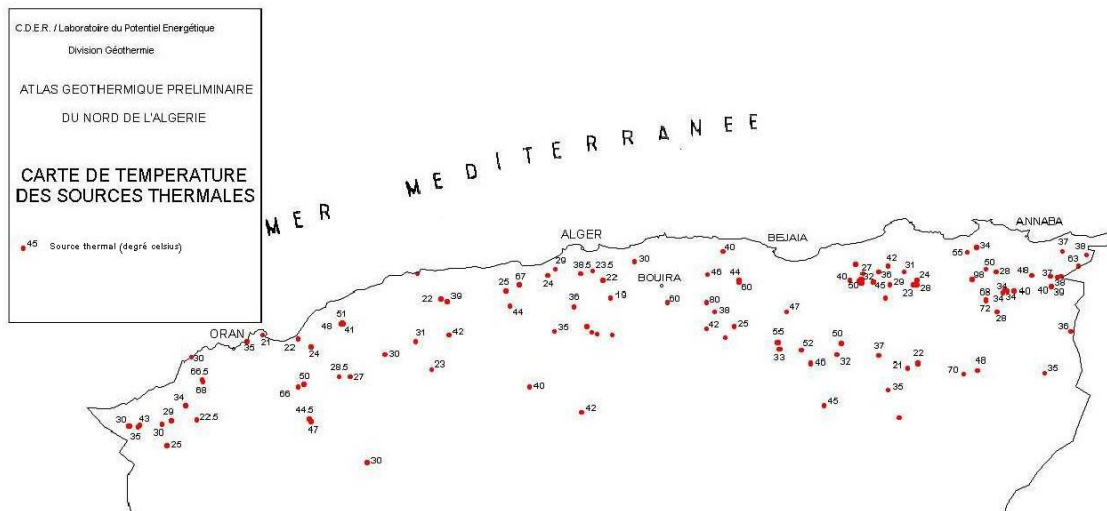


Fig.1.9. Carte Géothermique préliminaire

1.3.4 Potentiel de l'hydroélectricité [3]

Les quantités globales tombant sur le territoire algérien sont importantes et estimées à 65 milliards de m³, mais finalement profitent peu au pays : nombre réduit de jours de précipitation, concentration sur des espaces limités, forte évaporation, évacuation rapide vers la mer.

Schématiquement, les ressources de surface décroissent du nord au sud. On évalue actuellement les ressources utiles et renouvelables de l'ordre de 25 milliards de m³, dont environ 2/3 pour les ressources en surface.

Cent trois sites de barrages ont été recensés. Plus de 50 barrages sont actuellement en exploitation. La puissance totale installée s'élève à plus que 269.208 MW.

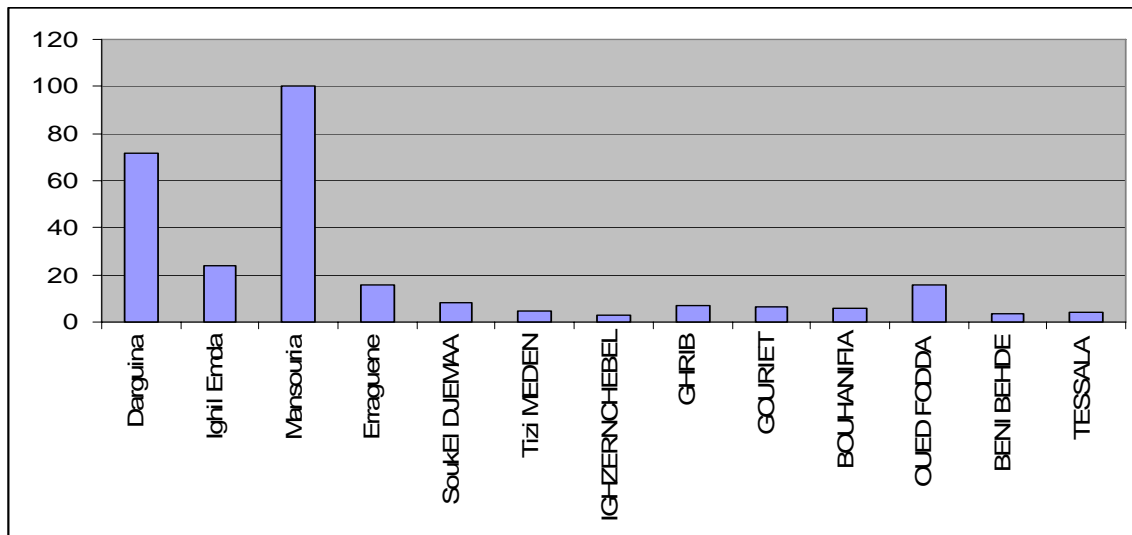


Fig.1.10. Puissance installée en MW

1.3.5 Le potentiel de la biomasse

a) Potentiel de la forêt

Le potentiel actuel est évalué à environ 37 Millions de TEP (Tonnes équivalent pétrole). Le potentiel récupérable est de l'ordre 3,7 Millions de TEP. Le taux de récupération actuel est de l'ordre de 10%.

b) Potentiel énergétique des déchets urbains et agricoles [3]

Cinq millions de tonnes de déchets urbains et agricoles ne sont pas recyclés. Ce potentiel représente un gisement de l'ordre de 1.33 millions de TEP/an.

1.3.6 Bilan des réalisations

a) Bilan des réalisations par wilaya

L'organisme responsable de la prospection, la recherche et l'implantation de nouvelles ressources énergétiques notamment celles de l'énergie renouvelable c'est bien le ministère de l'énergie et des mines et plus précisément la direction des énergies nouvelles et renouvelables.

L'ensemble des réalisations (Solaire – Eolien) est réparti sur le territoire national selon les deux courbes suivantes. La puissance totale installée dans toutes les wilayas s'élève à: 2 353 260 Watts [3]

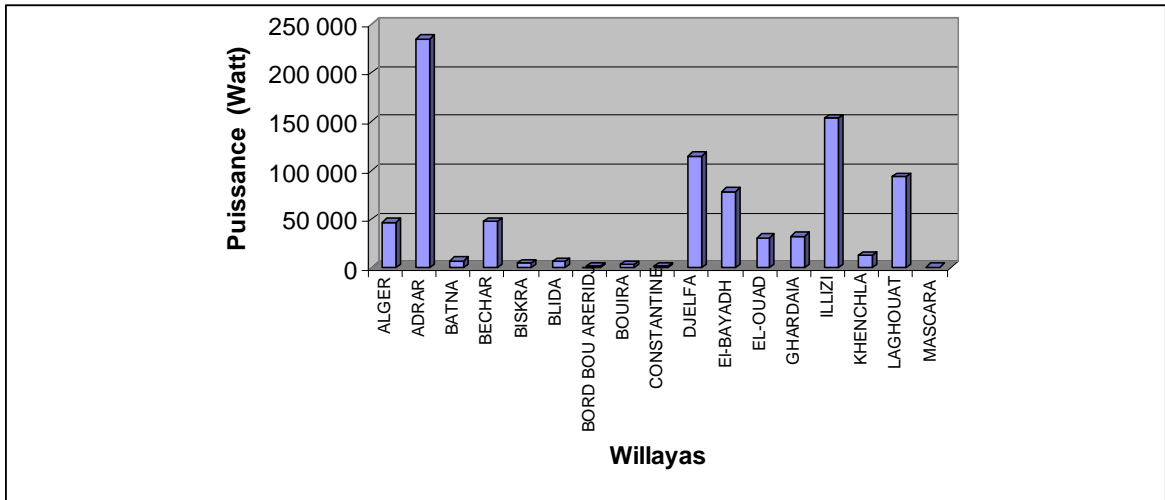


Fig.1.11. Bilan des réalisations par wilaya

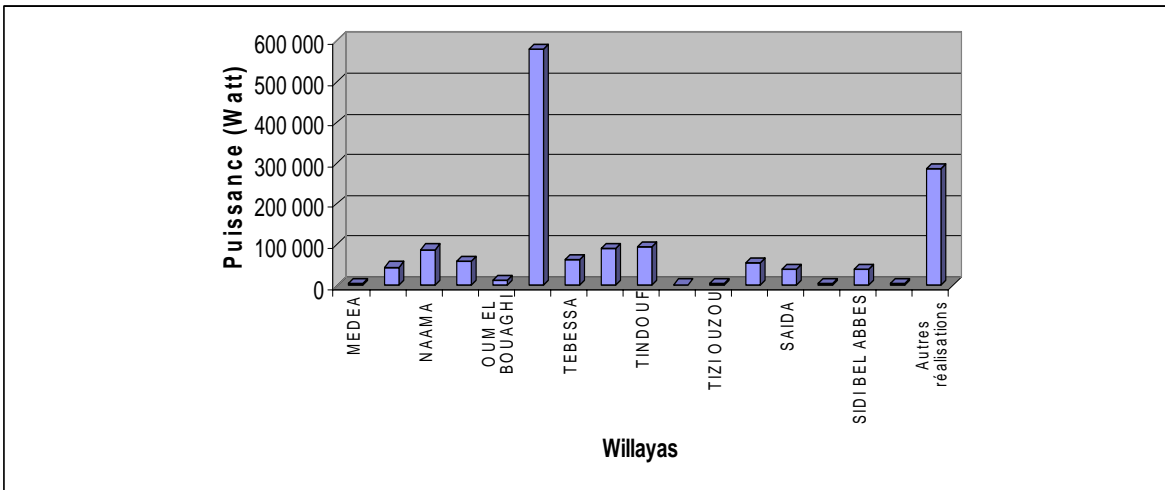


Fig.1.12. Bilan des réalisations par wilaya

b) Répartition de la puissance installée par Application [3]

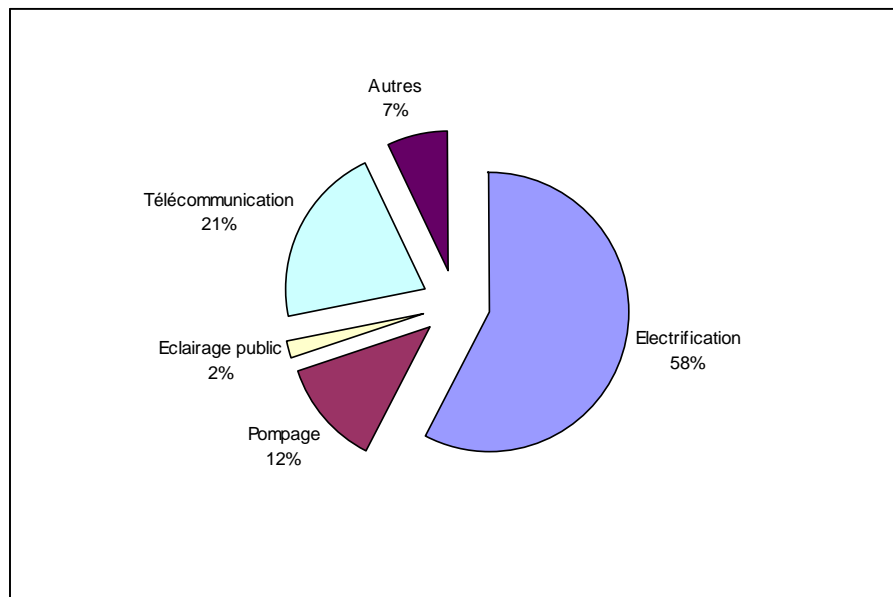


Fig.1.13. Puissance Installée par application

c) Répartition de la puissance installée par ressource [3]

Les ressources d'énergie renouvelables qui ont connu un investissement en Algérie sont l'énergie solaire notamment l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne.

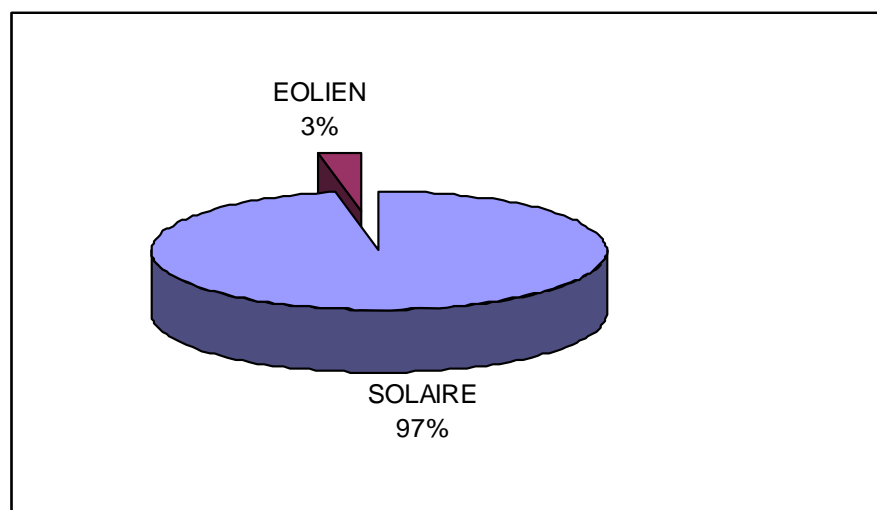


Fig.1.14. Puissance Installée par application

1.4 Conclusion

Les ressources d'origine renouvelable représentent un potentiel largement suffisant pour satisfaire nos besoins, notamment en énergie électrique. De plus, les solutions de conversion sont très nombreuses et il existe beaucoup de techniques à exploiter. La compétitivité des filières nouvelles s'améliore au fur et à mesure de l'expérience acquise et de l'augmentation de la production cumulée notamment en énergie éolienne, photovoltaïque, et biomasse.

Le respect de l'environnement et notre sécurité d'approvisionnement en énergie doivent se concorder. Cette concordance devient de plus en plus nécessaire surtout lorsque l'effet de serre engendré par la consommation de l'énergie fossile sera éliminé par l'utilisation des ressources renouvelables qui à leurs tours reste très onéreuses en comparaison avec l'énergie fossile. La sécurité d'approvisionnement nécessite la mise en place des systèmes de stockage d'énergie qui peuvent assurer la stabilité de ces réseaux. Ces systèmes de stockage existent déjà de façon centralisée avec les centrales hydrauliques de pompage et avec les grands barrages, mais ils ne seront pas suffisants et devront faire l'objet de nouveaux investissements. Les accumulateurs constituent aussi un moyen de stockage électrique, mais la question qui se pose : où disposer ces accumulateurs : au niveau de la production, du transport ou du consommateur? Il est probable que la meilleure solution soit la dernière car c'est le consommateur qui a les plus grandes amplitudes de fluctuation. En outre cela lui conférerait une possibilité d'autonomie en cas de coupure accidentelle du réseau et une excellente sûreté générale de fonctionnement si les mêmes consommateurs disposent de systèmes de production autonomes. Notons enfin que les hybridations de ressources sont souvent intéressantes sur le plan économique et qu'elles contribuent à faciliter les transitions vers les solutions alternatives. Elles sont d'ailleurs déjà fréquemment utilisées : gaz et déchets dans les usines d'incinération, gaz et soleil dans les centrales thermodynamiques...

Enfin la cogénération électricité, chaleur, froid est souvent particulièrement avantageuse du point de vue du bilan global, mais elle doit être pensée dès la conception.

SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE, PRINCIPE, TECHNOLOGIE ET APPLICATIONS

2.1 Notion de lumière [2][1][19]

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. La lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, tels que les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde.

2.1.1 Couleur et longueur d'onde

La longueur d'onde d'un faisceau lumineux caractérise sa couleur, telle que la perçoit notre œil. Bien sur, tous les rayonnements ne sont pas perceptibles par l'œil, mais ils ont aussi leur longueur d'onde, qui dépend de leur fréquence : fréquences radio, micro-ondes...

Puisque la photopile a pour vocation de fournir de l'électricité dans le monde où nous vivons, elle est conçue pour convertir les longueurs d'onde disponibles dans notre environnement. Si nous regardons de quoi se compose le rayonnement du soleil parvenant à la surface de la terre on trouve l'infrarouge qui procure de la chaleur, le visible qui est nécessaire à la croissance des plantes et des animaux, et l'ultraviolet qui brunit la peau et tue les bactéries. Le spectre du soleil s'étend de 200 nm à 3 μm .

Les physiciens du siècle dernier ont nommés «ultraviolette» la lumière plus bleue que le bleu violet perceptible par l'œil, et «infrarouge» la lumière moins rouge que celle que notre œil détecte. En effet, la perception oculaire moyenne de l'homme s'étend du bleu de longueur d'onde 380 nm au rouge de longueur d'onde 780 nm, en passant par les couleurs que l'arc-en-ciel nous dévoile lorsque les gouttes de pluie décomposent la lumière blanche. On appelle spectre ou répartition spectacle, d'une source de lumière, l'ensemble des couleurs ou longueurs d'onde qui la constituent.

2.1.2 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 2.1). 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.

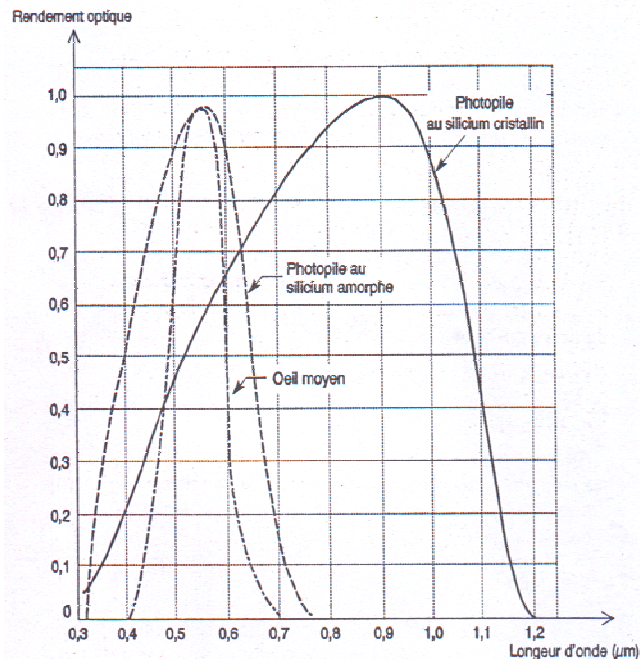


Fig. 2.1. Réponse spectrale de photopiles

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.

2.2 Rayonnement Solaire

C'est une énergie naturelle par excellence, le soleil, cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5500 °C, nous dispense chaleur et lumière. Centre de notre système planétaire, sa place est si grande dans l'activité terrestre sous toutes ses formes qu'il fut bien souvent objet d'adoration.

2.2.1 Rayonnement solaire et atmosphère

La distance de la terre au soleil est d'environ 150 millions de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/s ; les rayons du soleil mettent donc environ 8 minutes à nous parvenir.

La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360 W/m^2 , bien qu'elle varie de quelques pourcents dans l'année à cause des légères variations de la distance terre soleil.

Le watt par m^2 (W/m^2) est l'unité la plus utilisée pour quantifier le rayonnement solaire. C'est un flux, une puissance par unité de surface. 1 W/m^2 est aussi égal à 1 Joule par seconde et par m^2 puisque $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$. Ici l'énergie est électromagnétique, mais les unités sont les mêmes que pour une énergie électrique.

Lors de la traversée de l'atmosphère, ce rayonnement de 1360 W/m^2 subit des déperditions, du fait de son absorption partielle par les gaz atmosphériques et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux reçu sur la terre est inférieur au flux «initial» et dépend de l'angle d'incidence, et donc de l'épaisseur de l'atmosphère traversée.

En effet, si l'on fait face au soleil, on le voit à une certaine hauteur, qu'on appelle hauteur apparente. C'est l'angle h entre le plan horizontal situé sous nos pieds et une droite pointée vers le soleil.

On voit bien sur la figure 2.2 que cet angle h détermine la distance parcourue par le soleil à travers l'atmosphère et donc les pertes engendrées.

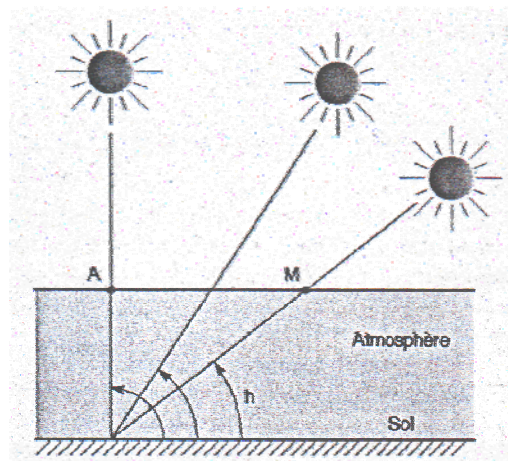


Fig.2.2. Air Mass

On appelle m (masse atmosphérique), ou Air Mass, cette distance calculée en multiples de la distance parcourue si le soleil était à la verticale du lieu.

Sur notre figure, $m = 1$ si le soleil entre dans l'atmosphère au point A, et $m = 2$ s'il y entre en M, donc:

$$m = \frac{1}{\sin(h)} \quad (2.1)$$

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires, sont caractérisées par un rayonnement instantané de 1000 W/m^2 , un spectre solaire AM 1,5 et $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de température ambiante. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions). La figure 2.3 montre ce spectre AM 1,5 normalisé : les «trous» que l'on observe correspondent aux absorptions par les gaz de l'atmosphère.

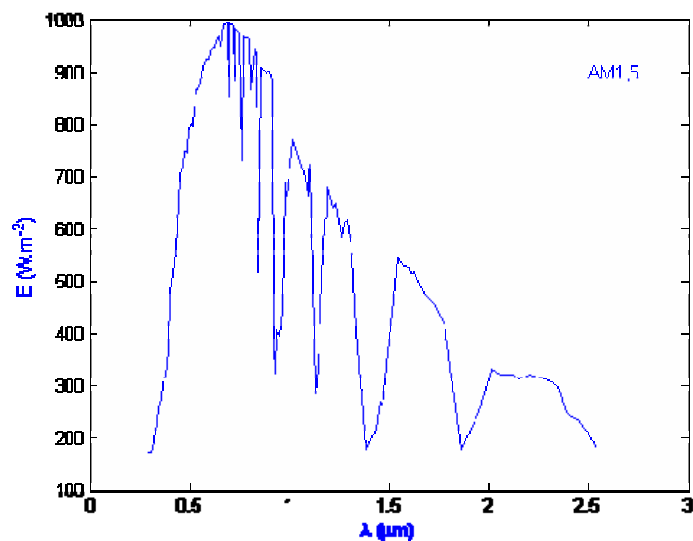


Fig.2.3. Spectre solaire

Cela correspond à un ensoleillement assez fort, soleil au Zénith (au plus haut de sa course), ciel parfaitement dégagé, ce qui n'est pas réellement représentatif à cause des variations instantanées des conditions climatiques.

Notons aussi la différence entre le rayonnement direct, les rayons du soleil qui nous parviennent en ligne droite, et le rayonnement diffus, les rayons qui subissent de multiples réflexions et nous parviennent alors de toutes les directions à travers les nuages. Le rayonnement solaire est entièrement diffus lorsqu'on ne peut plus voir où se trouve le soleil. Quant au rayonnement global, c'est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.

Pratiquement, et à un instant t quelconque, le soleil dispense typiquement sur la terre un rayonnement global de:

- 1000 W/m^2 avec un soleil au zénith et un ciel parfaitement dégagé,
- $100\text{-}500 \text{ W/m}^2$ sous un ciel nuageux,

- moins de 50 W/m^2 sous un ciel vraiment couvert.

Le lieu géographique, l'orientation, la saison, l'heure de la journée, ...etc. influent directement sur le rayonnement instantané. C'est ce qui dérouté bien souvent les utilisateurs pour définir leurs systèmes solaires. L'énergie délivrée par un panneau solaire est hautement variable!

L'éclairement instantané n'est donc pas très utile, on se servira plutôt de valeurs globales intégrées sur une journée pour quantifier l'énergie récupérable.

2.2.2 Rayonnement global intégré

Il faut bien distinguer le rayonnement instantané (W/m^2), appelé aussi éclairement, qui est un flux lumineux reçu à un moment donné, et l'énergie globale pendant une durée donnée (Wh/m^2 ou kWh/m^2), qui est l'énergie totale disponible pendant un certain temps. En général, cette période de base est de 24 h : on parle alors de $\text{Wh/m}^2\text{-jour}$ (watts heure par m^2 et par jour). On obtient cette énergie globale en multipliant le rayonnement instantané par le temps. Pour un rayonnement variable, c'est l'intégrale du rayonnement sur le temps considéré (figure 2.4).

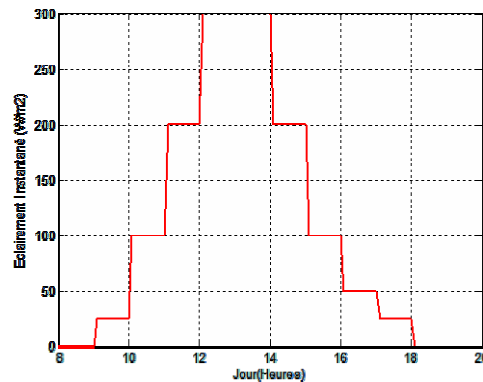


Fig.2.4. Courbe d'une journée d'ensoleillement

Les détails des rayonnements globaux intégrés réels sont connus, dans la pratique, grâce aux statistiques fournies par les stations météorologiques.

Pour tout calcul d'une application en extérieur, on utilisera la valeur moyenne du rayonnement global reçu pendant une journée (en $\text{Wh/m}^2\text{-jour}$), et cela en fonction:

- du lieu géographique,
- du mois de l'année,
- de l'orientation (sud, sud-est, nord...),
- de l'inclinaison (angle du panneau: vertical, horizontal).

2.2.3 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 2.5). 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.

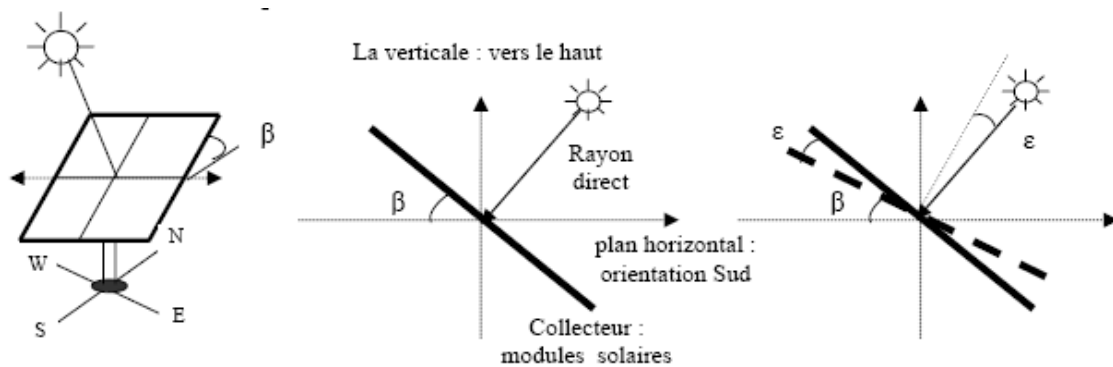


Fig.2.5. Inclinaison et orientation d'un panneau solaire

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.

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

$$\text{Inclinaison optimale pour une utilisation annuelle} = \text{Latitude du lieu} + 10^\circ \quad 2.2)$$

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.

2.3 Les Photogénérateurs [2][1][6]

La fonction d'une photopile ou d'une cellule solaire consiste à convertir l'énergie lumineuse en électricité. Tous les photogénérateurs sont donc des transformateurs d'énergie qui, lorsqu'ils sont exposés à la lumière, produisent de l'énergie électrique.

2.3.1 Conversion de la lumière en électricité

La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs, mais pour comprendre le principe de cette conversion les notions de la photoconductivité d'un semi-conducteur sont nécessaires.

Rappelons tout d'abord les deux points suivants:

- Toute matière est faite d'atomes comportant des électrons (charges négatives élémentaires) qui gravitent autour d'un noyau.
- Un courant électrique est une circulation d'électrons.

Dans un isolant électrique, les électrons de la matière sont liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer.

Dans un conducteur électrique, les électrons sont totalement libres de circuler et permettent le passage d'un courant. Par contre dans un semi-conducteur, la situation est intermédiaire : les électrons contenus dans la matière ne peuvent circuler que si on leur apporte une énergie pour les libérer de leurs atomes. Quand la lumière pénètre dans un semi-conducteur, ses photons apportent une énergie permettant aux électrons de se libérer et de se déplacer dans la matière, il y a donc courant électrique sous exposition à la lumière.

Le semi-conducteur le plus utilisé est disponible en quantité incalculable à la surface de la terre, puisque présent dans le sable sous forme de silice et de silicates : il s'agit du silicium (Si). C'est ce silicium qui compose les circuits intégrés, à l'origine de l'expansion considérable de l'électronique moderne.

Un photogénérateur est donc physiquement une tranche de silicium que l'on prend en sandwich entre deux électrodes métalliques (+) et (-) pour collecter le courant produit.

Mais pour «attirer» ces électrons vers les électrodes, il faut une force interne dite différence de potentiel entre les bornes du photogénérateur qui permet la circulation du courant. Et c'est le «dopage» des parties avant et arrière de la «tranche» de silicium qui va permettre l'apparition de cette différence de potentiel :

- dopage de type p sur une face, par adjonction d'atomes de bore (B), contenant moins d'électrons périphériques par atome que le silicium,
- dopage de type n sur l'autre face, par adjonction d'atomes de phosphore (P), contenant plus d'électrons périphériques par atome que le silicium.

On obtient ainsi une «jonction» possédant un champ électrique interne pour entraîner vers le circuit extérieur les charges électriques libérées sous illumination.

D'un point de vue électronique, un photogénérateur est donc une jonction p-n ou p-i-n (parfois, on ajoute une couche intrinsèque, c'est à dire non dopée entre la couche p et la couche n) réalisée dans un semi-conducteur absorbant dans le spectre visible.

2.3.2 Structure d'un photogénérateur

2.3.2.1. Photogénérateur au silicium cristallin

Le silicium peut être à l'état massif, il est dit dans ce cas cristallin, du fait de sa structure ordonnée. Il est produit sous forme de barreaux purifiés, de section ronde ou carrée, qui sont ensuite découpés en plaquettes très minces (figure 2.6).

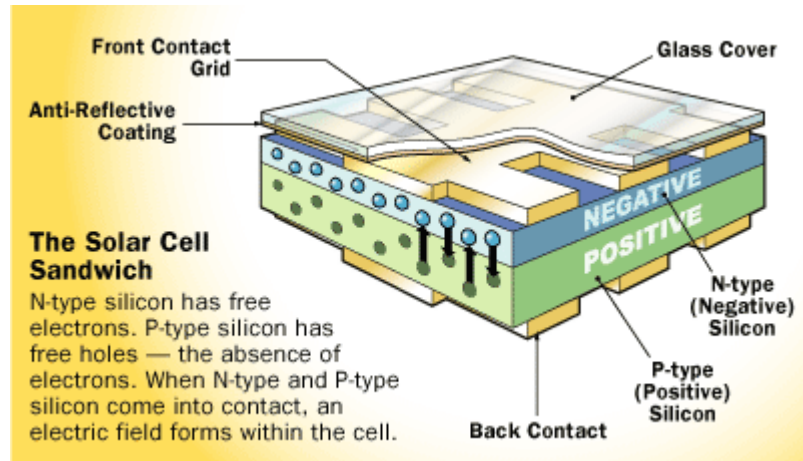


Fig.2.6. schéma d'une photopile au silicium cristallin

Selon la technologie employée, ce silicium cristallin peut être :

- monocristallin : les photopiles sont formées d'un seul cristal ordonné. Ce matériau est fabriqué en barreaux étirés à partir d'un germe, ou recristallisés à haute température.
- poly (ou multi) cristallin : il est constitué de cristaux assemblés, appelés «grains». Ce matériau, moins onéreux, est élaboré dans de grands creusets industriels par fonte et refroidissement de blocs de silicium purifié.

Dans les deux cas, le silicium est ensuite découpé en tranches par des scies à fil. Sur ces plaquettes (wafers), on réalise alors l'incorporation des dopants par des techniques de diffusion ou d'implantation sous vide. Puis, le silicium est couvert d'une couche anti-reflet en face avant, qui réduit à moins de 5 % les pertes par réflexion de la lumière incidente, et qui lui donne une couleur bleutée, caractéristique des photogénérateurs au silicium cristallin.

Le dessus et le dessous de la plaquette doivent ensuite être couverts de contacts métalliques pour collecter l'électricité générée. Pour laisser passer la lumière, l'électrode avant est déposée sous forme de grille, l'arrière étant simplement recouvert d'une couche métallique continue (figure 2.7).

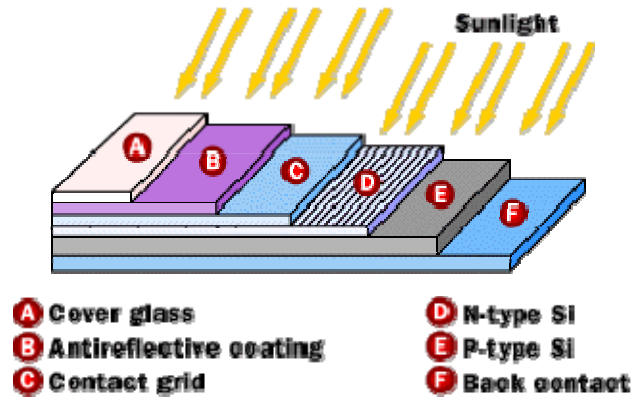


Fig.2.7. structure de base d'une cellule photovoltaïque de silicium

Cependant, sa faible tension de fonctionnement (autour de 0,6 V sous 1000 W/m^2) la rend peu utilisable dans la pratique, et il convient d'en monter plusieurs en série pour augmenter cette tension (montages série et parallèle).

On place alors les photopiles élémentaires entre deux supports (généralement en verre) après les avoir reliées entre elles en série par des fils conducteurs extra plats.

A l'aide d'une résine d'assemblage pour joindre les deux supports (faite à base d'éthyle vinyle acétate) au cours d'une opération dite encapsulation, essentielle pour la protection contre les intempéries, on constitue ainsi un panneau solaire avec sortie par câble ou boîte à bornes, prêt à l'emploi.

On remarquera que la photopile en silicium cristallin est assez fragile et nécessite systématiquement une encapsulation, au moins pour le renfort mécanique. Cela va de pair avec son usage exclusivement en milieu extérieur, qui s'explique par ses bonnes performances au soleil.

Il n'en est pas de même pour le silicium amorphe, qui est employé en extérieur et en intérieur (donc en éclairage naturel et artificiel) avec divers degrés de protection.

2.3.2.2 Photogénérateur au silicium amorphe

Le silicium amorphe a une structure atomique désordonnée, c'est-à-dire non cristallisée, ou vitreuse. Cependant, il possède un coefficient d'absorption de la lumière

environ mille fois supérieur à celui du silicium cristallin. Une fine couche de 0,3 μm est donc suffisante pour absorber l'essentiel du spectre visible.

Dans cette technologie, le silicium est produit directement sur une plaque de verre, à partir du gaz silane SiH_4 . Les plaques de verre sont placées dans une enceinte chauffée où l'on fait le vide. Puis du silane est injecté et décomposé par une décharge radiofréquence. Le silicium libéré se dépose alors sur les plaques. La présence d'hydrogène (H) est également nécessaire pour la qualité du matériau car il limite le nombre de défauts, en saturant les liaisons pendantes de silicium présentes à cause de la structure désordonnée.

L'adjonction des dopants pour réaliser les couches p et n est réalisée par ajout de gaz PH_3 (phosphine) ou B_2H_6 (diborane) au silane. En pratique, le verre comporte, sur la face où l'on dépose le silicium, une couche mince transparente et conductrice faite d'oxyde d'étain (SnO_2) servant d'électrode (+). L'électrode arrière est produite par un dépôt métallique sur le silicium.

La mise en série est réalisée au cours de la fabrication des couches par un astucieux découpage au laser des différentes couches, permettant de mettre en contact l'électrode (-) d'une photopile avec l'électrode (+) de la suivante. Cette technique présente l'avantage de pouvoir être réalisée même sur de très petits formats.

Les photogénérateurs au silicium amorphe sont donc susceptibles de générer à moindre coût des tensions de 3, 6 ou 12V, même sur des petites surfaces de quelques centimètres carrés.

2.3.3 Fonctionnement d'un photogénérateur [2][25]

Un photogénérateur débite un certain courant, sous une différence de potentiel. La relation qui conditionne le fonctionnement électrique du photogénérateur et son couplage avec un récepteur est dite relation courant tension.

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, on obtient à ses bornes une tension continue, dite tension à circuit ouvert U_{co} . On la mesure à l'aide d'un voltmètre. Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement). Un photogénérateur étant une association de cellules élémentaires, la tension à vide U_{co} sera telle que :

$$U_{co} = n \cdot 0.7V \quad (2.3)$$

avec n est le nombre de cellules.

La tension U_{co} est la tension maximale que cette photopile peut délivrer sous l'éclairement considéré. Mais, dans cet état, la photopile ne débite aucun courant et ne peut alimenter un récepteur. C'est sous une tension inférieure que la photopile sera utilisée, afin qu'elle débite tension et courant pour alimenter le récepteur.

A l'inverse du point de circuit ouvert, lorsqu'on place le photogénérateur en court-circuit, il débite son courant maximal, mais aucune tension. C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre. On appelle ce courant maximal à tension nulle courant de court-circuit.

2.3.4 Point de puissance maximale

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P = UI$, pour que P soit maximale : il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal. C'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m (figure 2.8). On appelle U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point P_m .

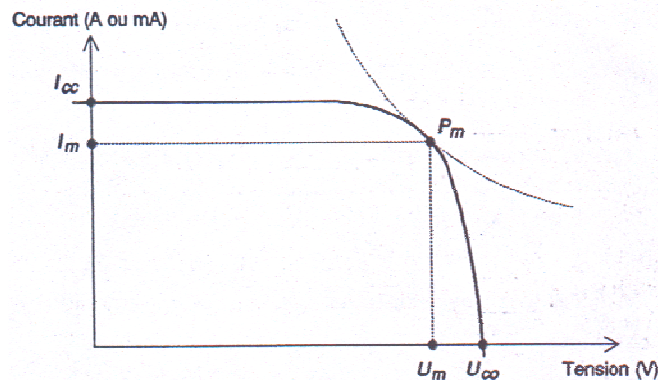


Fig.2.8. Caractéristique courant tension d'un photogénérateur

2.3.5 Puissance crête/rendement

La puissance maximale est fonction de l'éclairement. Lorsqu'il s'agit de la puissance

maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1000W/m², 25 °C, spectre solaire AM 1.5), on parle alors de watts- crête (W_c) ou de puissance crête.

Le rendement d'un photogénérateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par le photogénérateur :

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (2.4)$$

avec S est la surface du photogénérateur.

On peut calculer ce rendement pour différents éclairagements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc avec la puissance crête :

$$\eta = \frac{P_c}{1000 \cdot S} \quad (2.5)$$

Remarque : Cet ensoleillement de 1000 W/m² est très élevé, et ne représente pas toutes les situations rencontrées. Malheureusement, c'est souvent sur ce rendement normalisé que sont comparées les technologies, ce qui déprécie celles qui sont performantes à faible éclairage (ce qui est utile en intérieur et par temps couvert).

2.3.6 Couplage d'un photogénérateur avec un récepteur

Le point d'intersection de la courbe du photogénérateur avec celle d'un récepteur dépend de la nature de la charge aux bornes du photogénérateur. Le couplage avec un récepteur est étudié selon deux types de charges :

a) 1^{er} cas : Charge résistive

La courbe caractéristique de cette charge est de la forme $U = r \cdot I$. C'est une droite qui passe par l'origine et qui coupe la courbe courant tension du photogénérateur. Si le point d'intersection correspond au point de puissance maximal, on parle dans ce cas d'un couplage idéal : les deux caractéristiques du générateur et du récepteur se rencontrent au point de puissance maximale du photogénérateur. Le récepteur recevra dans ces conditions une puissance maximale qui le fera fonctionner. Si par contre l'intersection des deux courbes est différente du point de puissance maximale, on dit alors que le photogénérateur aurait alors été sous-utilisé (figure 2.9).

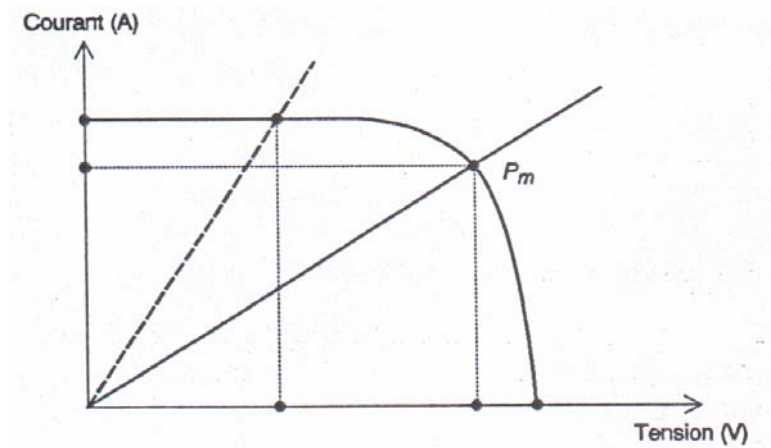


Fig.2.9. Optimisation du couplage photogénérateur charge

b) 2^{ème} cas : charge d'une batterie

Si l'on charge une batterie au lieu d'alimenter directement un récepteur (figure 2.10), c'est la tension batterie qui impose le point de fonctionnement.

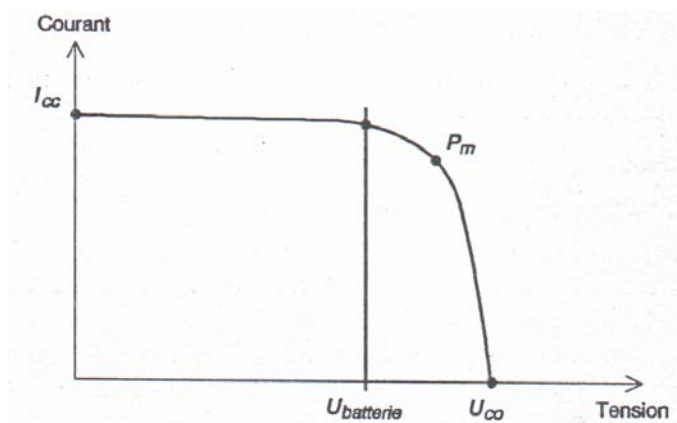


Fig.2.10. Couplage d'un photogénérateur et d'une batterie

2.3.7 Schéma équivalent d'un photogénérateur

On constate que c'est l'association avec le récepteur qui «oblige» le photogénérateur à travailler à un certain courant et à une certaine tension. Contrairement à une idée couramment répandue, le photogénérateur est donc plutôt un générateur de courant qu'un générateur de tension, au moins dans la partie exploitable de sa caractéristique entre le I_{cc} et le P_m . En effet, c'est le courant qui est constant et non la tension. Au-delà du P_m , la courbe n'est pas exploitable car la puissance chute très vite, et si l'éclairement baisse par exemple, on risque de ne plus avoir de puissance du tout.

En termes électroniques, on peut représenter une photopile alimentant directement un récepteur de la façon suivante (figure 2.11) :

G est une source de courant parfaite.

D est une diode matérialisant le fait que le courant ne circule que dans un sens.

R_{sh} est une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui interviennent entre les bornes opposées positive et négative d'une photopile (micro courts-circuits dans le silicium en particulier).

R_s est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

R_u est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant tension à l'éclairement considéré.

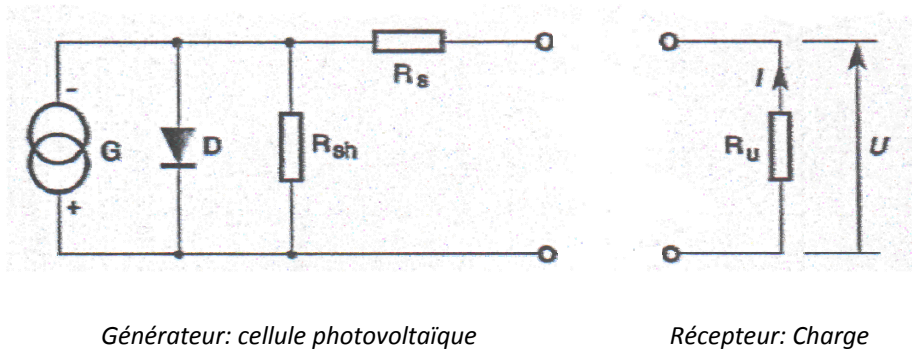


Fig.2.11. Schéma équivalent d'un photogénérateur couplé à un récepteur

avec :

G : Générateur

D : Diode interne

U : Tension aux bornes de la charge

R_{sh} : Résistance shunt interne

I : Courant traversant la charge

R_s : Résistance série interne

2.3.8 Influence de l'éclairement et de la température

2.3.8.1 Sous un ensoleillement fort (utilisation en extérieur)

Le courant I_{cc} varie directement avec le rayonnement lumineux (la relation est proportionnelle), la tension restant relativement constante. Cela est intéressant, notamment pour la charge d'une batterie. La température a également une influence non négligeable sur les caractéristiques d'un panneau solaire : quand la température s'élève, la tension diminue et donc la puissance aussi.

2.3.8.2 Sous éclairage faible (en usage intérieur)

Quand l'éclairement est plus faible que 100 W/m^2 , à environ 10000 lux et a fortiori à l'intérieur des locaux, la tension de la photopile évolue à son tour. Elle baisse avec l'éclairement, il s'agit en fait d'une variation logarithmique de U_{co} en fonction de l'éclairement. Les photopiles au silicium amorphe sont les seules à permettre un fonctionnement dans ces situations, grâce à une tension encore assez élevée.

C'est grâce à cette caractéristique que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel (notamment en dessous de 1000 lux), contrairement au silicium cristallin.

2.4 Différentes technologies [2][19][6] [29]

Le silicium cristallin et le silicium amorphe représentent à eux seuls plus de 90 % du marché mondial des applications terrestres (par opposition aux «spatiales»). Mais d'autres matériaux semi-conducteurs sont également employés pour la fabrication des photogénérateurs : le CuInSe_2 (en abrégé CIS), le CdTe (tellure de cadmium) et le GaAs (arséniure de gallium).

2.4.1 Arséniure de Gallium (GaAs)

Ce matériau à très haut rendement est un cas à part : très onéreux du fait des éléments utilisés, il n'est employé que pour des panneaux solaires de satellites ou sur des systèmes à concentration. Dans ces applications, le rendement et le poids sont les critères de sélection et non le prix!

- Rendement électrique (STC): 20-25 %.
- Usage : satellites, concentrateurs.
- Particularité: prix très élevé.

Dans un système à concentration, des lentilles ou des miroirs paraboliques sont utilisés pour concentrer le rayonnement solaire sur les panneaux. Ils sont donc équipés de systèmes suiveurs pour pointer toujours vers le soleil.

2.4.2 Silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

- Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 W_c.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

2.4.3 Silicium poly (ou multi-) cristallin

Cousin germain du précédent (composés de multicristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.

- Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 W_c.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².
- Usage identique à celui du silicium cristallin.

2.4.4 Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi jonctions »).
- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 W_c.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 W_c.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m² (en extérieur).
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculettes...), électronique de faible consommation en extérieur, baies vitrées semi transparentes.

Le silicium amorphe est «métastable». Cela se traduit par des propriétés électriques meilleures en sortie d'usine qu'après quelques mois d'utilisation en extérieur. Ce phénomène dit de «stabilisation» (les propriétés sont stables ensuite) est moindre dans les photogénérateurs à multi jonctions, mais conduit parfois à des malentendus sur les performances annoncées par les fabricants. Il faut donc bien se renseigner sur les valeurs stabilisées avant de choisir.

Les multi jonctions sont constituées d'un empilement de 2, voire de 3 jonctions p-i-n successives, avec des matériaux légèrement différents pour mieux absorber les différentes longueurs d'onde du spectre visible (des alliages silicium germanium notamment).

2.4.5 CuInSe₂ (CIS)

Egalement réalisées en couches minces par des méthodes chimiques ou de dépôt sous vide, les photopiles fabriquées avec ce matériau présentent de bonnes caractéristiques, mais à ce jour la technologie n'est pas encore parfaitement maîtrisée à l'échelle industrielle.

La recherche et le développement continuent et ce type de photopile est considéré comme très prometteur.

- Rendement des panneaux : 10-14 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 40 W.
- Usages : alimentations en extérieur de faible et moyenne puissance.

2.4.6 Tellure de Cadmium (CdTe)

Encore plus récent que le précédent, ce matériau intéresse les industriels car sa technologie d'élaboration par voie chimique est potentiellement à très bas coût. Il est encore expérimental, mais les premières usines voient actuellement le jour. Malheureusement, il contient du cadmium, connu pour sa toxicité et déjà interdit dans certains pays. Rendement en laboratoire : 8-10 % STC.

2.5 Stockage de l'énergie [2][30]

Les photogénérateurs, comme on l'a vu, ne produisent de l'énergie que s'ils sont exposés à la lumière et le courant produit dépend de la valeur de l'éclairement.

- S'il y a concordance entre la présence de la lumière et le besoin d'énergie, il n'est pas nécessaire de la stocker (exemples : une calculatrice, un ventilateur...).
- Si l'on stocke l'énergie sous une autre forme, on peut également se passer de stockage électrique (exemple: une pompe alimentée par énergie solaire stocke l'eau dans un réservoir: la pompe fonctionnera à débit variable, en fonction de l'ensoleillement et sur une journée, ou une autre base de temps, elle aura stocké suffisamment d'eau pour les usagers).

Dans ces deux cas, on parle de fonctionnement «au fil du soleil» : il y a de la lumière, cela fonctionne ; il n'y en a plus, cela s'arrête.

Mais le plus souvent, on souhaite disposer d'énergie électrique dans l'obscurité pour de multiples raisons, et on doit alors la stocker :

- la montre ne doit pas s'arrêter la nuit (ni quand on la laisse un certain temps dans un tiroir),
- on s'éclaire plutôt quand il fait nuit,
- une surveillance de barrage doit être active 24 h/24 , ... etc.

2.5.1 Autonomie « sans apport solaire »

C'est la durée pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur sans recevoir aucune charge de la part du photogénérateur. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photogénérateur.

Le besoin en autonomie, dépend du type de récepteur et de son usage.

- Pour une montre solaire, on peut décider de garantir un fonctionnement d'un mois dans l'obscurité (au-delà, il faudra la remettre à l'heure). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 30 jours.
- Pour une alimentation de haute sécurité en extérieur, on choisira de maintenir 15 jours de fonctionnement dans la batterie pour pallier une succession de journées mal ensoleillées (ce n'est qu'un exemple, cela dépend bien sûr du climat). L'autonomie sans apport solaire sera donc de 15 jours.
- Pour un usage domestique de week-end, on se contentera de 3 jours si c'est la durée maximale de séjour des occupants. L'autonomie sans apport solaire sera alors de 3 jours.
- Pour une calculatrice, même si elle fonctionne au fil du soleil, il faut fournir un pic de courant au démarrage des circuits, on pourra alors mettre un condensateur qui se chargera hors des périodes d'utilisation et fournira ce courant plus élevé sur une très courte durée. Dans ce cas, l'autonomie sans apport solaire sera de quelques microsecondes !

En général, pour un usage extérieur, la batterie doit faire fonctionner le système en cas de successions de journées mal ensoleillées.

2.5.2 Principe du couplage photogénérateur batterie

Certains pensent qu'il faut utiliser l'énergie issue directement du photogénérateur quand la lumière est présente, et «basculer» sur le stockage dans l'obscurité : c'est inutile. Le plus rationnel est de monter le photogénérateur, la batterie, et le récepteur en parallèle avec des composants de régulation. Ainsi, la batterie sera le «réservoir d'énergie», que l'on remplira d'un côté par le photogénérateur et videra d'un autre par le

récepteur. Ces deux événements peuvent être simultanés ou non, peu importe, pourvu que la batterie ne soit jamais déchargée.

Autre avantage de ce montage photogénérateur/batterie/récepteur en parallèle: la batterie jouera le rôle de régulateur de tension pour alimenter le récepteur ; car le photogénérateur, n'est en fait qu'un générateur de courant qui peut travailler sur une large plage de tension (de 0 V à sa tension de circuit ouvert). La batterie impose la tension du montage parallèle et stabilisera ainsi la tension fournie au récepteur, ce qui est un avantage évident pour certains d'entre eux. Un tube fluorescent en 12 V continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible (<10V).

2.5.3 Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système

Les règles de montage série et parallèle s'appliquent également aux accumulateurs. Deux batteries de 100 Ah de 12 V en série donneront 100 Ah-24 V, et les mêmes en parallèle donneront 200 Ah-12 V. Mais pour les montages en parallèle, il est impératif que les deux batteries soient des «soeurs jumelles» (même capacité), sinon on risque de voir la plus faible dépérir au profit de l'autre: sa résistance interne augmentera et la batterie «en meilleure santé» prendra la plus grande part du courant de charge, ce qui ne fait qu'accentuer le déséquilibre.

On préférera donc les montages série (addition de tensions), plutôt que les montages en parallèle (addition de capacités).

2.5.4 Principales caractéristiques des accumulateurs

Les principales définitions et règles à savoir pour l'emploi d'un accumulateur en association avec un photogénérateur sont énumérées ci-dessous.

2.5.4.1 Tension nominale

C'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé, elle s'exprime en volts.

2.5.4.2 Tension de charge

C'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur, elle s'exprime en volts.

2.5.4.3 Capacité de la batterie

C'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah), car on comptabilise cette énergie par le produit du courant que l'on tirerait (en A) par la durée de cette décharge (en heures).

L'énergie stockable ou «capacité» d'une batterie dépend de beaucoup de paramètres, en particulier de la façon dont elle a été chargée et déchargée. On doit donc donner la capacité dans des conditions de référence, souvent pour une durée de décharge de 20 heures et pour une température de 25 °C. On parlera alors de capacité nominale.

La température ambiante joue aussi énormément sur la capacité de la batterie, c'est sans doute le paramètre le plus important. Les réactions chimiques sont ralenties par le froid. Une batterie a donc une capacité beaucoup plus faible à froid qu'à chaud. Cette différence peut aller du simple au double. C'est donc la gamme de température que la batterie rencontrera qui doit en premier guider le calcul d'une capacité.

2.5.4.4 Charge de la batterie

La charge est l'opération qui consiste à entrer de l'énergie dans la batterie. C'est ce que fait le photogénérateur qui lui est couplé en débitant un courant de charge (en ampères) dans la batterie. L'usage a longtemps voulu que l'on recharge les accumulateurs selon la règle du dixième, c'est-à-dire en leur appliquant un courant égal au dixième de la capacité horaire (exprimée en ampères-heures) de l'accumulateur. Une telle charge est dite C/10 ou 0,1 C (C étant la capacité nominale de l'accumulateur exprimée en ampères-heures).

Même si ce régime à 0,1 C est idéal pour la longévité des accumulateurs et pour le rendement de charge, les accumulateurs modernes sont capables de supporter des recharges sous des courants considérablement plus intenses, ou considérablement plus faibles (jusqu'à C/500 pour les accumulateurs au plomb).

En général, une opération de charge est d'autant plus efficace et inoffensive pour la durée de vie de l'accumulateur qu'elle dure plus longtemps sous un courant faible.

La charge par un photogénérateur se pose rarement en ces termes (sauf charge sous une lampe de constante intensité) car dehors en particulier, le courant débité par le photogénérateur, et donc le courant de charge de l'accumulateur, est très variable, entre le début et la fin de la journée, d'une journée à l'autre ou d'une saison à l'autre.

Le phénomène de charge d'un accumulateur par un photogénérateur s'apparente donc plus souvent à une charge à tension constante (celle qu'impose l'accumulateur) qu'à une charge à courant constant.

2.5.4.5 Décharge de la batterie

Opération qui consiste à sortir de l'énergie de la batterie. C'est ce que fait le récepteur qui lui est couplé en absorbant un courant de décharge (en ampères) issu de la batterie. La durée de vie des accumulateurs dépend principalement de la profondeur de la décharge imposée (rapport entre la quantité d'électricité déchargée à un instant t et la capacité nominale) ; il faudra tenir compte de ce paramètre, décharge maximale, pour le calcul de la capacité de l'accumulateur.

En effet, il existe un seuil de tension sous lequel on ne peut plus décharger l'accumulateur, sous peine de le détériorer. Plus le courant de décharge est faible, par rapport à sa capacité nominale, plus la capacité de l'accumulateur sera grande.

2.6 Technologies d'accumulateurs et leur adéquation au solaire [30][6]

2.6.1 Les accumulateurs au plomb «ouvert»

Ils sont ainsi nommés car l'électrolyte est liquide et doit être renouvelé (comme dans une batterie de voiture). C'est le type le plus ancien et le plus utilisé. Un élément plomb acide se compose de deux électrodes de plomb baignant dans l'acide sulfurique dilué. Tension nominale par élément : 2 V (tension nominale de batteries par association d'éléments en série : 4, 6, 12, 24 et 48 V pour les plus courants).

Les batteries plomb dites «de traction» et les batteries de démarrage employées dans les véhicules ne sont pas bien adaptées au solaire. En effet, on peut les comparer à des «sprinters» devant fournir des courants de démarrage importants en des temps très courts (charge et décharge rapides). La batterie «solaire» quant à elle, plutôt «coureur de fond», sera sollicitée dans la durée à des courants beaucoup plus faibles et la technologie n'est pas tout à fait la même (surface d'échange électrolyte/électrodes supérieures, en particulier). On s'adressera aux constructeurs pour choisir les batteries appropriées à chaque usage.

2.6.2 Les accumulateurs plomb étanche

De technologie électrolyte gélifié ou à recombinaison de gaz, ils ont les mêmes caractéristiques que les Plomb «ouverts» mais sont étanches. Ils peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne nécessitent absolument aucun entretien (pas d'eau à rajouter).

On les trouve en outre dans des capacités inférieures aux batteries Plomb «ouvertes». Les avantages essentiels de la technologie plomb (ouverte et étanche) pour le photovoltaïque sont les suivants :

- longévité,
- bon rapport qualité/prix,
- entretien faible ou nul,
- bonne tenue aux températures extrêmes,
- charge possible à courant faible.

Néanmoins, pour assurer leur durée de vie, quelques précautions sont nécessaires:

- éviter les décharges profondes et les surcharges, en employant un régulateur de charge),
- maintenir les batteries chargées quand on les stocke (par une recharge tous les 3 ou 6 mois).

2.6.3 Les accumulateurs Nickel Cadmium (NiCd)

Le NiCd a longtemps été le couple électrochimique le plus utilisé en faible capacité, dans toutes les applications rechargeables. Il a une tension de 1,2 V.

En perte de vitesse depuis l'apparition des NiMH (Nickel Métal Hydrures), les accumulateurs Nickel Cadmium restent néanmoins plus intéressants pour le solaire, du fait de leur meilleure efficacité de charge à faible courant et de leur bonne tenue aux basses températures. Ils ont donc leur place dans des alimentations par photopiles, en intérieur comme en extérieur, pour des capacités de stockage inférieures à 2 Ah.

2.6.4 Les accumulateurs Nickel Métal Hydrures (NiMH)

Dérivés des NiCd, ces accumulateurs ont été développés avec 3 objectifs:

- augmenter la capacité par unité de volume,
- favoriser les charges rapides (pour le marché du téléphone portable notamment) et
- éliminer le cadmium, toxique pour l'environnement et déjà interdit dans certains pays.

A part la première caractéristique (ils sont plus compacts), ces accumulateurs ne sont pas meilleurs que les NiCd pour le solaire. Ils sont même moins bons en ce qui concerne la tenue au froid. Mais à terme, ils risquent de les remplacer totalement chez les fabricants.

Les avantages des NiCd et NiMH pour le solaire sont les suivants:

- petites capacités disponibles sous de multiples formes (boutons, bâtons, prismes...) de 30 à 2000 mAh,
- plus compacts que les batteries Plomb,
- plus de tensions disponibles, du fait de la valeur 1,2V par élément: 2,4 V; 3,6 V; 4,8 V; 12 V...,
- excellente tenue à la chaleur.

Les inconvénients des NiCd et NiMH pour le solaire sont les suivants:

- autodécharge,
- charge difficile à moins de 0°C pour les NiMH,
- effet mémoire ou cristallisation quand les accumulateurs sont peu sollicités.

Il existe également de grosses batteries NiCd à très hautes performances, environ trois fois plus onéreuses que les batteries plomb étanches, mais qui sont les seules à atteindre des durées de vie de l'ordre de 20 ans. On les utilise dans des applications solaires, dans des cas particuliers et quand le déplacement sur site revient très cher (sites inaccessibles ou dangereux).

2.6.5 Les accumulateurs au Lithium

Le lithium rechargeable est déjà présent sur nombre d'appareils portables sous le nom « Li-ion », de tension 3,6 V. Très compacte et à recharge rapide, cette technologie n'est pas très bien adaptée au solaire à ce jour, en particulier parce que les accumulateurs doivent subir un protocole de charge assez précis, plutôt incompatible avec les courants éminemment variables d'un photogénérateur soumis à divers éclairagements.

2.6.6 Les condensateurs et super capacités

Malheureusement assez sujets à l'autodécharge, un condensateur chimique ou une super capacité peuvent néanmoins s'avérer utiles pour le stockage de l'énergie solaire pour:

- générer des impulsions de courant élevé,
- des cycles charge/décharge très rapides,
- décharger de temps en temps un accumulateur NiCd pour éviter son effet mémoire.

L'effet «mémoire» : schématiquement, il s'agit d'un phénomène d'accoutumance. Si un accumulateur NiCd est régulièrement déchargé à 20 % de sa capacité par exemple, il s'y «habitue» et aura du mal, après un certain temps à ce régime, à fournir à la demande une capacité supérieure, 80 % par exemple.

2.7 Contrôle de charge [2][1][37]

2.7.1 Les diodes anti-retour

Le courant circule naturellement du point de tension le plus fort vers le plus faible. Lorsque la batterie est en période de charge ou déjà chargée, la tension de la batterie a tendance à dépasser la tension délivrée par le photogénérateur. Le courant passerait alors de la batterie vers le photogénérateur, si on ne mettait pas une diode qui bloque le

passage du courant dans ce sens. Cela pourrait l'endommager. Cette diode a le rôle d'une valve qui évite la décharge de la batterie dans le photogénérateur lorsque la lumière est faible donc la tension du photogénérateur est basse (figure 2.12).

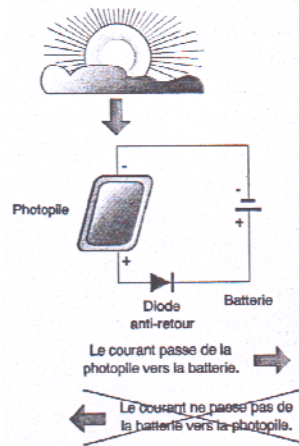


Fig. 2.12. Principe d'une diode anti-retour

Remarque : Les diodes anti-retour sont aussi utilisées lors de la mise en parallèle de plusieurs photogénérateurs et pour éviter qu'ils débitent les uns dans les autres s'ils ont une puissance inégale.

Les batteries ont, la plupart du temps, en extérieur tout au moins, une durée de vie inférieure aux photogénérateurs. Il faut donc tout faire pour les «ménager» afin qu'elles durent le plus longtemps possible, et surtout faire en sorte qu'aucun événement ne leur soit fatal.

- durée de vie des panneaux solaires : 10-20 ans,
- durée de vie des batteries: 2 à 10 ans (voire 15 ou 20 ans pour les plus haut de gamme).

2.7.2 Fonctions d'un régulateur de charge

L'objectif d'un régulateur de charge est de protéger la batterie pour lui assurer une meilleure durée de vie, pour que l'application autonome le soit pendant longtemps.

Améliorer la durée de vie d'une batterie plomb (les plus utilisées), c'est empêcher :

- la surcharge: que la tension dépasse un certain seuil,
- la décharge profonde: que la batterie soit vidée de plus de 90 % de sa charge.

On réalise ces deux fonctions avec un régulateur charge/décharge connecté avec les panneaux, la batterie et l'utilisation. Quand la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V (seuil haut typique pour une batterie au plomb de 12 V nominale), le régulateur coupe la liaison avec le panneau, ce qui implique que la batterie n'est plus chargée. Cette charge est rétablie vers 13,5 V.

De même, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique pour 12 V), le régulateur coupe la liaison avec le récepteur, ce qui ne permet plus son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V. Il rétablit alors l'utilisation.

Notons que la protection surcharge est presque toujours indispensable, car une alimentation solaire est excédentaire en énergie une partie du temps (l'été surtout). Il n'en est pas de même de la protection décharge, qui est davantage une sécurité en cas d'incident : en effet, si le dimensionnement est bon et les composants bien adaptés, la batterie ne doit pas entrer en décharge profonde. Si cela se produit, ce ne peut être qu'accidentel. On mettra une protection décharge lorsqu'il y a un risque de surconsommation (appareil laissé allumé par erreur, par exemple), ou une batterie très onéreuse. Dans ce cas, on préférera interrompre l'utilisation plutôt que d'endommager la batterie par décharge profonde en cas d'incident.

En pratique, ces fonctions anti-retour et régulation de charge sont réalisées par des boîtiers électroniques avec une logique à relais ou à transistors. Ils peuvent être de type shunt (pour les basses puissances) ou de type série (pour les puissances élevées). Entre autres caractéristiques, ils sont déterminés par le courant d'entrée (courant maximal des panneaux) et le courant de sortie (courant maximal de l'utilisation) qu'ils supportent. S'ils ne comportent pas de protection décharge, ils sont appelés limiteurs de charge ou régulateurs de surcharge, se placent entre le panneau et la batterie, et donc seul le courant du panneau solaire conditionnera leur ampérage.

La figure 2.13 montre le principe d'un régulateur charge/décharge de type série. Ce système mesure en permanence la tension batterie et agit en conséquence, selon son état de charge.

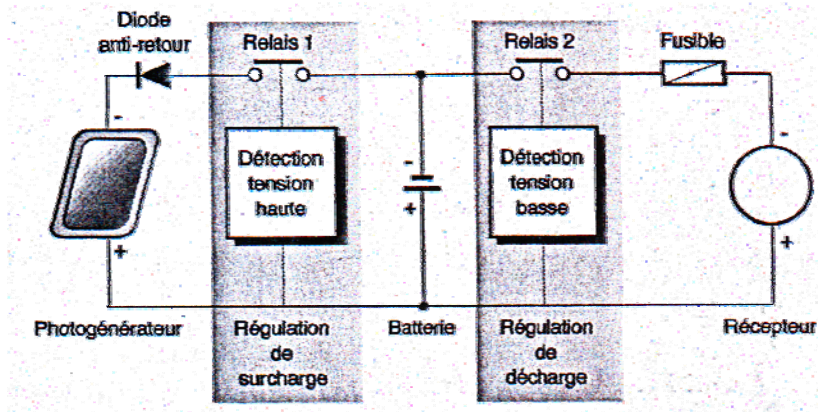


Fig.2.13. principe de fonctionnement d'un régulateur charge/décharge

2.8 Secteurs d'application [2][47][28]

L'atout principal de l'énergie photovoltaïque réside dans la possibilité de fournir une autonomie de fonctionnement à un appareil nécessitant une source d'électricité indépendante. Elle se décline du microwatt (μW) au mégawatt (MW). Une vaste gamme d'applications de cette précieuse énergie est devenue plus ou moins connue.

2.8.1 Produits grand public employés en intérieur

Aujourd'hui: calculettes, montres, jouets, lampes de poche, balances, pèse-personnes, animations publicitaires en vitrines, radios portables, etc. sont des exemples concrets des applications du photovoltaïque. Potentiellement, tout objet de consommation très réduite qui se trouve fréquemment exposé à la lumière peut être alimenté par la lumière, ce qui permet:

- de disposer d'un appareil sans « fil à la patte »,
- d'éviter toute contrainte de changement de piles, et de réaliser des économies de fonctionnement,
- d'économiser la mise en place d'un logement pile dans l'appareil.

Ce dernier facteur est surtout à l'origine du plus grand succès de l'énergie lumière à ce jour en termes de mètres carrés de photopiles vendus dans le monde: la calculatrice solaire.

2.8.2 Produits grand public à usage extérieur

On pourra rendre totalement autonome tout équipement électrique à consommation modérée ou intermittente, placé dehors ou pouvant être alimenté par des panneaux exposés à l'extérieur.

2.8.3 Habitat isolé

Aujourd'hui, l'électricité solaire n'est pas compétitive par rapport à l'électricité nationale lorsque cette dernière est disponible sur le site à alimenter. Nos habitudes de confort, la consommation plutôt élevée de nos appareils managers et le bas prix de l'électricité du réseau en sont les principales raisons, avec bien entendu le prix encore trop élevé des photogénérateurs et autres composants nécessaires. C'est pourquoi l'électricité solaire pour l'habitat se justifie essentiellement dans les cas suivants :

- habitat éloigné du réseau d'électricité, ou difficile d'accès (milieu rural, montagne, îles...),
- besoins modestes en énergie avec des consommations optimisées: éclairage, réfrigération, pompage de l'eau, petit électroménager, et en aucun cas le chauffage, qui doit être alimenté par des capteurs thermiques,
- occupation intermittente (maison de week-end),
- énergie complémentaire en couplage avec un groupe électrogène,
- appareils électriques d'extérieur : fontaines de jardin, portails ... etc.

2.8.4 Raccordement au réseau

On en parle de plus en plus, il consiste en la connexion des panneaux solaires d'un habitat au réseau électrique à travers un convertisseur DC/AC, et ce sans batterie. Le propriétaire peut ainsi à la fois disposer d'énergie «gratuite», et «revendre» son énergie en cas d'excédent à la compagnie nationale (SONELGAZ), mais ce n'est pas encore viable économiquement, compte tenu des investissements à engager.

2.8.5 Equipements professionnels

Dans ce domaine, la performance des produits est déterminée davantage par le service rendu que par des considérations de rendement photovoltaïque. En particulier, lorsque la maintenance d'un réseau d'appareils alimentés par piles est compliquée (difficultés d'accès) ou onéreuse (étendue du parc d'équipements). Le solaire est avant tout une tranquillité pour l'exploitant. Un nombre grandissant de secteurs est concerné : télécommunications, sécurité et signalisation routières, télémessure, stations météorologiques, gestion des eaux, contrôles de pollution, surveillance et contrôle d'accès, mobilier urbain, éclairage, information sur la voie publique, gestion agricole (serres, irrigation...).

2.8.6 Centrales solaires

Dans les régions du globe où des terres ensoleillées sont vacantes, où la consommation électrique est élevée en période de fort ensoleillement (comme aux Etats-Unis avec la climatisation) et où il existe une volonté de recourir à diverses formes d'énergie électrique au cas par cas, des centrales solaires pouvant atteindre plusieurs mégawatts sont construites, à l'image de nos centrales électriques classiques.

2.9 Optimiser et économiser

S'il est indispensable de continuer à améliorer les rendements des éléments photovoltaïques, il ne faut pas seulement raisonner en puissance produite, mais aussi en puissance consommée. Il est parfois moins coûteux d'investir pour économiser un watt heure que pour en produire un supplémentaire, tout cela pour une satisfaction égale du consommateur.

Donc, quand on pense «solaire», on doit d'abord penser «faible consommation». De plus, les composants photogénérateur, batterie et régulateur de charge, ne sont pas vraiment bon marché, il faut donc ne pas gaspiller cette énergie précieuse.

Rappelons que la consommation électrique est le produit de la puissance à fournir par le temps de fonctionnement. On s'attachera donc à réduire autant que possible la puissance et le temps de fonctionnement. Pratiquement, on favorisera :

- l'utilisation d'appareils électriques ou de composants électroniques consommant faiblement,
- un fonctionnement rationnel dans le temps.

2.9.1 Optimiser le temps de fonctionnement

Une photopile ou un panneau solaire produise chaque jour une quantité d'énergie donnée, qu'il convient d'exploiter au mieux. Lorsque l'appareil alimenté consomme des courants forts, ce n'est pas critique s'ils sont de courte durée. Par contre, il est toujours intéressant de réduire au minimum les consommations permanentes.

La logique qui doit guider celui qui optimise un système est la suivante : «ne consommons pas d'énergie lorsque c'est inutile». Pour ce faire, il est souvent intéressant de recourir à:

- des détecteurs de présence: pour mettre en route un appareil en cas de passage d'une personne,
- des détecteurs crépusculaires : pour arrêter ou mettre en route un appareil quand la nuit tombe (ou quand le soleil se lève!).

2.10 Dimensionnement d'une application

Le dimensionnement d'une installation consiste essentiellement d'acquérir les bons réflexes et d'évaluer la faisabilité de cette application solaire. Mais il faut savoir que ces bilans d'énergie peuvent s'avérer plus complexes qu'ils n'y paraissent, et que pour obtenir des résultats précis et sûrs, il est indispensable de les réaliser avec un grand professionnalisme. Si nous commençons d'abord par des applications en courant continu, il faut tout d'abord répondre aux questions suivantes :

- Quelle est la consommation du système sur la base de 24 h?
- A-t-on besoin d'un stockage? Si oui, sur quelle base de temps?
- Quel stockage peut-on utiliser pour qu'il soit compatible avec l'application?
En capacité, en voltage ?
- De combien d'énergie solaire, ou «énergie lumière», va-t-on pouvoir disposer?
- Quel(s) photogénérateur(s) est adapté?

2.10.1 Evaluer la consommation

Pour connaître l'énergie électrique consommée par une application, il faut d'abord établir un tableau des fonctions à alimenter ainsi que la durée de chacune sur 24 h, et calculer l'énergie nécessaire en Ah, mAh, ou μ Ah.

2.10.2 Le stockage

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

2.10.3 Détermination de la capacité de l'accumulateur [2][30]

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:

$$C(Ah) = \frac{\text{Conso. du système sur 24 h (Ah)} \times \text{Durée d'auto. en jours}}{0.6} \quad (2.6)$$

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:

$$\text{Capacité utile} = \text{Capacité nominale} \times \text{Pourcentage utile} \quad (2.7)$$

2.10.4 Choix de la technologie

Deux cas se présentent :

- la tension de travail est de 6 V, 12 V, 24 V, 48 V : le choix sera un stockage en batterie plomb pour les capacités de 2 Ah et plus ; NiCd pour les capacités inférieures à 2 Ah (ou pour les grosses capacités si une très haute fiabilité est nécessaire).
- la tension de travail est un multiple de 1,2 V (1,2 V; 2,4 V; 3,6 V; 4,8 V...) : le choix s'orientera vers un NiCd et se limitera à des capacités inférieures à

2 Ah.

2.10.5 Contraintes

D'autres considérations peuvent conditionner le choix d'un accumulateur :

- autodécharge (si la batterie a de l'autodécharge, il faut la rajouter à la consommation du système),
- tenue en température,
- durée de vie,
- poids, volume disponible,
- degré d'entretien (les batteries au Plomb «ouvert» demandent un entretien 1 à 2 fois par an du niveau d'électrolyte).

2.11 Evaluation de l'énergie solaire (ou lumineuse) récupérable [2][1][28]

2.11.1 En intérieur

Pour éclairer l'environnement normal de travail d'une application, il faut utiliser un luxmètre. Les résultats des mesures expérimentales rapportent que pour un environnement intérieur «standard» on prend 200 lux, et pour un environnement intérieur nécessitant un éclairage «élevé» on prend jusqu'à 1000 lux.

2.11.2 En extérieur

Il est difficile de faire un calcul précis, même s'il faut recourir aux données statistiques météo, car l'essai, aussi long soit-il en extérieur, est rarement concluant, à cause de la variation stochastique des conditions climatiques.

2.11.3 Les photogénérateurs et le choix de la tension de fonctionnement

En alimentation directe (sans stockage), la tension de fonctionnement (V_{load}) du photogénérateur à l'éclairage de travail doit être celle du fonctionnement de l'application. En charge de batterie, la tension du photogénérateur sera choisie en fonction de la tension de charge des accumulateurs :

- NiCd : tension nominale par élément 1,2 V, tension de charge 1,4 V.
- Plomb : tension nominale par élément 2 V, tension de charge 2,2 à 2,3 V.
- On ajoutera 0.6 V pour tenir compte de la diode anti-retour en série

2.12 Puissance du photogénérateur

2.12.1 En extérieur

On peut calculer de manière approchée la puissance en W_c (Watt Crête) du photogénérateur nécessaire. Rappelons que la puissance crête d'un panneau solaire est celle qu'il débite sous un ensoleillement de 1000 W/m^2 à 25 °C sous un spectre solaire AM 1,5. Pour calculer cette puissance :

- On choisit un site météo aussi proche que possible de l'application.
- On prend la valeur d'ensoleillement global journalier (en $\text{kWh/m}^2\text{-jour}$) la plus défavorable de la période de fonctionnement, à l'orientation et l'inclinaison choisie pour le panneau.
- On considère alors que cette journée dure N heures, avec un ensoleillement de 1000 W/m^2 .
- Comme le panneau débite sa puissance crête à cet ensoleillement de 1000 W/m^2 , il le fera pendant l'équivalent de N heures au cours de cette journée et on calcule donc la puissance nécessaire de la façon suivante:

$$P(W_c) = \frac{Wh \cdot \text{demandés}}{N \cdot \text{heures} \times C_p} \quad (2.8)$$

$$\text{Puissance crête du panneau} = \frac{\text{Consommation journalière de l'application}}{\text{Nb. d'heures équivalentes d'ensoleillement} \times \text{Coeff. de pertes}} \quad (2.9)$$

C_p , coefficient de perte, peut être compris entre 0.5 et 0.8, selon les technologies et les niveaux d'ensoleillement instantanés du site considéré.

2.12.2 En intérieur

Le principe est le même, mais on raisonnera avec un éclairage fixe pendant un certain temps (1000 lux pendant 8 h/jour ou 200 lux permanent. . .).

Le courant que devra fournir le photogénérateur sera donc :

$$I_{load} \text{ (sous l' éclairement de travail)} = \frac{\text{Consommation du système sur 24 h (Ah)}}{\text{Nb heures par jour d' exposition (h) } \times Cp} \quad (2.10)$$

2.12.3 Photopiles pour usage intérieur

Ces photogénérateurs ont le plus souvent une vocation «électronique» et sont disponibles sous différentes tensions. Leurs dimensions en fonction des besoins en courant et en tension seront choisies avec le fabricant selon ses possibilités. Néanmoins, on peut les estimer avec les règles ci-dessous :

- Pour la tension de fonctionnement, il faut compter 0,3 à 0,4V par cellule en fonctionnement entre 200 et 1000 lux. Rappelons que ces photopiles sont constituées de plusieurs cellules mises en série par rayage laser. On les appelle donc aussi des «bandes», en raison de leur forme rectangulaire.
- Pour le courant par unité de surface, compter 60µA/cm² à 1000 lux et 10-12 µA/4.8 à 200 lux. Majorer ensuite de 15 % pour les contacts et les bordures.

2.12.4 Applications en courant alternatif

Tout système d'alimentation par photogénérateur est en continu au départ. Pour disposer d'énergie en 220 VAC (comme la plupart de nos appareils domestiques), il faut convertir ce courant continu en courant alternatif. On prendra un convertisseur DC/AC (ou onduleur) adapté en tension et en puissance et on le placera en amont de l'appareil à alimenter.

2.13 Conclusion

Les énergies renouvelables sont des énergies dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques, on peut citer : l'ensoleillement, le vent, le mouvement de l'eau dans les cours d'eau ou les mers, les matières organiques et la chaleur des entrailles de la terre.

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité.

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages :

- une haute fiabilité, car elle ne comporte pas de pièces mobiles ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- 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 puissance 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.
- 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.

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. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

MODELISATION ET ETUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES DES CELLULES SOLAIRES PHOTOVOLTAÏQUES

3.1 Introduction

La modélisation d'un système physique conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce système, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité.

L'objectif de cette étude consiste à obtenir par simulation, les caractéristiques dynamiques de la cellule photovoltaïque en utilisant le software Matlab version 6.5. La cellule solaire est un dispositif semi-conducteur dont le modèle mathématique est toujours lié à ce qu'on veut en faire, mais reste toujours basé sur un circuit électrique avec différents paramètres.

Une cellule solaire est représentée (dans la littérature) par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique (analytique) en fonction des paramètres technologiques de la cellule tels que le courant et la tension. Ce qui nous ramène en fin de compte à écrire les algorithmes appropriés pour représenter initialement la caractéristique courant tension puis puissance tension ... etc.

Cette étude a pour but d'étudier lequel des modèles décrit mieux le comportement des cellules solaires, en utilisant la technique du modèle de référence qui consiste à comparer ces différents modèles en utilisant l'erreur simple et quadratique.

3.2 Modèle idéal [34] [21] [45]

C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion (figure 3.1). Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source de courant produit le photo courant I_{ph} , qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire E .

L'équation courant tension $I-V$ du circuit équivalent simplifié est déduite à partir de la loi de Kirchhoff (première loi de Kirchhoff : la somme de tous les courants entrant et sortant d'un point est égale à zéro):

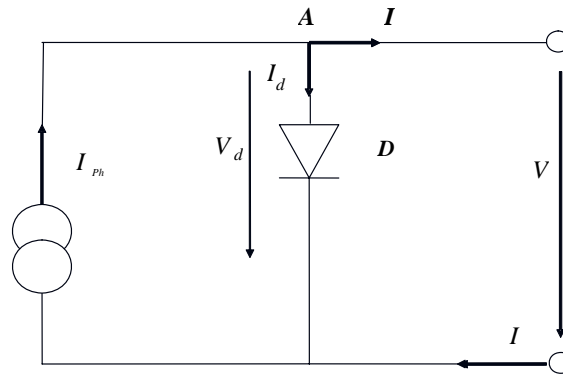


Fig.3.1 : Circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire

A partir du nœud A on a :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (3.1)$$

avec :

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

d'où :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Avec :

- I_{ph} : photo courant.
- I_d : courant de diode.
- I_s : courant inverse de saturation de la diode.
- m : facteur d'idéalité de la diode, $m = 1 \dots 5$.
- V_T : Tension thermique.
- K : constante de Boltzmann.
- T : température absolue, $[T] = K$ (kelvin).
- e : charge d'un électron.

3.3 Modèle avec pertes ohmiques [21] [45]

Le deuxième modèle, tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du

comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série R_s dans le circuit équivalent représenté ci dessous :

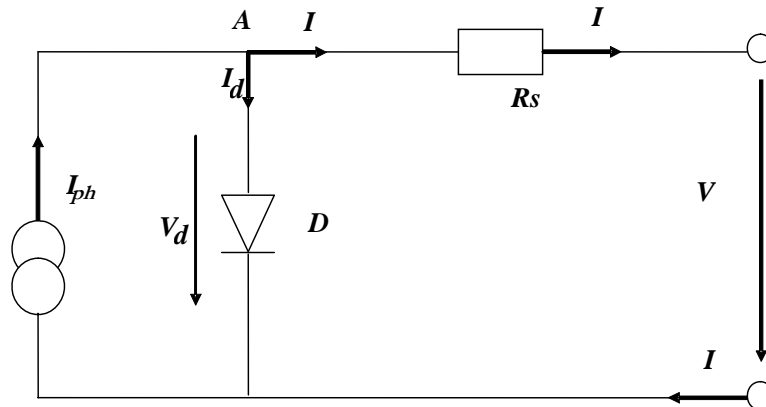


Fig.3.2 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle avec R_s

Après analyse du circuit, l'équation courant tension est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

avec :

R_s : résistance série qui tient compte des pertes en tension dues aux contacts externes

3.4 Modèle à une diode (one diode model) [34] [21] [45]

C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheets). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimées par la résistance série R_s , mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_p (voir figure 3.3).

Remarque : La résistance parallèle R_p est en générale très élevée, et lorsqu'elle est trop faible, la cellule solaire ne donnera plus de tension sous faible éclairement.

La caractéristique courant tension décrivant le fonctionnement du circuit ci-dessus est donnée par les équations (3.5) à (3.8) :

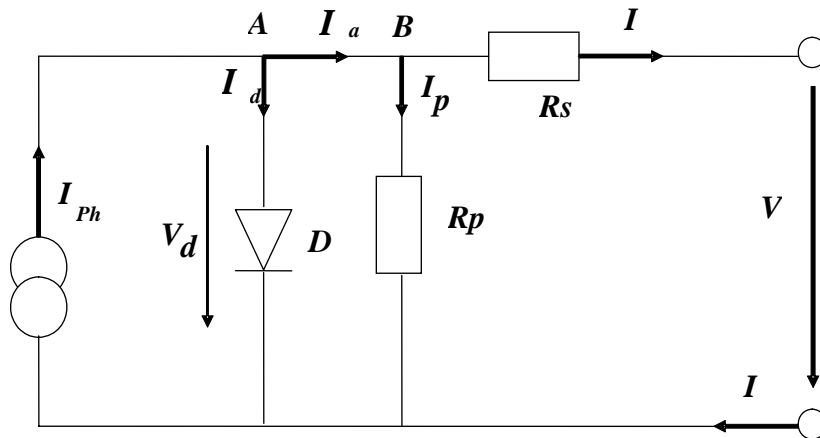


Fig.3.3 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à une diode

$$I = I_{ph} - I_d - I_p \quad (3.5)$$

$$I_d = I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{mV_T}} - 1 \right) \quad (3.6)$$

$$I_p = \frac{V_d}{R_p} = \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (3.7)$$

$$I = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{v+I.R_s}{mV_T}} - 1 \right) - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (3.8)$$

avec :

R_p : résistance parallèle simulant les pertes en courant de la cellule solaire

L'équation (3.8) en termes de I et V n'est pas tellement facile à résoudre comparativement à l'équation du circuit équivalent simplifié. Par conséquent une méthode numérique (Newton-Raphson) doit être appliquées.

3.5 Modèle à deux diodes [34] [21] [45]

Le circuit équivalent du modèle à deux diodes est donné sur la figure 3.4. Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule (deux diodes).

Le modèle à deux diodes (équation 3.13) est composé de deux exponentiels, le premier tient compte du phénomène de diffusion, tandis que le deuxième exponentiel correspond au phénomène de recombinaison, dans la région de déplétion, par les niveaux profonds.

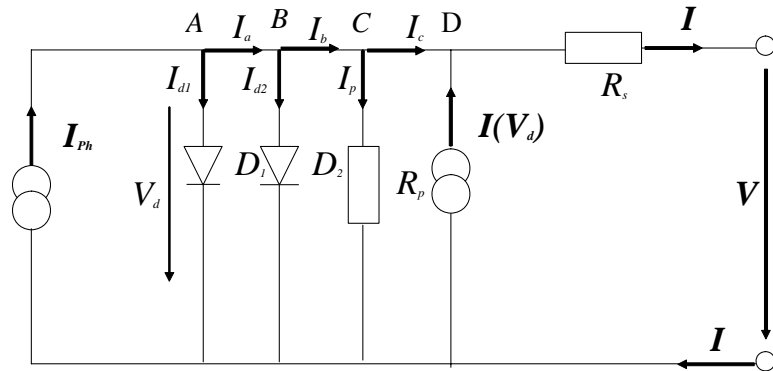


Fig.3.4 : Circuit équivalent d'une cellule solaire, modèle à deux diodes

Les équations caractéristiques du système sont données ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_p + I(V_d) \quad (3.9)$$

$$I_{d1} = I_{s1} \left(e^{\frac{v}{m_1 V_T}} - 1 \right) \quad (3.10)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(e^{\frac{v}{m_2 V_T}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

$$I(V_d) = -a \cdot (V + I \cdot R_s) \left(1 - \frac{V + I \cdot R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (3.12)$$

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{m_1 V_T}} - 1 \right) - I_{s2} \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{m_2 V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} - a \cdot (V + I \cdot R_s) \left(1 + \frac{V + I \cdot R_s}{V_{Br}} \right)^{-n} \quad (3.13)$$

avec :

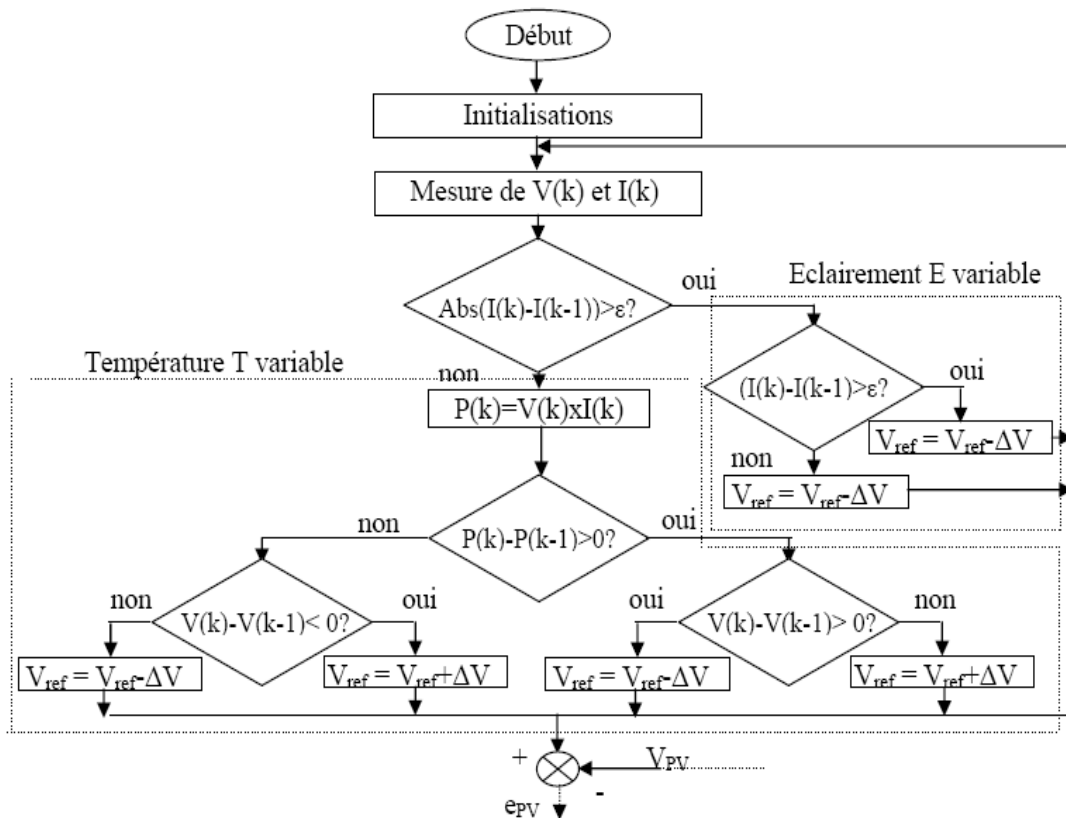
- I_{s1}, I_{s2} : courant de saturation de la première et la deuxième diode respectivement.
- m_1, m_2 : facteurs d'idéalité de la première et la deuxième diode respectivement.
- V_{Br} : tension de rupture (-15V...-50V).
- a : facteur de correction ($a = 0 \div 1$).

- n : indice de la rupture d'avalanche ($n=1\div 10$).

3.6 Simulation et interprétation des courbes

Une fois que les modèles mathématiques sont prêts, passons à la programmation de ces modèles afin de voir le résultat que donnent et surtout à quel point sont ils reproducteur du comportement réel de la cellule photovoltaïque. L'environnement choisi pour écrire nos scripts est **Matlab**. Ce dernier est simple, efficace et interactif.

3.6.1 Modèle général de l'organigramme du calcul de la caractéristique courant tension $I = f(V)$ et puissance tension:



La cellule solaire choisie pour notre simulation est de type jonction « N⁺-P » en silicium monocristallin dont les paramètres sont donnés par la référence [10]. C'est une cellule dite "heavily doped" et fait l'objet de plusieurs applications.

3.6.2 Modèle idéal

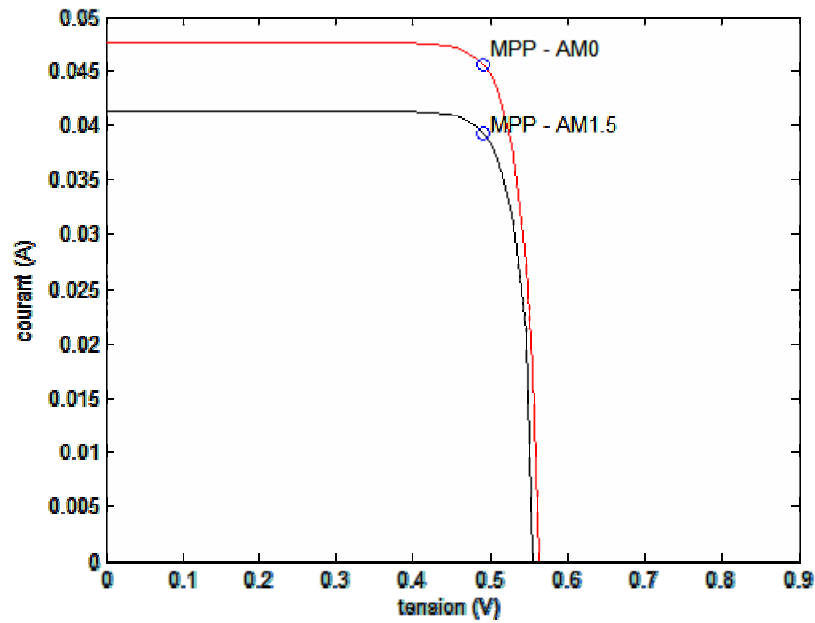


Fig.3.5 : Caractéristique courant tension sous éclairement AM0 et AM1.5

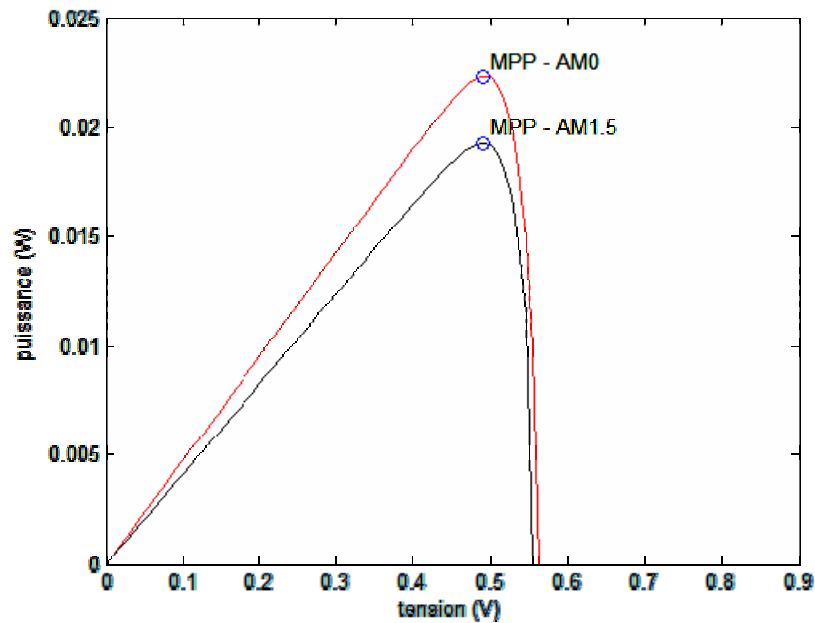


Fig.3.6 : Caractéristique puissance tension sous éclairement AM0 et AM1.5

Évidemment ces caractéristiques dépendent fortement de l'éclairage auquel est soumis le photogénérateur. Sur les figures 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10, 3.11 et 3.12 on peut voir l'allure générale des caractéristiques de la puissance en fonction de la tension ainsi que les caractéristiques du courant en fonction de la tension pour différents éclairagements AM0 correspondant à 1360 w/m^2 , dit éclairement de seuil de l'atmosphère, et AM1.5 correspondant aux conditions normalisées STC.

Sur chaque courbe, le petit cercle représente le point de puissance maximale que peut fournir le photogénérateur. On voit bien que pour un éclairement et une température donnés, il existe une tension qui maximise la puissance produite par le générateur. D'où l'intérêt d'insérer un convertisseur de puissance entre le photogénérateur et sa charge pour assurer un fonctionnement à puissance maximale quelles que soient la charge et les conditions d'éclairement et de température, grâce à un convertisseur statique qui n'est en fait qu'un dispositif d'asservissement de la puissance couramment appelé à une fonction de pilotage MPPT (Maximum Power Point Tracker).

3.6.3 Modèle avec une résistance série

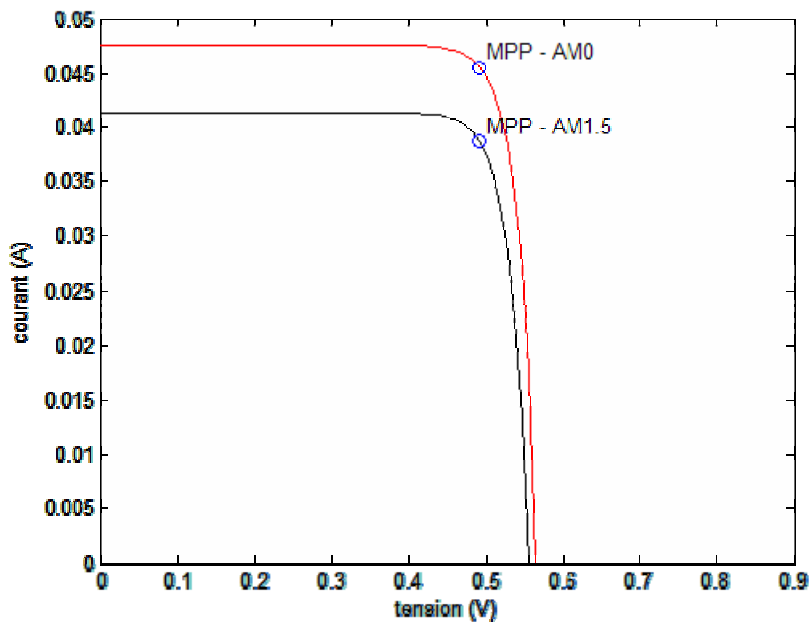


Fig.3.7 Caractéristique courant tension sous éclairement AM0 et AM1.5

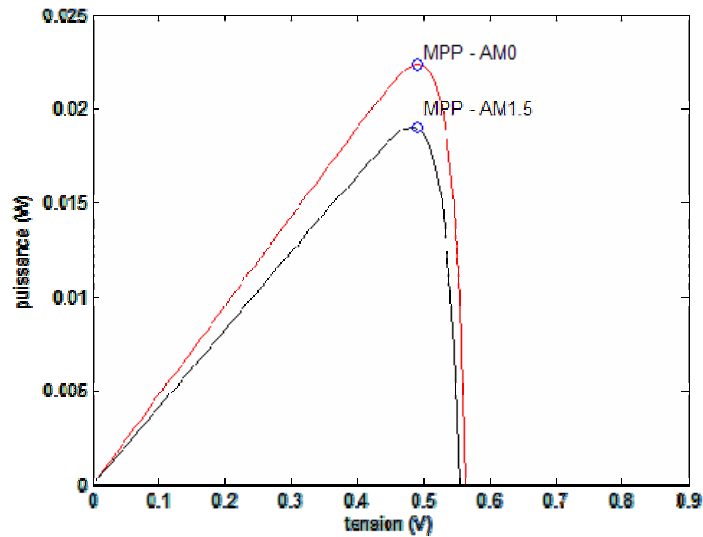


Fig.3.8 Caractéristique puissance tension sous éclairement AM0 et AM1.5

L'introduction de la résistance série R_s dans le modèle de la cellule solaire possède une influence remarquable sur la valeur du point de puissance maximal de la cellule. Cette influence apparaît clairement sur la tension du circuit ouvert (V_{OC}), et par contre son effet est très faible sur le courant du court circuit (I_{CC}). Par conséquent l'influence de R_s apparaît sur la pente de la caractéristique $I-V$ de la cellule au point $V=V_{OC}$, ce qui nous conduit à dire que la valeur de cette résistance n'est que le résultat de la variation de la tension V en fonction du courant I (pente de V au point $V=V_{OC}$). Cette dernière (donnée par les fabricants comme étant une constante) est en réalité fonction de plusieurs autres paramètres notamment la température.

3.6.4 Modèle avec une diode (résistance série et parallèle)

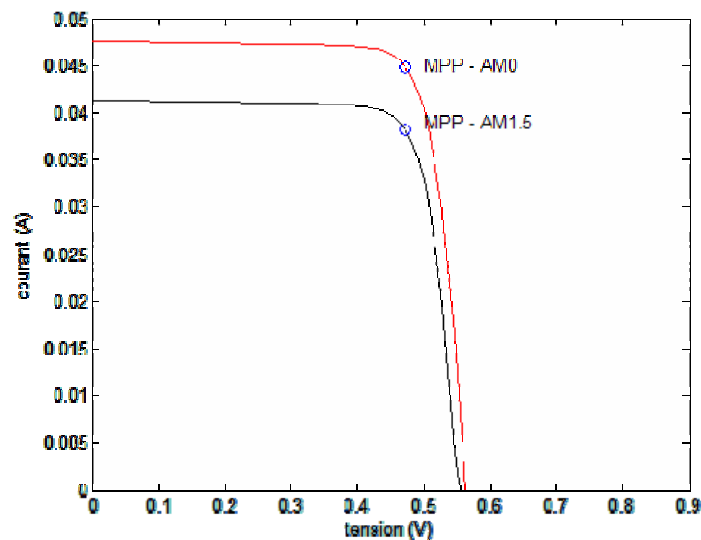


Fig.3.9 Caractéristique courant tension sous éclairement AM0 et AM1.5

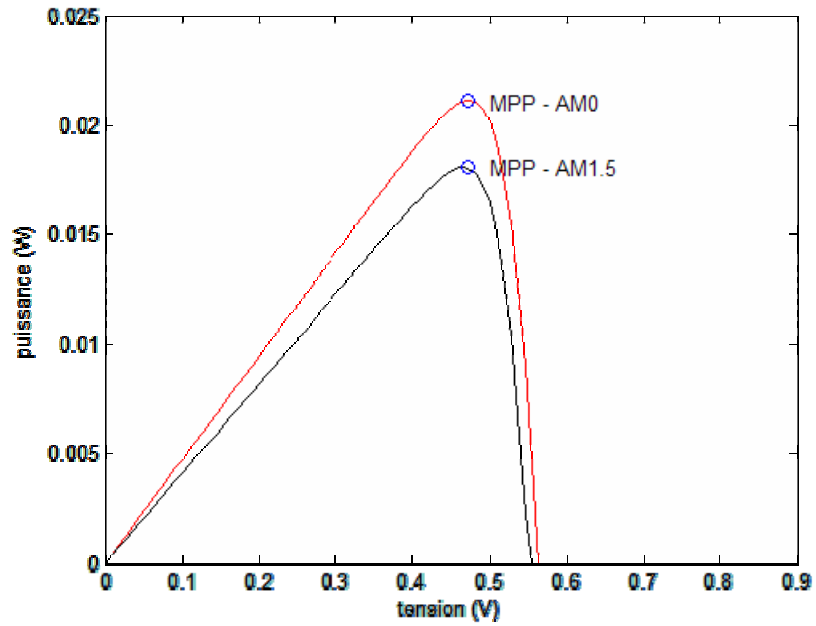


Fig.3.10 : Caractéristique puissance tension sous éclaircment AM0 et AM1.5

L'introduction de la résistance shunt R_p donne selon [5] des modèles qui prévoient un courant de fonctionnement meilleur que celui des modèles simplifiés, particulièrement autour du midi solaire, quand la majeure partie de la puissance est produite.

3.6.5 Modèle avec deux diodes

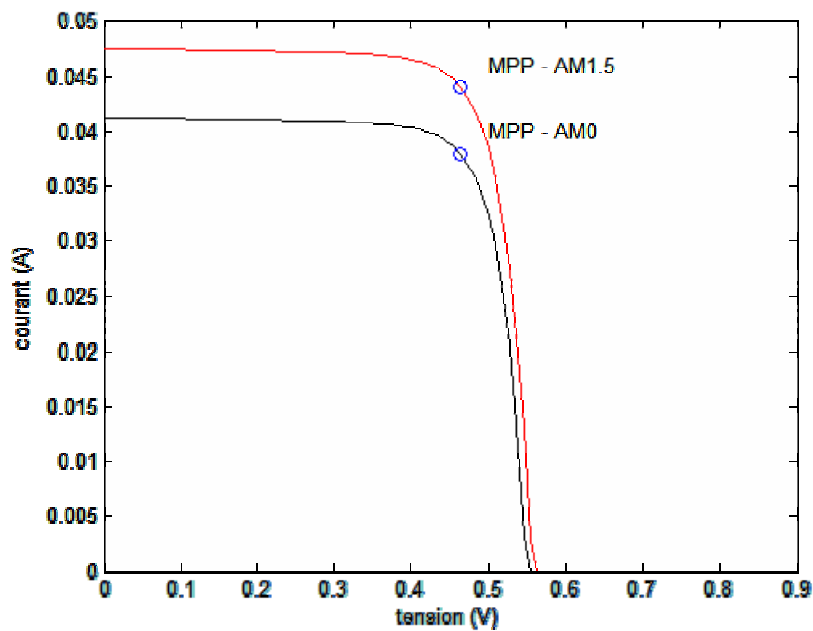


Fig.3.11 : Caractéristique courant tension sous éclaircment AM0 et AM1.5

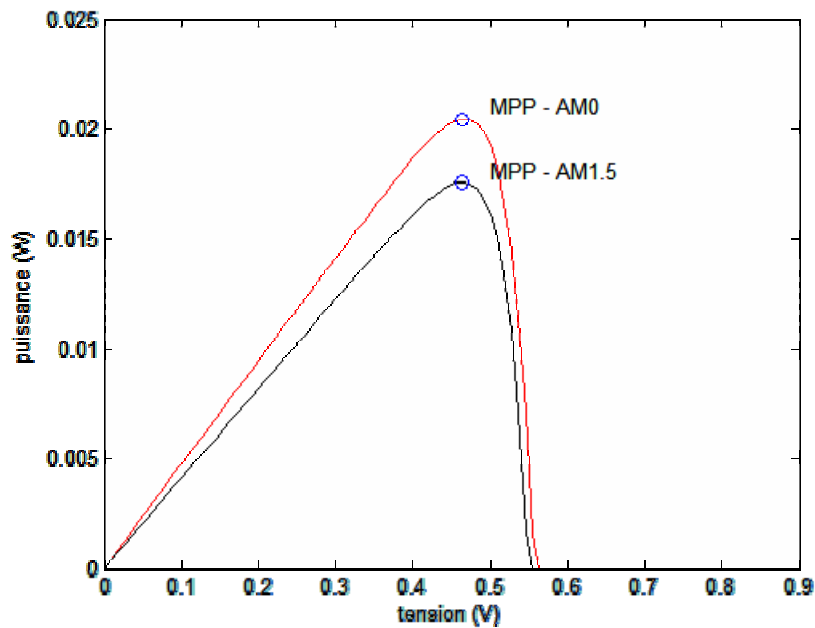


Fig.3.12 Caractéristique puissance tension sous éclairement AM0 et AM1.5

En termes du point de puissance maximale, ce modèle est le moins performant à cause de sa structure comportant deux diodes représentant les phénomènes de polarisation de la jonction p n. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau.

3.7 Comparaison des caractéristiques par modèle

3.7.1 Cas de l'éclairement AM1.5 (conditions STC)

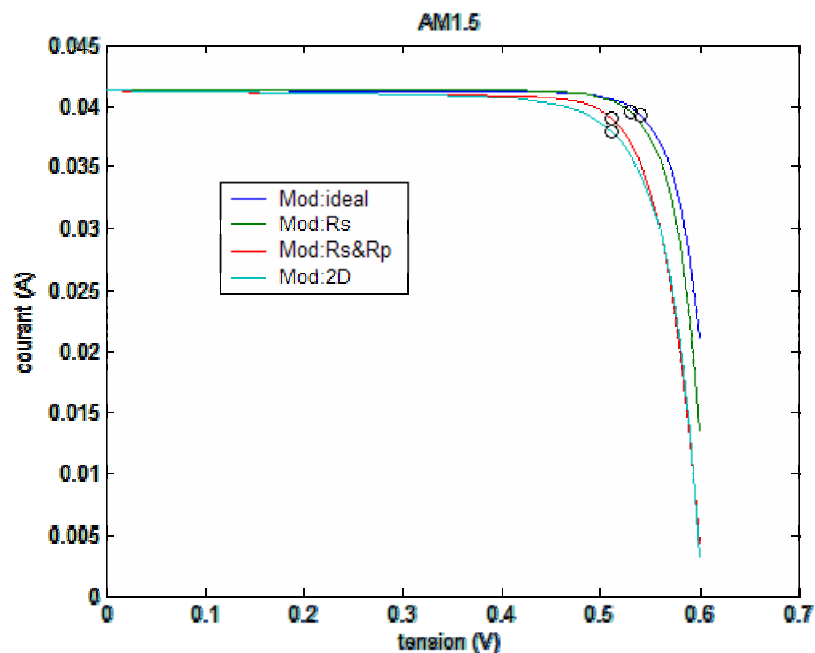


Fig. 3.13 Caractéristique courant tension sous éclairement AM1.5

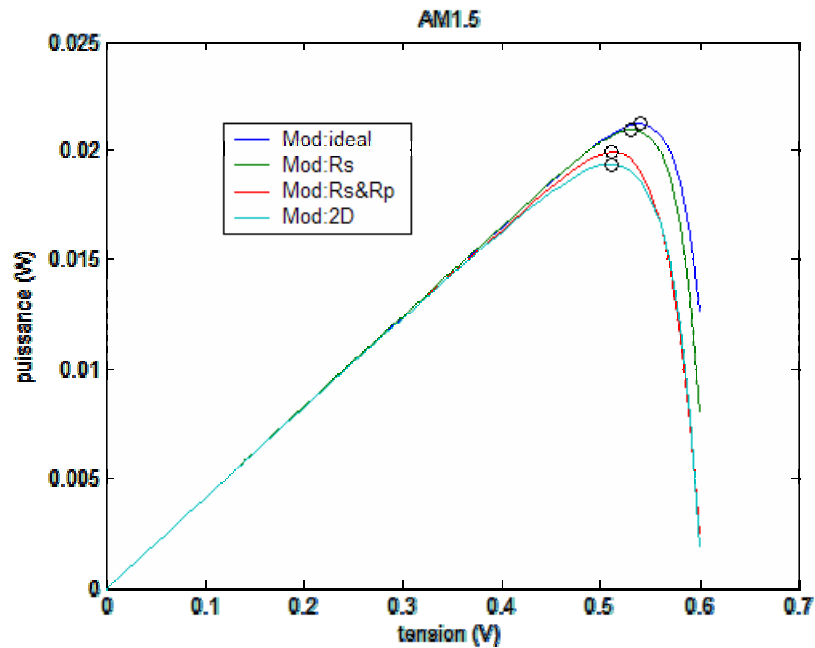


Fig. 3.14 : Caractéristique puissance tension sous éclairement AM1.5

A partir des courbes des figures 3.13 et 3.14 on constate que les quatre modèles du même photogénérateur ne reflètent pas d'une manière identique son comportement qui n'est en réalité qu'un seul face aux mêmes conditions climatiques. La question qui se pose donc est lequel de ces quatre modèles reflète le mieux le comportement réel du photogénérateur ?

Pour évaluer chaque modèle et valider le meilleur, il faut faire référence au data book du photogénérateur dans lequel des mesures pratiques de la firme productrice y sont reportées et ensuite réaliser la comparaison selon l'application en question. Le modèle à une diode semble être le meilleur, néanmoins il reste toujours à parfaire par l'ajustement expérimental de quelques paramètres empiriques.

3.7.2 Effet de la température sur le photogénérateur

Le choix est porté sur le modèle idéal.

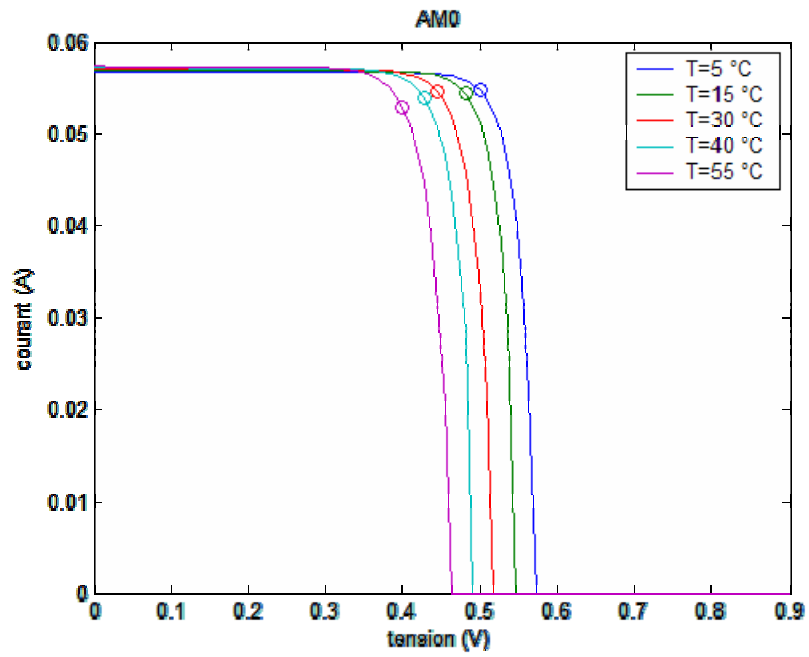


Fig. 3.17 : Caractéristique courant tension sous éclaircment AM0

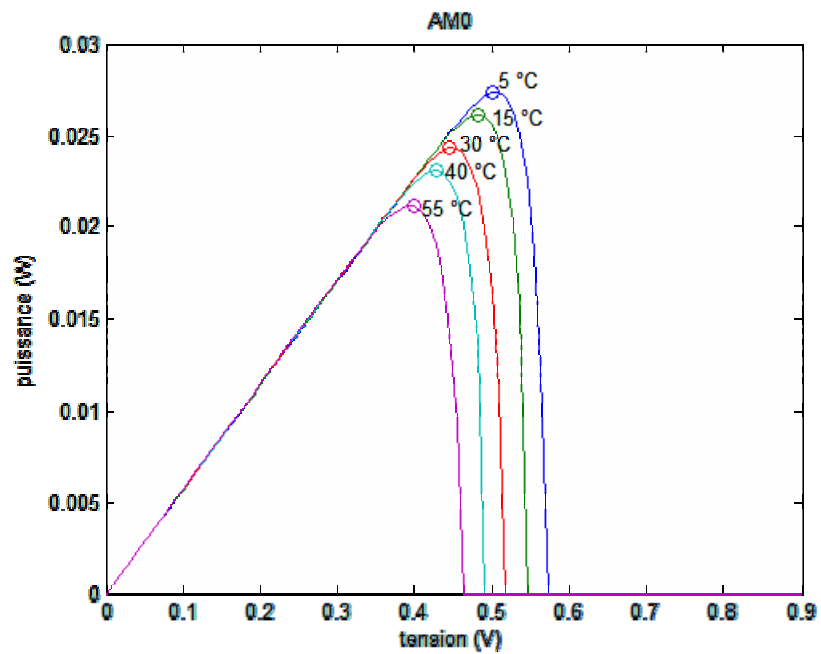


Fig. 3.18 : Caractéristique puissance tension sous éclaircment AM0

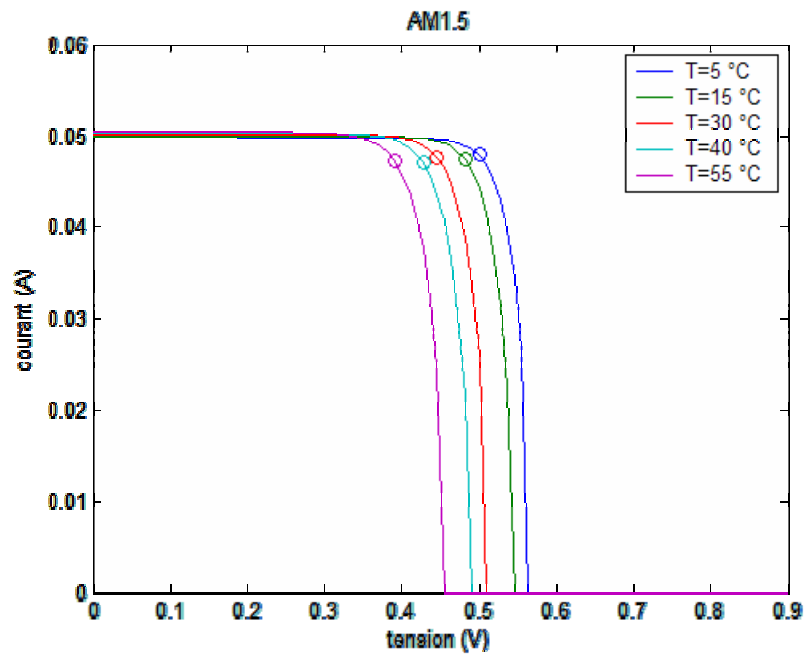


Fig. 3.19 : Caractéristique courant tension sous éclaircment AM1.5

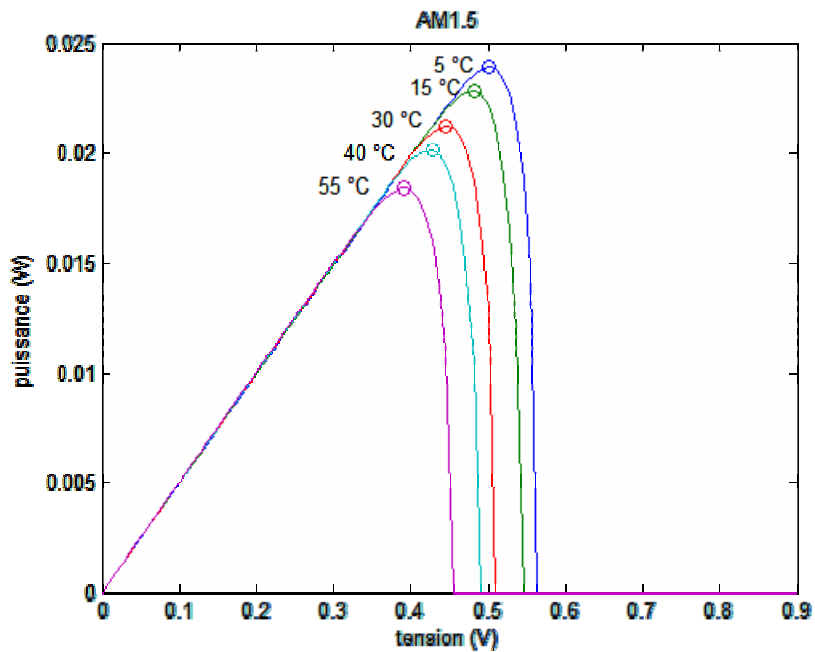


Fig. 3.20 : Caractéristique puissance tension sous éclaircment AM1.5

Puisque les cellules solaires ne fonctionnent pas dans des conditions de température et d'ensoleillement constantes, il est intéressant de savoir leurs réactions à

différentes températures. Plusieurs effets agissent sur le matériau semi-conducteur lorsque la température augmente, qui ont comme conséquence une diminution du rendement global allant jusqu'à 20%, par rapport aux valeurs mesurées au laboratoire. Le rendement des cellules solaires de silicium diminue de 10% quand la température s'élève de 25°C. [34]. Avec l'augmentation de la température la bande passante diminue, ce qui permet au matériau semi-conducteur d'absorber des photons additionnels avec une longueur d'onde plus élevée, c'est-à-dire avec une énergie inférieure.

3.7.3 Effet de la température sur la tension du circuit ouvert

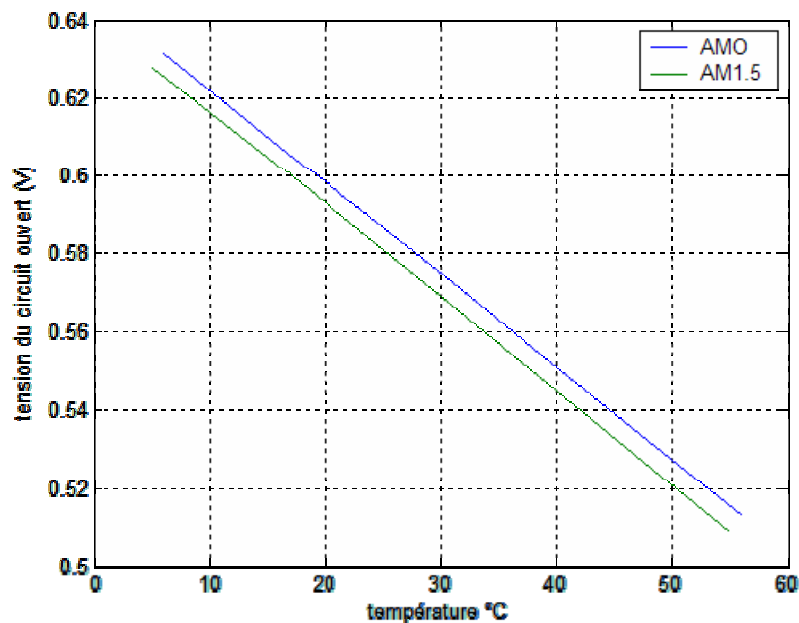


Fig. 3.21 Caractéristique de la tension du circuit ouvert

Pour les deux éclairements AM0 et AM1.5, on constate qu'au fur et à mesure que la température augmente, la tension de circuit ouvert V_{co} diminue, ce qui s'explique par la diminution du gap énergétique.

3.7.4 Effet de la température sur le courant de court circuit

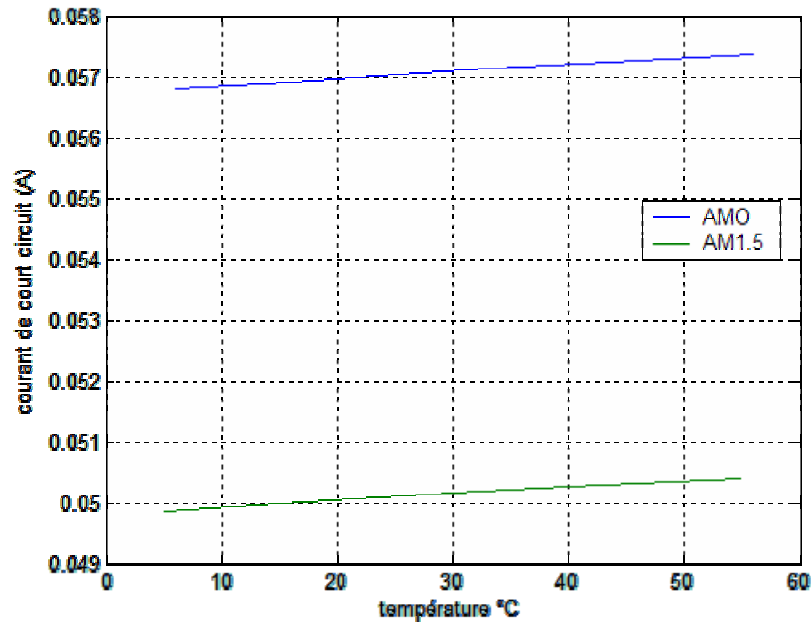


Fig. 3.22 Caractéristique du courant de court circuit

L'augmentation de la température entraîne une faible augmentation du courant de court circuit, ce qui s'explique par une légère amélioration de la réponse spectrale.

3.7.5 Effet de la température sur le facteur de forme

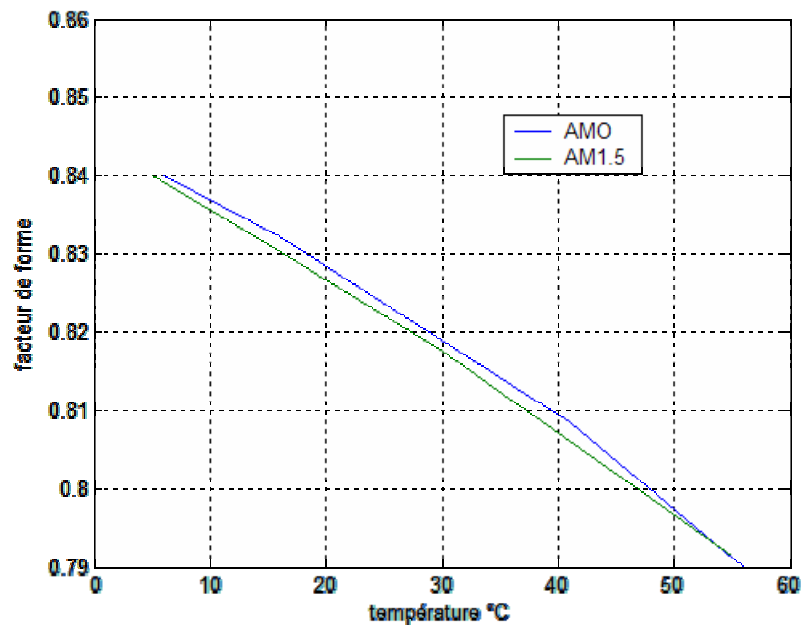


Fig. 3.23 variation du facteur de forme en fonction de la température

Le facteur de forme subit une diminution avec l'augmentation de la température suite à l'augmentation du courant d'obscurité.

3.7.6 Effet de la température sur le rendement énergétique

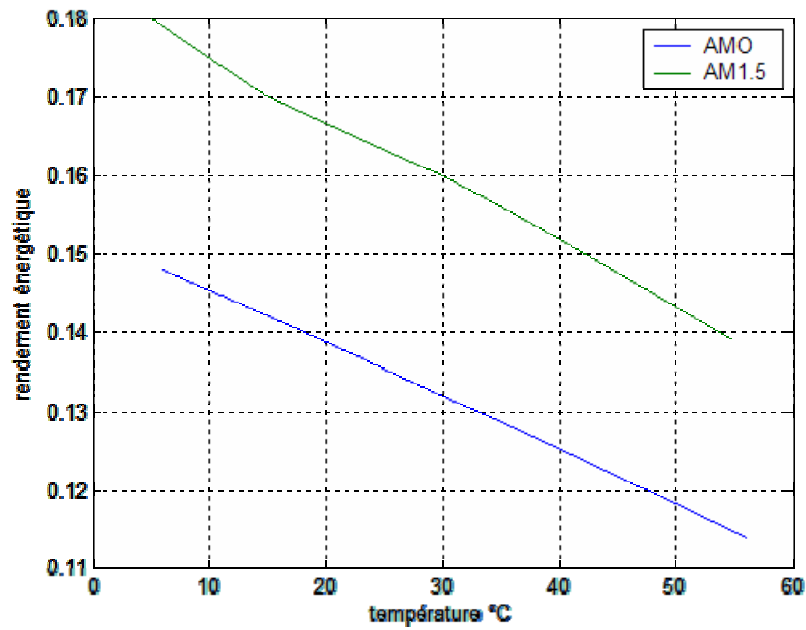


Fig. 3.24 variation du rendement en fonction de la température

Du fait que la diminution de la tension de circuit ouvert V_{co} est plus importante en comparaison avec la légère augmentation du courant de court circuit, le rendement énergétique subit une diminution.

3.8 Etude comparative par erreur quadratique [27][23]

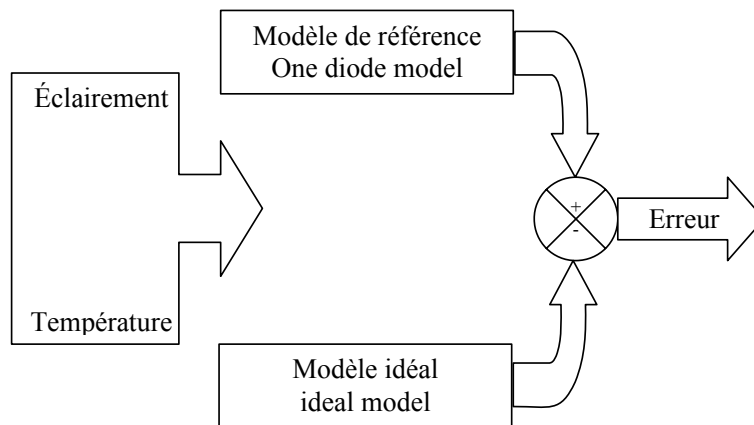


Fig. 3.25. a.

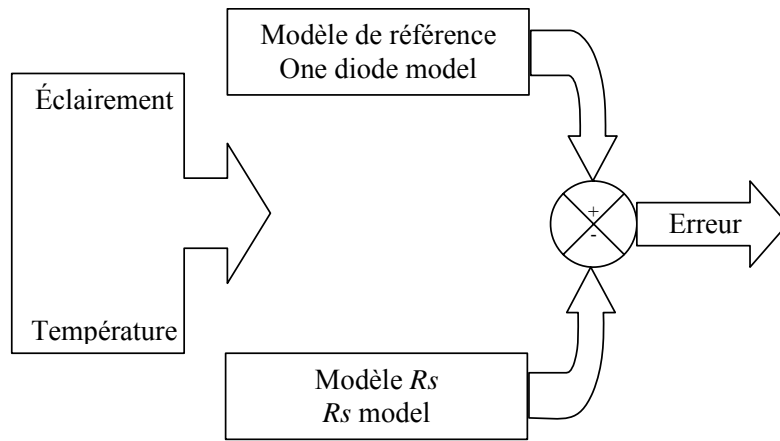


Fig. 3.25. b.

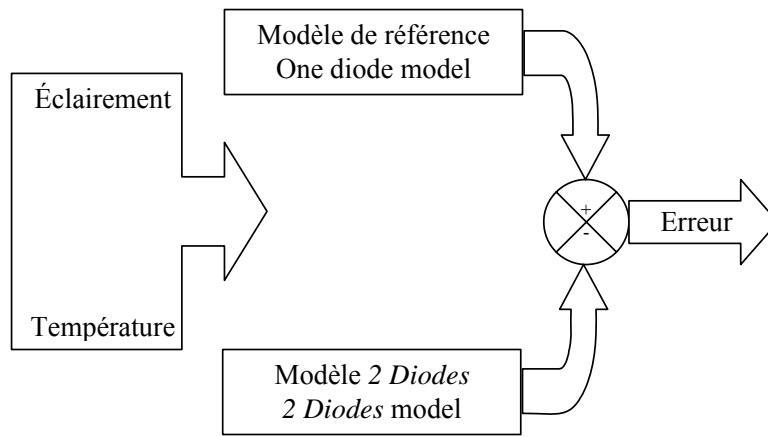


Fig. 3.25. c.

Fig. 3.25 comparaison par modèle de référence

3.8.1 Erreur simple

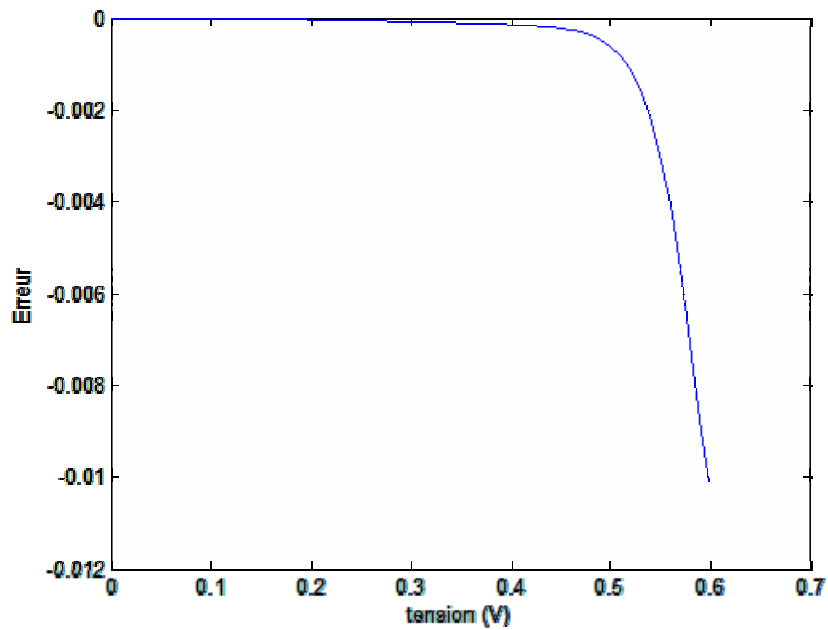


Fig. 3.26 évaluation de l'erreur due au modèle idéal

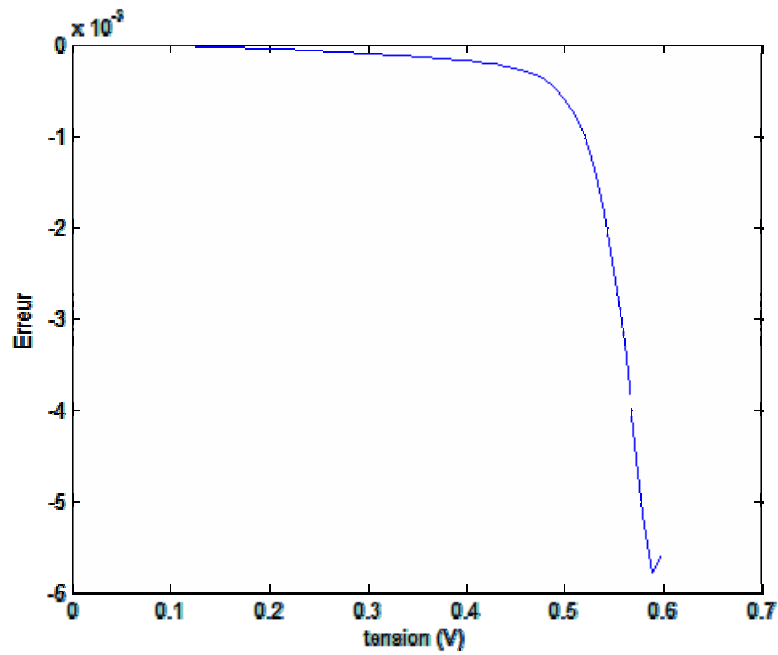


Fig. 3.27 évaluation de l'erreur due au modèle R_s

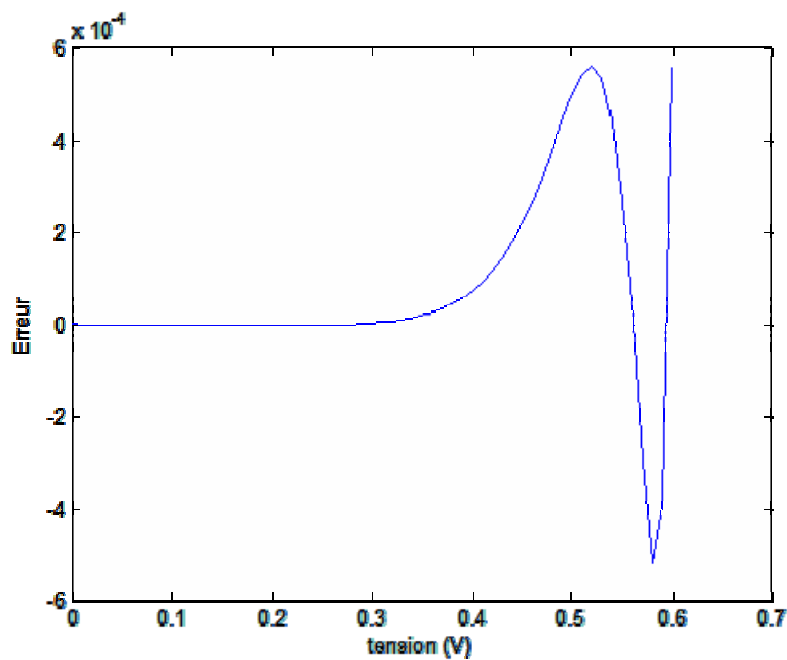


Fig. 3.28 évaluation de l'erreur due au modèle 2 diodes

L'étude comparative entre les modèles nous a conduit à une étude d'erreur permettant de représenter le gap entre les modèles en terme de forme et par conséquent les imperfections de l'un par rapport à l'autre. L'erreur simple a permis la connaissance de l'état caractéristique de chaque modèle en comparaison avec le modèle de référence.

3.8.2 Erreur quadratique

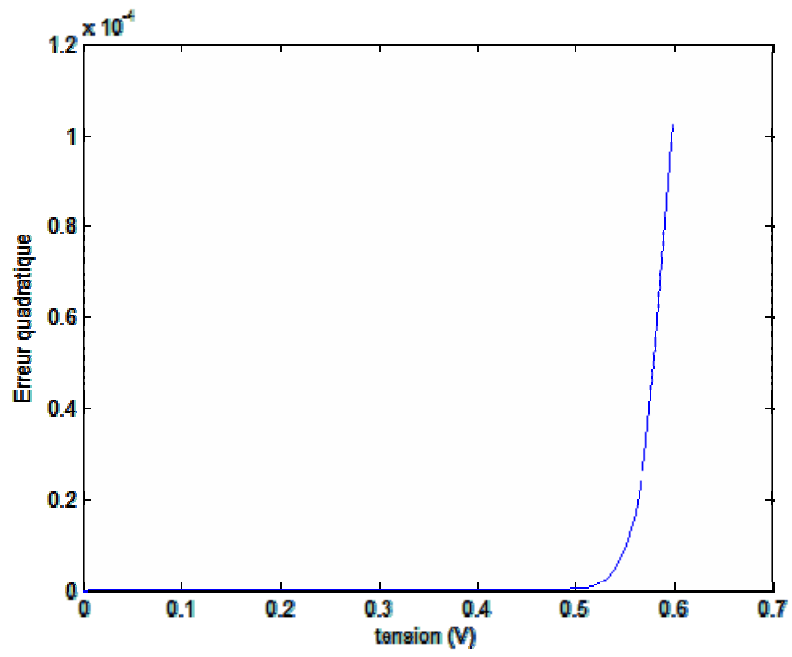


Fig. 3.29 : Erreur quadratique due au modèle idéal

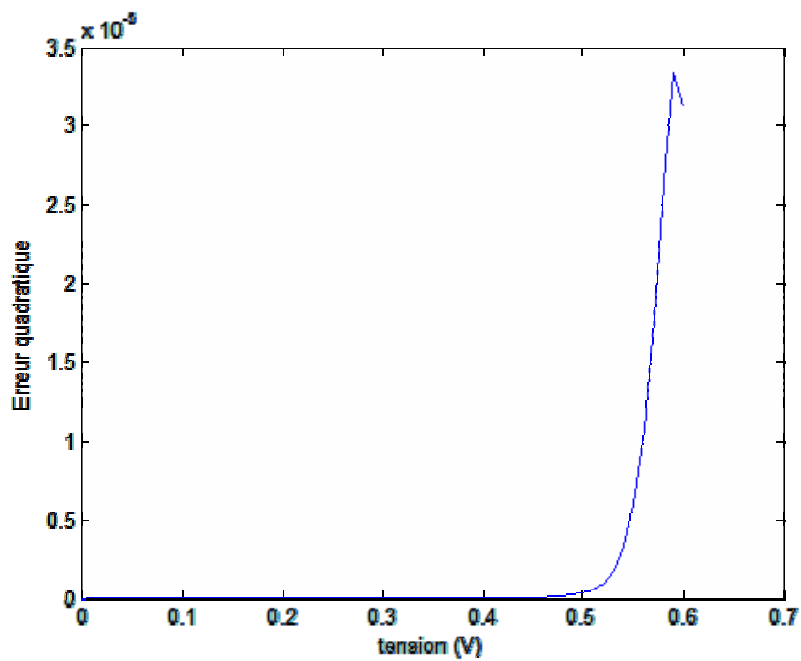


Fig. 3.30 : Erreur quadratique due au modèle R_s

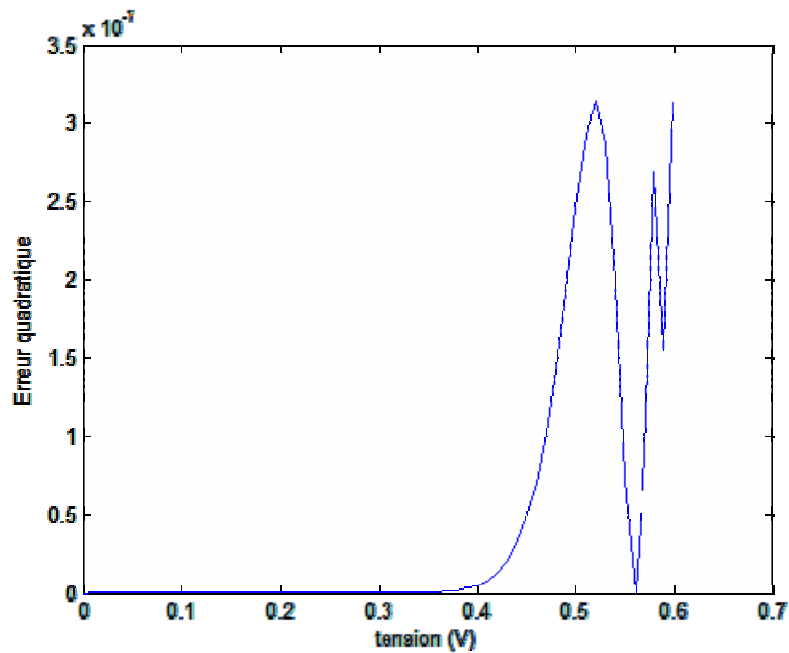


Fig. 3.30 erreur quadratique due au modèle 2 diodes

Cette étude a permis de conclure que pour un problème d'optimisation du point de puissance maximale, les modèles varient l'un par rapport à l'autre dans la zone au voisinage du point de puissance maximale. C'est pourquoi le choix de l'un ou l'autre des modèles altère sensiblement le gap entre le point de puissance maximale réel et celui obtenu par simulation.

3.9 Conclusion

La simulation du comportement de la cellule solaire a été effectuée par rapport au facteur de "l'air mass" qui correspond à son tour à un rayonnement solaire instantané. Nous avons choisi pour cela deux types de spectre solaires. Le premier AM0 correspond à un rayonnement solaire (1360 w/m^2) lors de sa traversée de l'atmosphère avant qu'il subisse les quelques déperditions dues notamment à son absorption partielle par les gaz atmosphériques ainsi que la vapeur d'eau. La température est considérée comme celle d'un environnement ambiant égale à $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Le deuxième AM1.5, correspond aux conditions normalisées STC (Standard Test Conditions) qui sont les conditions dans lesquelles les constructeurs établissent la plaque signalétique (fiche technique) des panneaux solaires.

Malgré que les simulations des modèles sont faites par rapport à tous les points de la courbe $I-V$ et $P-V$, un intérêt spécial est donné au point de puissance maximal MPP qui

représente le point de fonctionnement idéal du photogénérateur, c'est-à-dire le point dont le fonctionnement du système photovoltaïque est effectué sans pertes d'énergie, ce qui est très difficile à réaliser pratiquement.

Dans un système énergétique photovoltaïque, on désire toujours travailler au voisinage du point de puissance maximal MPP, afin de minimiser au maximum les pertes en énergie produite.

Par rapport au modèle idéal, la différence entre les MPPs des deux spectres solaires AM0 et AM1.5 s'élève à 13,21 %.

Dans le modèle avec une résistance série, l'écart est de 13,21 %, ce qui fait que l'effet de la résistance série sur le modèle est négligeable.

Dans le modèle à une diode (résistance série et parallèle) la différence est de l'ordre de 13,20 %. Quant au modèle à deux diodes, l'écart est de 13,19 %.

L'autre comparaison a été faite entre les différents modèles par rapport aux conditions normalisées (STC), où nous avons constaté des différences n'excédant pas les 1%.

L'effet de la température sur le comportement de la cellule est clairement représenté sur les courbes sous un éclairage AM1.5. Notons que lorsque la température augmente, l'énergie photovoltaïque délivrée par le panneau solaire diminue. Elle réalise donc un effet indésirable sur toute la courbe notamment la partie utile (voisinage du MPP) ainsi que sur le point de puissance maximal MPP qui diminue avec son augmentation, ce qui rend le système énergétique photovoltaïque moins performant et réduit par conséquent sa durée de vie. De plus on constate que la tension du circuit ouvert diminue selon le modèle $y = ax + b$ avec une pente négative, à l'opposé du courant de court circuit qui augmente selon le même modèle d'équation $y = ax + b$ mais avec une pente positive.

L'erreur simple réalisée dans cette étude nous renseigne sur les variations point par point des courbes ce qui permet de bien choisir entre les modèles et les impliquer selon l'application. Quant à l'erreur quadratique, elle permet de quantifier cette différence entre les modèles choisis.

THÉORIE DE LA DECISION, MODELISATION ET OPTIMISATION

4.1 Introduction [38] [7] [26]

Dans ce chapitre nous allons essayer de donner un aperçu sur les principales techniques décisionnelles qui font partie du corpus scientifique de la recherche opérationnelle. La principale caractéristique de la recherche opérationnelle est son approche scientifique des problèmes à résoudre. Le début des années cinquante marque aussi le début fulgurant de l'ère des ordinateurs. L'invention des calculateurs hautes performances a propulsé la recherche opérationnelle au rang de science à part entière.

En fait les deux principaux ingrédients de la recherche opérationnelle sont les *mathématiques* et *l'informatique*. Avant l'arrivée de la recherche opérationnelle, les chercheurs notamment les gestionnaires utilisaient leur expérience et leur intelligence pour déduire, souvent par essais et erreurs, des solutions *approximatives* à des problèmes de gestion malheureusement pour eux de plus en plus complexes. Avec l'aide de la recherche opérationnelle on peut toutefois résoudre plusieurs problèmes de façon optimale. Les problèmes à résoudre sont d'abord modélisés par des modèles mathématiques hautement sophistiqués dans lesquels, contraintes et objectifs sont pris en compte de façon exhaustive. Ces modèles sont ensuite résolus par l'exécution sur ordinateur d'algorithmes performants spécialement adaptés au type de modèle sous considération. Les ordinateurs modernes peuvent résoudre des modèles contenant plusieurs milliers de contraintes et de variables de décision en quelques secondes de temps de calcul. Les problèmes de recherche opérationnelle sont ainsi résolus rapidement, précisément et les solutions obtenues peuvent être prouvées optimales.

Un problème d'optimisation est un problème qui consiste à chercher une meilleure solution parmi un ensemble de solutions réalisables.

Dans plusieurs situations pratiques, le chercheur doit prendre des décisions dans un environnement non déterministe où les données, les événements qui affectent directement ses problèmes fluctuent d'un moment à l'autre. De plus, les contraintes à respecter et les objectifs à atteindre sont souvent flous et difficiles à expliciter dans le cadre strict d'un modèle mathématique. Dans de telles situations, les modèles de simulation s'avèrent particulièrement appropriés. Le système réel est simulé en

« laboratoire » et son comportement est ainsi expliqué en fonction de certains paramètres contrôlables. Le chercheur tire de telles situations une meilleure compréhension de la stratégie optimale à adopter.

La recherche opérationnelle est une discipline dont le but est de fournir des méthodes pour répondre à un type précis de problèmes, c'est-à-dire élaborer une démarche universelle pour un type de problème qui aboutit à la ou les solutions les plus efficaces. La particularité de la recherche opérationnelle est que les méthodes proposées sont des démarches rationnelles basées sur des concepts et outils mathématiques.

Généralement, ces méthodes sont employées sur des problèmes tels que leur utilisation "manuelle" devient impossible. C'est pourquoi, du fait qu'elles sont rationnelles, les démarches proposées par la recherche opérationnelle peuvent être traduites en programmes informatiques.

Cette traduction d'une démarche en un programme informatique n'est pas sans difficulté. Car le temps d'exécution du programme ainsi que la place occupée dans la mémoire de l'ordinateur sont deux paramètres à prendre en considération. Par conséquent, toute méthode en recherche opérationnelle sera jugée sur ces critères de temps et de place.

Pour un problème donné, on cherche toujours à avoir un algorithme dit efficace, c'est-à-dire que le temps nécessaire à son exécution ne soit pas trop important.

On mesure l'efficacité d'un algorithme par une expression mathématique qui indique le nombre d'opérations indispensables à l'exécution de l'algorithme en fonction de la taille des données en entrées tout en supposant le pire des cas.

4.2 Programmation Linéaire [7] [26]

4.2.1 Présentation

La programmation linéaire est un outil très puissant de la recherche opérationnelle. C'est un outil générique qui peut résoudre un grand nombre de problèmes. En effet, une fois un problème modélisé sous la forme d'équations linéaires, plusieurs méthodes assurent la résolution du problème de manière exacte. On distingue dans la programmation linéaire, la programmation linéaire en nombre réels, pour laquelle les variables des équations sont dans \mathbb{R}^+ et la programmation en nombres entiers, pour

laquelle les variables sont dans N . Bien entendu, il est possible d'avoir les deux en même temps. Cependant, la résolution d'un problème avec des variables entières est nettement plus compliquée qu'un problème en nombre réels.

Une des méthodes les plus connues pour résoudre des programmes linéaires en nombre réel est la méthode du Simplex. En théorie, elle a une complexité non polynomiale et est donc supposée peu efficace. Cependant, en pratique, il s'avère au contraire qu'il s'agit d'une bonne méthode.

La programmation linéaire permet la résolution d'un programme linéaire. Un programme linéaire est un système d'équations ou d'inéquations appelées "contraintes" qui sont linéaires (c'est-à-dire que les variables ne sont pas élevées au carré, ne servant pas d'exposant, ne sont pas multipliées entre elles ... etc.). Et à partir de ces contraintes, on doit optimiser une fonction également linéaire appelée objectif.

Un programme linéaire est un problème qui consiste à trouver un extremum (maximum ou minimum) d'une fonction linéaire de plusieurs variables dite fonction économique (cost function), ces variables devant en outre vérifier un système d'équations et/ou d'inéquations linéaires (contraintes).

4.2.2 Forme Canonique

La forme canonique d'un programme linéaire est telle que :

- 1- La fonction économique est en maximisation,
- 2- Les contraintes comprennent :
 - Des inéquations de la forme "fonction des variables \leq constante" (contraintes propres).
 - Des conditions de positivité sur toutes les variables (contraintes impropres).

c'est-à-dire, pour un programme linéaire à n variables x_j et à m contraintes propres :

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \text{ Fonction économique.} \quad (4.1)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad i = 1 \dots m \text{ Contraintes propres.} \quad (4.2)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1 \dots n \text{ Contraintes impropres.} \quad (4.3)$$

4.2.3 Propriétés

Tout programme linéaire peut être mis sous forme canonique:

1. Pour passer de minimisation en maximisation:

$$\min z = - \max (-z) \quad (4.4)$$

2. Pour supprimer une équation:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j = b_i \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \\ \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \end{cases} \quad (4.5)$$

3. Pour changer de sens une inéquation:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq b_i \Leftrightarrow \sum_{j=1}^n (-a_{ij}) x_j \leq (-b_i) \quad (4.6)$$

4. Pour changer de signe pour une variable:

$$x_j \leq 0 \Leftrightarrow x'_j = -x_j \geq 0 \quad (4.7)$$

5. Pour supprimer une variable sans condition de signe :

$$x_j = x'_j - x''_j \text{ avec } x'_j \geq 0 \text{ et } x''_j \geq 0 \quad (4.8)$$

4.2.4 Solution du problème

1. Une solution admissible est une solution qui vérifie toutes les contraintes.
2. Une solution optimale est une solution pour laquelle, parmi les solutions admissibles, la fonction économique atteint sa valeur maximale.

4.2.5 Forme standard d'un programme linéaire

La forme *standard* d'un programme linéaire est telle que :

1. la fonction économique est en maximisation,
2. les contraintes comprennent :
 - des *équations* (les contraintes *propres*)
 - des *conditions de positivité* sur toutes les variables (contraintes *impropres*)

Tout programme linéaire peut être mis sous forme standard : en effet, on considère le programme sous forme canonique (n variables, m contraintes propres) et on introduit les *variables d'écart*.

$$x_{n+1} = b_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad i = 1, \dots, m \quad (4.9)$$

Le programme linéaire s'écrit:

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad \text{Fonction économique} \quad (4.10)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + x_{n+1} = b_i \quad i = 1, \dots, m \quad \text{Contraintes propres} \quad (4.11)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.12)$$

$$x_{n+1} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \quad \text{Contraintes impropres} \quad (4.13)$$

4.2.6 Solution de base

Soit un programme linéaire sous forme standard:

$$\max z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (4.14)$$

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + x_{n+1} = b \quad i = 1, \dots, m$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (4.15)$$

$$x_{n+1} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m$$

avec ($n + m$ variables, m contraintes propres)

Une solution de base est telle que:

- elle vérifie les contraintes propres.
- n variables ont la valeur 0.

Les n variables nulles sont les *variables hors base*, les m autres sont les *variables de base*.

4.2.7 Applications

4.2.7.1 Cas particulier des Problèmes de Transport

m usines (points de production) fournissent un certain produit à n clients (points de consommation). L'usine i ($i = 1, \dots, m$) produit a_i unités et le client j ($j = 1, \dots, n$) réclame b_j unités. Le coût unitaire de transport de l'usine i au client j est c_{ij} .

$$\begin{array}{c}
 \text{(Usine)} \\
 \left[\begin{array}{cccccc}
 c_{11} & c_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{1n} \\
 c_{21} & c_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{2n} \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\
 c_{m1} & c_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & c_{mn}
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{(client)} \\
 \left[\begin{array}{c}
 a_1 \\
 a_2 \\
 \cdot \\
 \cdot \\
 a_m
 \end{array} \right]
 \end{array}
 \begin{array}{c}
 \text{(Disponibilité)} \\
 \left[\begin{array}{cccccc}
 b_1 & b_2 & \cdot & \cdot & \cdot & b_n
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

avec $\sum_i a_i = \sum_j b_j$

Le problème consiste à trouver la répartition des expéditions x_{ij} (quantité transportée de i vers j) qui écoule la production et satisfait la demande, tout en rendant minimum le coût total du transport.

$$\begin{aligned}
 & \min \sum_{ij} c_{ij} x_{ij} \\
 & \sum_j x_{ij} = a_i \quad i = 1, \dots, m \\
 & \sum_i x_{ij} = b_j \quad j = 1, \dots, n \\
 & x_{ij} \geq 0, \quad \forall i, \forall j
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

4.2.7.2 Cas particulier des problèmes de planification de la production [8]

Une entreprise fabrique 2 produits X et Y. Pour sa conception, chaque produit fini nécessite 3 produits intermédiaires A, B et C. Pour fabriquer un produit X, on a besoin de 2 produits A, de 2 produits B et de 1 produit C. De même, pour fabriquer un produit Y, on a besoin de 3 produits A, de 1 produit B et de 3 produits C. En outre, l'entreprise dispose d'une quantité limitée de produits A, B et C. Elle a 180 produits A, 120 produits B et 150 produits C. Sachant que le prix de revient de X est de 3 DA et que celui de Y est de 4 DA, combien de produits X et Y faut-il fabriquer pour maximiser le profit ?

Ce problème est modélisé par un programme linéaire. Soit x et y les quantités de produits X et Y fabriqués.

La quantité totale de produits A utilisée est $2x + 3y$. Cette quantité ne doit pas dépasser 180, d'où la première contrainte.

$$2x + 3y \leq 180 \tag{4.17}$$

De même, pour les produits B et C, on obtient :

$$\begin{cases} 2x + y \leq 120 \\ x + 3y \leq 150 \end{cases} \tag{4.18}$$

Bien entendu, les quantités x et y sont positives,

$$x, y \geq 0 \tag{4.19}$$

Enfin, on tente de maximiser le profit qui est le total des bénéfices sur la vente des produits X plus celui des produits Y.

$$\max : 3x + 4y \quad (4.20)$$

Le programme linéaire est donc comme suit :

$$\max : z = 3x + 4y \quad (4.21)$$

sous :

$$\begin{cases} 2x + 3y \leq 180 & (A) \\ 2x + y \leq 120 & (B) \\ x + 3y \leq 150 & (C) \\ x, y \geq 0 \end{cases} \quad (4.22)$$

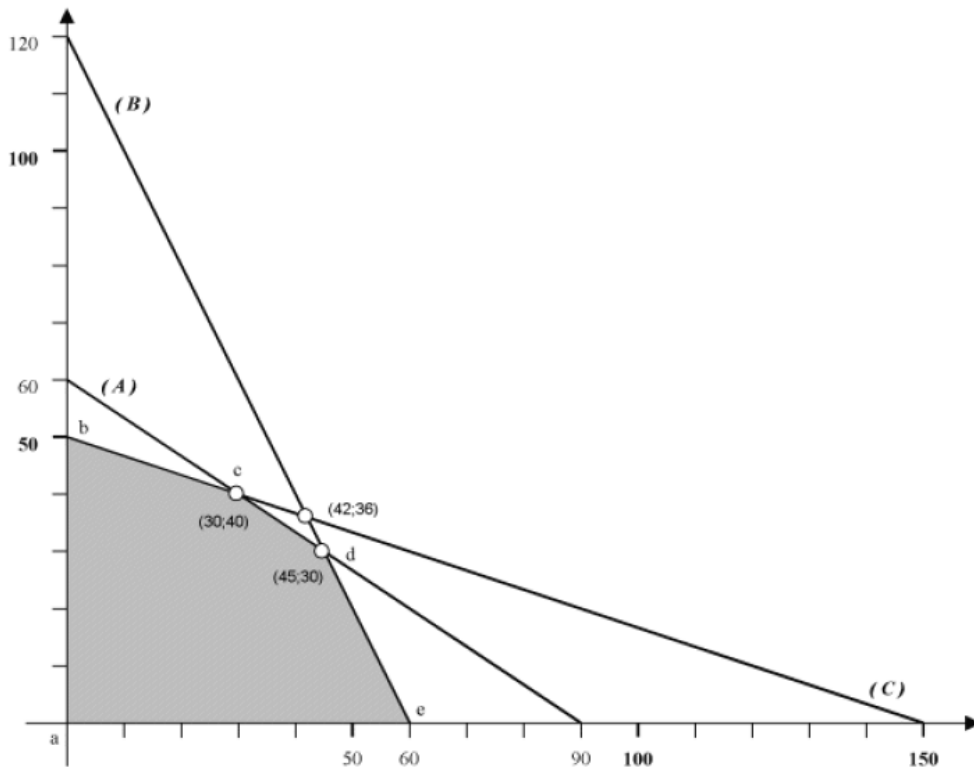


Fig. 4.1 Représentation bidimensionnelle du problème

Les solutions admissibles sont représentées par la zone grisée (a, b, c, d, e). Ce sont les solutions qui satisfont les contraintes. Considérons maintenant la fonction $z = 3x + 4y$. Pour $z = 120$, on a une droite D_1 $3x + 4y = 120$, qui représente les solutions pour lesquelles le profit vaut 120. Si $z = 180$, on a une autre droite D_2 , $3x + 4y = 180$, qui représente les solutions pour lesquelles le profit vaut 180.

On remarque que **D1** est parallèle à **D2** et on s'aperçoit facilement qu'en déplaçant la droite vers le haut on augmente le profit de z . Donc pour résoudre graphiquement le problème, on va faire glisser la droite vers le haut jusqu'à ce qu'elle ait un minimum de points commun avec la surface grisée. Le point restant dans ce cas est d. Il représente la solution pour laquelle le profit est maximum. En effet, si on prend un profit plus important, représenté par exemple par **D4**, on s'aperçoit que toutes les solutions sont en dehors de la surface grisée. Donc la solution du problème est de produire 45 produits X et 30 produits Y pour obtenir le profit maximum de $z = 3x + 4y = 255$ DA

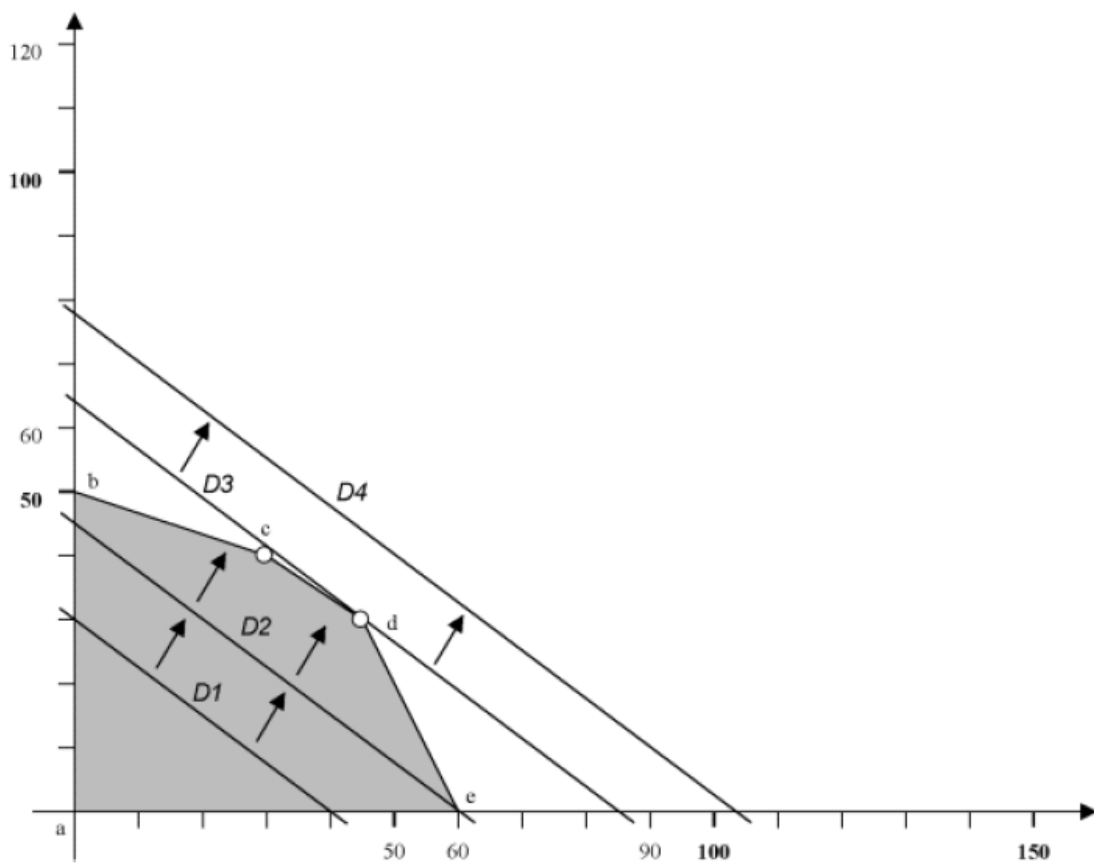


Fig. 4.2 Solution graphique du problème

4.2.8 Les méthodes numériques

Dans le cas général, le seul algorithme utilisé en pratique est l'algorithme du simplexe, sous sa forme soit primale soit duale. Le plus courant est l'algorithme primal du simplexe (méthode de Dantzig). Cependant l'algorithme dual du simplexe (méthode de Lemke) est préférable (du point de vue du volume des calculs) dans le cas où le nombre de contraintes est élevé par rapport au nombre de variables.

Lorsque le programme linéaire à résoudre est un problème de transport, l'algorithme, le meilleur, est une variante de l'algorithme primal du simplexe adapté à ce type de problème: La méthode de Chames et Cooper.

4.2.8.1 Méthode du Simplex [7]

Globalement, la méthode du simplexe consiste à se déplacer le long de la zone (a, b, c, d, e), de sommet en sommet jusqu'à trouver le meilleur point. Pour mieux comprendre cette méthode, appliquons la au cas de production précédent. Premièrement, les contraintes sont ramenées à des égalités en introduisant de nouvelles variables de la manière suivante :

$$\max : z = 3x + 4y \quad (4.23)$$

sous :

$$\begin{cases} 2x + 3y = 180 - u & (A) \\ 2x + y = 120 - v & (B) \\ x + 3y = 150 - w & (C) \\ x, y, u, v, w \geq 0 \end{cases} \quad (4.24)$$

Ensuite, on va se placer sur le point $a = (0 ; 0)$ qui est une solution admissible du problème. Dans un cas plus général, il faut noter que trouver une solution admissible pour démarrer la méthode du Simplex n'est pas forcément évident. On a alors :

$$\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} u = 180 \\ v = 120 \\ w = 150 \end{cases} \quad (4.25)$$

En regardant $z = 3x + 4y$, on s'aperçoit que la moindre augmentation de x ou de y augmente le profit z . Donc on va augmenter l'une des deux variables au maximum. Par

exemple, prenons y et utilisons les contraintes pour exprimer y en fonction de toutes les autres variables.

$$\begin{cases} y = 60 - \frac{1}{3}u - \frac{2}{3}x & y \leq 60 & (A) \\ y = 120 - v - 2x & y \leq 120 & (B) \\ y = 50 - \frac{1}{3}w - \frac{1}{3}x & y \leq 50 & (C) \end{cases} \quad (4.26)$$

Comme toutes les variables sont positives, on peut en déduire, à partir de chaque contrainte, une borne maximum pour y . Cette dernière doit satisfaire les trois contraintes. Ici la plus grande valeur de y possible est 50. À l'aide de la contrainte C, on remarque que x doit rester à 0 et que w est forcé à 0. Maintenant, les variables nulles sont x et w . Quant aux autres variables, on s'arrange pour les exprimer uniquement avec x et w de manière à obtenir leur valeur. On fait de même pour le profit z .

$$\begin{cases} y = 50 - \frac{1}{3}x - \frac{1}{3}w = 50 & (C) \\ u = 180 - 2x - 3y = 30 - x + w = 30 & (A) \\ v = 120 - 2x - y = 70 - \frac{5}{3}x + \frac{1}{3}w = 70 & (B) \end{cases} \quad (4.27)$$

$$x = 0$$

$$w = 0$$

$$z = 3x + 4y = 200 + \frac{5}{3}x - \frac{4}{3}w = 200$$

On se trouve donc au point $b = (x; y) = (0; 50)$ avec un profit $z = 200$.

Maintenant, on reprend le même raisonnement que pour le point $a = (0; 0)$. Le profit est exprimé par $z = 200 + \frac{5}{3}x - \frac{4}{3}w$. En augmentant x , on augmente le profit. On regarde de combien on peut augmenter x .

$$\begin{cases} x = 30 - u + w & x \leq 30 & (A) \\ x = \frac{3}{5}(70 - v + \frac{1}{3}w) = 42 - \frac{3}{5}v + \frac{1}{5}w & x \leq 42 & (B) \\ y = 3(50 - y - \frac{1}{3}w) = 150 - 3y - w & x \leq 150 & (C) \end{cases} \quad (4.28)$$

Ici, on prendra $x = 30$, la valeur maximum qu'il peut atteindre. Les variables qui sont nulles sont u et w d'après la contrainte A. on calcule les nouvelles valeurs des autres variables.

$$\begin{cases} x = 30 - u + w = 30 & (A) \\ v = 70 - \frac{5}{3}(30 - u + w) + \frac{1}{3}w = 20 + \frac{5}{3}u - \frac{4}{3}w = 20 & (B) \\ y = 50 - \frac{1}{3}(30 - u + w) - \frac{1}{3}w = 40 + \frac{1}{3}u - \frac{2}{3}w = 40 & (C) \end{cases} \quad (4.29)$$

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ w &= 0 \\ z &= 200 + \frac{5}{3}(30 - u + w) - \frac{4}{3}w = 250 - \frac{5}{3}u + \frac{1}{3}w = 250 \end{aligned}$$

On se trouve donc au point $c = (x; y) = (30; 40)$ avec un profit $z = 250$.

On recommence encore une fois le même raisonnement. Le profit est exprimé par $z = 250 - \frac{5}{3}u + \frac{1}{3}w$. En augmentant w , on augmente le profit. On regarde de combien on peut augmenter w .

$$\begin{cases} w = -30 + x + u & w \geq -30 & (A) \\ w = \frac{3}{4}(20 + \frac{5}{3}u - v) = 15 + \frac{5}{4}u - \frac{3}{4}v & w \leq 15 & (B) \\ w = \frac{3}{2}(40 - y + \frac{1}{3}u) = 60 - \frac{2}{3}y + \frac{1}{2}u & w \leq 60 & (C) \end{cases} \quad (4.30)$$

Ici, on prendra $w = 15$, la valeur maximum qu'il peut atteindre. Les variables qui sont nulles sont u et v d'après la contrainte B. on calcule les nouvelles valeurs des autres variables.

$$\begin{cases} w = 15 + \frac{5}{4}u - \frac{3}{4}v = 15 & (B) \\ x = 30 - u + (15 + \frac{5}{4}u - \frac{3}{4}v) = 45 + \frac{1}{4}u - \frac{3}{4}v & = 45 & (A) \\ y = 40 + \frac{1}{3}u - \frac{2}{3}(15 + \frac{5}{4}u - \frac{3}{4}v) = 30 - \frac{1}{2}u + \frac{1}{2}v & = 30 & (C) \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned} u &= 0 \\ v &= 0 \\ z &= 250 - \frac{5}{3}u + \frac{1}{3}(15 + \frac{5}{4}u - \frac{3}{4}v) = 255 - \frac{5}{4}u - \frac{1}{4}v = 255 \end{aligned}$$

On se trouve donc au point $d = (x; y) = (45; 30)$ avec un profit $z = 255$.

On reprend encore une fois le même raisonnement. Le profit est exprimé par $z = 255 - \frac{5}{4}u - \frac{1}{4}v$. Ni u , ni v ne permettent d'augmenter le profit z . Cela signifie que l'on a obtenu le profit maximum. La solution recherchée est alors représentée par d le point courant. On aboutit bien à la même conclusion que par la représentation graphique. Il faut produire 45 produits X et 30 produits Y pour obtenir un profit maximum de 255 DA.

4.3 Programmation dynamique [38]

Les problèmes d'optimisation dynamique ont des applications importantes aussi bien dans l'industrie qu'en gestion. Il s'agit de minimiser le coût d'une trajectoire dans un espace d'états. On dispose d'une loi d'évolution, qui détermine l'état suivant à partir de l'état courant et d'une "commande"; les trajectoires sont construites à partir d'un état initial et d'une suite de commandes. Suivant cette loi d'évolution, on se donne également une fonction d'objectif, définie sur les trajectoires, qu'il s'agit de minimiser. La *programmation dynamique* est une méthode de résolution, pour les problèmes qui satisfont au principe d'optimalité de Bellman : une sous trajectoire d'une trajectoire optimale est elle-même optimale pour la fonction objectif restreinte aux trajectoires ayant pour origine celle de cette sous trajectoire. Ce principe permet une méthode de résolution ascendante, qui détermine une solution optimale d'un problème à partir des solutions de tous les sous problèmes.

Une approche descendante pourrait être tentée : à partir du problème initial, générer ses sous problèmes, les résoudre récursivement, et déterminer la trajectoire optimale à partir des trajectoires optimales obtenues pour les sous problèmes. Cette approche conduit en général à la génération d'un nombre exponentiel de sous problèmes (par exemple, 2 à la première étape, 4 à la seconde, ..., 2^n à la $n^{\text{ième}}$ étape) ; cependant, quand l'ensemble des sous problèmes a une taille inférieure à cette estimation du nombre de sous problèmes générés, les sous problèmes générés ne peuvent pas être tous distincts. Par exemple, pour le problème "trouver le plus court chemin entre deux sommets d'un graphe", quand le graphe a n sommets, il y a n^2 sous problèmes "trouver le plus court chemin de u à v ", pour chaque couple $(u ; v)$ de sommets. Pourtant, à chaque étape, il faudrait générer $2n$ sous problèmes, "trouver le plus court chemin de u à w " et

"trouver le plus court chemin de w à v ", pour chacun des n sommets du graphe. Dans ces situations, un même sous problème sera résolu plusieurs fois.

4.3.1 Processus de décision séquentiel (PDS)

Les domaines d'application de la programmation dynamique varient de la gestion d'un inventaire, conduite automobile, pilotage d'un avion (pilotage automatique), au contrôle d'un robot, ... etc.

- On a une suite de décisions à prendre, avec un objectif à optimiser.
- Il y a des liens (interactions) entre les décisions.
- Souvent, on n'a pas toute l'information d'un seul coup, mais l'information arrive au fur et à mesure que le système évolue, et il y a des aléas dans cette évolution entre les prises de décision.

4.3.2 Concept de la programmation dynamique

Il est basé sur un ensemble d'outils mathématiques et algorithmiques permettant d'étudier les processus de décision séquentiels et de calculer éventuellement des stratégies optimales.

Une politique est une règle de prise de décisions qui, pour chaque situation possible (état du système), nous dit quelle est la décision (ou action) à prendre dans le but d'optimiser une fonction objective globale.

Souvent, la fonction "objectif" est une espérance mathématique. Parfois, on pourra caractériser la politique optimale par des théorèmes (théorie) ; souvent, on pourra la calculer, ou en calculer une approximation ; dans certains cas la résolution sera trop difficile.

4.3.3 Un modèle de PDS déterministe

Un système évolue par étapes.

A l'étape k , le système est dans un état $x_k \in X_k$.

Un décideur observe x_k et choisit une décision (action) $u_k \in U_k(x_k)$. Il paye un coût $g_k(x_k; u_k)$ pour cette étape, puis le système transite dans un nouvel état $x_{k+1} = f_k(x_k; u_k)$ à l'étape $k + 1$.

à l'étape k , on a donc :

x_k : espace d'états,

$U_k(x)$: ensemble des décisions admissibles dans l'état x ,

g_k = fonction de coût,

f_k = fonction de transition,

x_k = état du système à l'étape k ,

u_k = décision prise à l'étape k .

On veut minimiser la somme des coûts de l'étape 0 à l'étape N :

$$\min g_N(x_N) + \sum_{k=0}^{N-1} g_k(x_k, u_k) \quad (4.32)$$

$$u_k \in U_k(x_k) \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (4.33)$$

$$x_{k+1} = f_k(x_k; u_k) \quad k = 0, \dots, N - 1 \quad (4.34)$$

x_0 fixé

On peut illustrer cela par un arbre de décision.

Les fonctions g_k et f_k peuvent être non linéaires et compliquées.

Ainsi, en général, on n'a pas un problème de programmation linéaire.

Si $g_k(x_k; u_k)$ est un *revenu* au lieu d'un coût, on remplace "min" par "max" (ou "inf" par "sup").

4.3.4 Algorithme de Bellmann-Ford [8]

L'algorithme de Bellman-Ford résout le problème des plus courts chemins avec origine unique dans le cas le plus général où les poids des arcs peuvent avoir des valeurs négatives. Étant donné un graphe orienté pondéré $G = (V, E)$, de fonction de poids w , et une origine s , l'algorithme retourne une valeur booléenne indiquant s'il existe un circuit de poids négatif accessible depuis s . S'il n'en existe pas, l'algorithme donne les plus courts chemins ainsi que leurs poids.

L'algorithme de Bellman-Ford trouve le plus court chemin avec origine unique, y compris dans le cas général où les arcs sont munis de poids négatifs. S'il n'y a pas de circuit de poids négatif, l'algorithme de Bellman-Ford retourne vrai, et sinon il retourne faux : en effet, dans ce cas, il n'existe pas de plus court chemin à partir de l'origine.

Le principe de l'algorithme est le suivant :

```
    Booléen Bellman_Ford( G, s)
initialisation ( G, s) // les poids de tous les sommets sont mis à +infini
    // le poids du sommet initial à 0 ;
pour i=1 jusqu'à Nombre de sommets -1 faire
    / pour chaque arc (u, v) du graphe faire
    / /  $p_{aux} := poids(u) + poids(arc(u, v));$ 
    / / si  $p_{aux} < poids(v)$  alors
    / / /  $pred(v) := u ;$ 
    / / /  $poids(v) := p_{aux};$ 
        pour chaque arc (u, v) du graphe faire
        / si  $poids(u) + poids(arc(u, v)) < poids(v)$  alors
        / retourner faux
retourner vrai
```

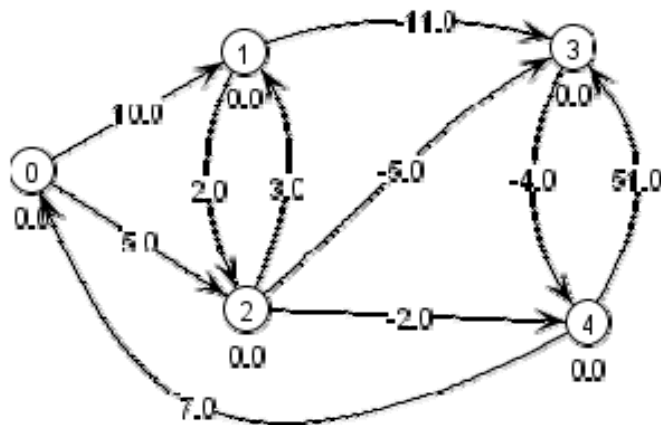


Fig. 4.3 Graphe avant l'application de l'algorithme Bellmann-Ford

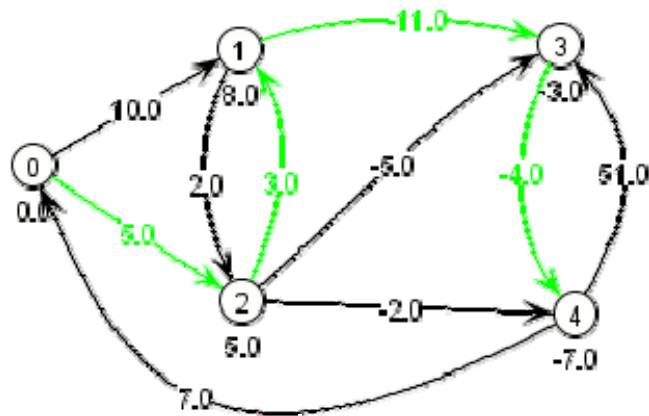


Fig.4.4 Graphe après l'application de l'algorithme Bellman-Ford

4.4 Conclusion

La programmation linéaire est une procédure qu'on suit pour maximiser ou minimiser une quantité particulière, dite fonction objective, qui dépend d'un nombre fini de variables. Ces variables peuvent ou ne pas être indépendantes l'une de l'autre, et sont sujets dans la plupart des cas à des conditions ou limitations dites contraintes.

Une programmation dynamique est basée sur le principe d'optimalité de R. Bellman qui dit qu'une politique est optimale lorsque quelque soit l'état et les décisions initiaux, les décisions restantes doivent constituer une politique optimale en termes de l'état résultant de la première décision.

Néanmoins, cette technique permet de nombreux avantages :

- Très flexible. Il est facile d'ajouter des contraintes, d'incorporer des fonctions quelconques.
- Fournit une solution globalement optimale.
- Fournit non seulement une solution optimale, mais un ensemble de solutions optimales à chaque étape intermédiaire et pour tous les états possibles. Ainsi, il est possible d'utiliser les résultats dans les situations où des modifications du système mènent à des changements d'état imprévisibles.
- Permet de traiter des problèmes stochastiques.
- S'adapte à des situations où le temps, les états et les décisions varient continuellement. Mais là, c'est un peu plus complexe.

Cependant, la programmation dynamique laisse apparaître quelques inconvénients :

- Ne s'applique que sous les hypothèses d'additivité et d'amnésie (le passé n'influence pas le futur).
- Parfois lent et donc inefficace.
- Ne se prête pas bien à la ré-optimisation, contrairement à la programmation linéaire.

OPTIMISATION DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

5.1. Introduction à l'Optimisation

L'optimisation est le processus de rendre quelque chose meilleure. L'ingénieur ou le scientifique créateur de nouvelles idées utilise le processus d'optimisation pour améliorer ses idées. Un ordinateur est considéré comme étant l'outil parfait pour l'optimisation aussi longtemps que l'idée ou la variable influençant l'idée peut être implémentée électroniquement. Il suffit de faire entrer à l'ordinateur quelques données et on obtiens après traitement une solution. Est ce la seule solution? Souvent elle ne l'est pas. Est ce la meilleure solution? C'est une question difficile. L'optimisation est l'outil mathématique sur lequel nous comptons pour répondre à ces questions.

5.1.1 Obtention de la Meilleure Solution

Le terme "Meilleure" solution implique qu'il y a plus d'une solution et que ces solutions n'ont pas la même valeur. La définition du terme "Meilleure" est relative au problème lui même, à sa méthode de résolution, et aux tolérances permises. Ainsi la solution optimale dépend de la personne formulant le problème.

5.1.2 C'est quoi l'Optimisation?

Dans la vie courante, nous sommes fréquemment confrontés à des problèmes d'"optimisation" plus ou moins complexes. Cela peut commencer au moment où l'on tente de ranger son bureau, de placer son mobilier, et aller jusqu'à un processus industriel, par exemple pour la planification des différentes tâches. Ces problèmes peuvent être exprimés sous la forme générale d'un "problème d'optimisation". On définit alors une fonction objectif (fonction de coût ou fonction profit), que l'on cherche à optimiser (minimiser ou maximiser) par rapport à tous les "paramètres" (ou degrés de liberté) concernés. Une telle fonction objectif présente généralement un grand nombre de solutions non optimales (typiquement de l'ordre de $exp(N)$, si l'on désigne par N le nombre de degrés de liberté du problème). Dans la littérature, deux sortes de problèmes d'optimisation reçoivent l'appellation, non strictement définie, de problèmes "difficiles" :

- certains problèmes d'optimisation combinatoire, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme exact "rapide" ;
- certains problèmes d'optimisation à variables continues, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithmes permettant de repérer un optimum global à coup sûr, et en un nombre fini de calculs.

En pratique, l'objectif n'est pas d'obtenir un optimum absolu, mais seulement une bonne solution, et la garantie de l'inexistence d'une solution sensiblement meilleure. Pour atteindre cet objectif au bout d'un temps de calcul raisonnable, il est nécessaire d'avoir recours à des méthodes appelées "heuristiques".

Un grand nombre d'heuristiques, qui produisent des solutions proches de l'optimum, ont été développées pour les problèmes d'optimisation combinatoire difficiles. La plupart d'entre elles sont conçues spécifiquement pour un type de problème donné. D'autres, au contraire, désormais appelées "méta heuristiques", sont capables de s'adapter à différents types de problèmes, combinatoires ou mêmes continus.

Pour la caractérisation d'une heuristique, il convient d'ajouter aux critères traditionnels de temps et de place mémoire celui de la "qualité" de la solution obtenue, c'est-à-dire de son écart avec la solution optimale. Par ailleurs, les heuristiques disposent en général d'un certain nombre de paramètres de contrôle, dont le choix est primordial pour la qualité de la solution à obtenir. Nous dirons qu'une heuristique est "robuste" si elle converge le plus souvent vers la même solution, et elle est d'autant plus "efficace" qu'elle donne, en un temps de calcul donné, une solution meilleure, plus proche de l'optimum.

5.2. Outils d'Optimisation

Les outils d'optimisation sont très variés, ils commencent du plus simple au plus complexe. Pour notre cas on se limite à citer deux d'entre eux à savoir le Solveur sous Excel et les algorithmes génétiques.

5.2.1. Le Solveur

Le Solveur fait partie d'une série de commandes aussi appelées outils d'analyses de simulation qui est une procédure consistant à modifier les valeurs des cellules afin de voir de quelle manière elles affectent le résultat des formules de la feuille de calcul. Le Solveur nous permet de trouver une valeur optimale pour une formule qui n'est qu'une suite de valeurs, références de cellule, noms, fonctions ou opérateurs dans une cellule permettant de générer une nouvelle valeur. Une formule commence toujours par le signe égal (=) dans une cellule, appelée cellule cible, d'une feuille de calcul. Il fonctionne avec un groupe de cellules associées, soit directement, soit indirectement, à la formule de la cellule cible. Il adapte les valeurs des cellules que nous souhaitons modifier, appelées cellules variables, pour fournir le résultat spécifié à partir de la formule de la cellule cible. Nous pouvons poser des contraintes qui ne sont que des limites imposées à un problème du Solveur. Nous pouvons appliquer des contraintes à des cellules ajustables (modifiables), à la cellule cible ou à d'autres cellules liées directement ou indirectement à la cellule cible. Pour limiter les valeurs susceptibles d'être utilisées comme modèles par le Solveur et ces contraintes peuvent se référer à d'autres cellules affectant la formule de la cellule cible. Donc on utilise le Solveur pour déterminer la valeur minimale ou maximale d'une cellule en modifiant d'autres cellules.

5.2.1.1. Algorithme et méthodes utilisés par le Solveur [33]

Le Solveur de Microsoft Excel utilise le code d'optimisation non linéaire « Generalized Reduced Gradient (GRG2) » mis au point aux États-Unis par Leon Lasdon, Université du Texas (Austin) et Allan Waren, Université de Cleveland. Les problèmes linéaires et de nombres entiers utilisent la méthode simplex, avec des bornes sur les variables, ainsi que la méthode « branch-and-bound » mise en œuvre par John Watson et Dan Fylstra, Frontline Systems, Inc.

5.2.1.2. Définition et résolution d'un problème à l'aide du Solveur [33]

1. Dans le menu **Outils**, cliquez sur **Solveur**.
2. Si la commande **Solveur** n'est pas disponible dans le menu **Outils**, vous devez installer la macro complémentaire qui n'est qu'un programme complémentaire qui ajoute des commandes personnalisées ou des fonctions personnalisées à Microsoft Office.) selon la procédure suivante :
 - a) Dans le menu **Outils**, cliquez sur **Macros complémentaires**.
 - b) Si la macro complémentaire que vous souhaitez utiliser ne s'affiche pas dans la zone **Macros complémentaires disponibles**, cliquez sur **Parcourir**, puis recherchez-la.
 - c) Dans la zone **Macros complémentaires disponibles**, activez la case à cocher située à côté de la macro complémentaire que vous voulez charger, puis cliquez sur **OK**.
 - d) Si nécessaire, suivez les instructions du programme d'installation.
3. Dans la zone **Cellule cible à définir**, tapez la référence de cellule qui n'est qu'un ensemble de coordonnées correspondant à l'emplacement d'une cellule dans une feuille de calcul. La cellule cible doit contenir une formule qui n'est qu'une suite de valeurs, références de cellule, noms, fonctions ou opérateurs dans une cellule permettant de générer une nouvelle valeur. (voir figure 5.1)
4. Effectuez l'une des actions suivantes :
 - a) Pour que la valeur de la cellule cible soit aussi élevée que possible, cliquez sur **Max**.
 - b) Pour que la valeur de la cellule cible soit aussi petite que possible, cliquez sur **Min**.
 - c) Pour que la cellule cible contienne une valeur donnée, cliquez sur **Valeur**, puis tapez la valeur dans la zone.
5. Dans la zone **Cellules variables**, tapez le nom ou la référence de chaque cellule variable, en séparant les références non contiguës par des virgules. Les cellules variables doivent être associées directement ou indirectement à la cellule cible. On peut spécifier jusqu'à 200 cellules variables.

6. Pour que le Solveur suggère automatiquement des cellules variables basées sur la cellule cible, cliquez sur **Proposer**.
7. Dans la zone **Contraintes**, tapez les contraintes ou les limites imposées à un problème du Solveur. Vous pouvez appliquer des contraintes à des cellules ajustables (modifiables), à la cellule cible ou à d'autres cellules liées directement ou indirectement à la cellule cible.

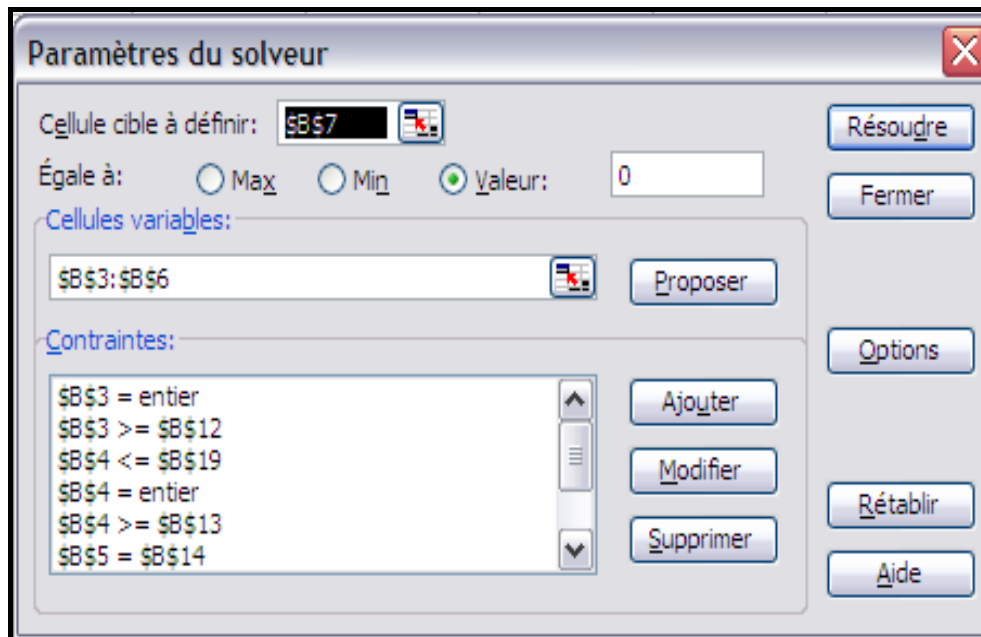


Fig. 5.1 : Interface du Solveur

5.2.2. Les Algorithmes Génétiques

Les algorithmes génétiques (**AG**) 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.

A titre comparatif, les experts distinguent quatre (04) principaux points qui font la différence fondamentale entre ces algorithmes (**AG**) et les autres méthodes : [40]

1. Les algorithmes génétiques utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux mêmes.
2. Les algorithmes génétiques travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique.
3. Les algorithmes génétiques n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée, pas sa dérivée, ou une autre connaissance auxiliaire.
4. 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.

5.2.2.1. Mécanismes de base des algorithmes génétiques

Un algorithme génétique est défini par :

- *Individu/chromosome/séquence* : une solution potentielle du problème,
- *Population* : un ensemble de chromosomes ou de points de l'espace de recherche,
- *Environnement* : l'espace de recherche,
- *Fonction de fitness* : la fonction -positive- que nous cherchons à maximiser.

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

Définition 1 (Séquence/Chromosome/Individu (Codage binaire)). Nous appelons une séquence (chromosome, individu) A de longueur $l(A)$ une suite

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_l\} \quad \text{avec } \forall i \in [1, l], \quad a_i \in V = \{0, 1\}. \quad (5.1)$$

Un chromosome est donc une suite de bits en codage binaire, appelé aussi chaîne binaire. Dans le cas d'un codage non binaire, tel que le codage réel, la suite A ne contient qu'un point, nous avons $A = \{a\}$ avec $a \in \mathbb{R}$.

Définition 2 (Fitness d'une séquence). Nous appelons fitness d'une séquence toute valeur positive que nous noterons $f(A)$, 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, nous utiliserons souvent une fonction de décodage d qui permettra de passer d'une chaîne binaire à un chiffre à valeur réelle: $d : \{0,1\}^l \rightarrow \mathfrak{R}$ (où l est la longueur de la chaîne). La fonction de fitness est alors choisie telle qu'elle transforme cette valeur en valeur positive, soit $f : d(\{0,1\}^l) \rightarrow \mathfrak{R}_+^*$. 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 .

Les **AG** sont alors basés sur les phases suivantes :

1. **Initialisation.** Une population initiale de N chromosomes est tirée aléatoirement.
2. **Évaluation.** Chaque chromosome est décodé, puis évalué.
3. **Sélection.** Création d'une nouvelle population de N chromosomes par l'utilisation d'une méthode de sélection appropriée.
4. **Reproduction.** Possibilité de croisement et mutation au sein de la nouvelle population.
5. **Retour** à la phase d'évaluation jusqu'à l'arrêt de l'algorithme.

Voyons maintenant plus en détail les autres phases de l'algorithme génétique. Nous présentons ces opérateurs sous l'hypothèse implicite que le codage est binaire. Ultérieurement on abordera le codage réel.

a. Codage et Population Initiale

Il existe trois principaux types de codage : binaire, *gray* ou réel. Nous pouvons facilement passer d'un codage à l'autre [49]. Certains auteurs n'hésitent pas à faire le parallèle avec la biologie et parlent de génotype en ce qui concerne la représentation binaire d'un individu, et de phénotype pour ce qui est de sa valeur réelle correspondante dans l'espace de recherche.

Rappelons que la transformation la plus simple (fonction de décodage d) d'une chaîne binaire A en nombre entier x s'opère par la règle suivante :

$$x = d(A) = \sum_{i=1}^l a_i \cdot 2^{l-i-1} \quad (5.2)$$

Ainsi le chromosome

$$A = \{1,0,1,1\} \text{ vaut } 1 * 2^3 + 0 * 2^2 + 1 * 2^1 + 1 * 2^0 = 8 + 2 + 1 = 11 \quad (5.3)$$

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

1. Conversion (base 2 en base 10) : $x' = \sum_{i=1}^s 2^{i-1}$,
2. Recherche du nombre réel correspondant :

$$x = x_{\min} + x' \frac{x_{\max} - x_{\min}}{2^s - 1} \quad (5.4)$$

Ou ce qui revient au même directement en une seule étape par :

$$x = x_{\min} + \sum_{i=1}^s \frac{2^{i-1} l d}{2^s - 1} \quad (5.5)$$

Pour ce qui est de la phase d'initialisation, la procédure est assez simple. Elle consiste en un tirage aléatoire de N individus dans l'espace des individus permis. En codage binaire, selon la taille l de la chaîne, nous effectuons pour un chromosome l tirage dans $\{0,1\}$ avec équiprobabilité.

b. Les Opérateurs

Les opérateurs jouent un rôle prépondérant dans la possible réussite d'un AG. Nous en dénombrons trois principaux : l'opérateur de sélection, de croisement et de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible, il est toutefois difficile d'expliquer l'importance isolée de chacun de ces opérateurs dans la réussite de l'AG. Cela tient pour partie au fait que chacun de ces opérateurs agit selon divers critères qui lui sont propres (valeur sélective des individus, probabilité d'activation de l'opérateur, ... etc.).

b.1 Opérateur de Sélection

Cet opérateur est peut-être le plus important puisqu'il permet aux individus d'une population de survivre, de se reproduire ou de mourir. En règle générale, la probabilité de survie d'un individu sera directement reliée à son efficacité relative au sein de la population.

Il existe plusieurs méthodes pour la reproduction. La méthode la plus connue et utilisée est sans nul doute, la roue de loterie biaisée (*roulette Wheel*) de Goldberg [40]. Selon cette méthode, chaque chromosome sera dupliqué dans une nouvelle population proportionnellement à sa valeur d'adaptation. 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 fitness d'un chromosome particulier étant $f(d(c_i))$, la probabilité avec laquelle il sera réintroduit dans la nouvelle population de taille N est :

$$\frac{f(d(c_i))}{\sum_{j=1}^N f(d(c_j))} \quad (5.6)$$

Les individus ayant une grande fitness ont donc plus de chance d'être sélectionnés. On parle alors de sélection proportionnelle.

L'inconvénient majeur de cette méthode repose sur le fait qu'un individu n'étant pas le meilleur peut tout de même dominer la sélection. Elle peut aussi engendrer une perte de diversité par la domination d'un super individu. Un autre inconvénient est sa faible performance vers la fin quand l'ensemble des individus se ressemble. [18]

Pensez à une situation où une chaîne (chromosome) de la population a comparativement une fitness élevée mais n'est pas optimal ou proche de l'optimum. Disons que la fitness de cette chaîne est dix fois plus grande que la fitness moyenne. Il

pourrait facilement arriver, après quelques générations, que la population ne soit entièrement constituée que de cette chaîne.

Dans un tel cas, l'algorithme génétique n'évoluera plus et l'optimum ne sera pas trouvé. Ce phénomène est appelé "convergence prématurée" et est l'un des problèmes les plus fréquents lors de l'utilisation des algorithmes génétiques. Un autre problème issu de la sélection proportionnelle est celui du "fine tuning" à la fin de la recherche.

Une solution à ce problème ne tient pas dans l'utilisation d'une autre méthode de sélection mais dans l'utilisation d'une fonction de fitness modifiée. Ainsi, nous pouvons utiliser un changement d'échelle (*scaling*) afin de diminuer ou accroître de manière artificielle l'écart relatif entre les fitness des individus.

Brièvement, il existe d'autres méthodes, la plus connue étant celle du tournoi (*tournament selection*) : on tire deux individus aléatoirement dans la population et on reproduit le meilleur des deux dans la nouvelle population. On refait cette procédure jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète. Cette méthode donne de bons résultats. Toutefois, aussi importante que soit la phase de sélection, elle ne crée pas de nouveaux individus dans la population. Ceci est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation.

b.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 5.2).

Cet opérateur permet la création de deux nouveaux individus. Toutefois, 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 changement.

Quoi qu'il en soit, il se peut que l'action conjointe de la reproduction et du croisement soit insuffisante pour assurer la réussite de l'AG. Ainsi, dans le cas du codage binaire, certaines informations (i.e. caractères de l'alphabet) peuvent disparaître de la population. Ainsi aucun individu de la population initiale ne contient de 1 en dernière position de la chaîne, et que ce 1 fasse partie de la chaîne optimale à trouver, tous les croisements possibles ne permettront pas de faire apparaître ce 1 initialement inconnu. En codage réel, une telle situation peut arriver si elle utilise un opérateur simple de croisement, il se trouvait qu'initialement toute la population soit comprise entre 0 et 40 et que la valeur optimale était de 50. Toutes les combinaisons convexes possibles de chiffres appartenant à l'intervalle $[0 ; 40]$ ne permettront jamais d'aboutir à un chiffre de 50. C'est pour remédier entre autre à ce problème que l'opérateur de mutation est utilisé.

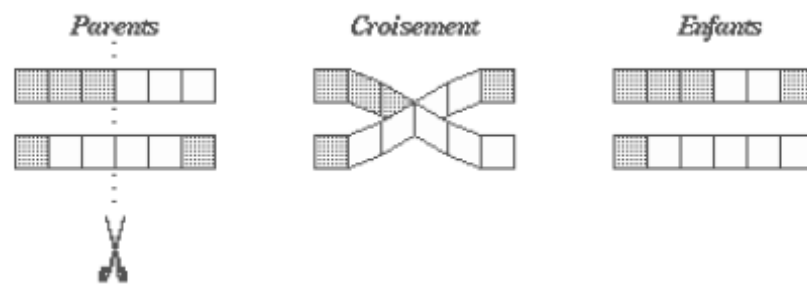


Fig. 5. 2: Le croisement en codage binaire

b.3 Opérateur de Mutation

Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un composant de l'individu. Dans le cas du codage binaire, chaque bit $a_i \in \{0,1\}$ est remplacé selon une probabilité p_m par son inverse $a'_i = 1 - a_i$. Tout comme plusieurs lieux de croisement peuvent être possibles, nous pouvons très bien admettre qu'une même chaîne puisse subir plusieurs mutations.

La mutation est traditionnellement considérée comme un opérateur marginal bien qu'elle confère en quelque sorte aux algorithmes génétiques la propriété d'ergodicité (i.e. tous les points de l'espace de recherche peuvent être atteints). Cet opérateur est donc d'une grande importance. Il a de fait un double rôle : celui d'effectuer une recherche locale et/ou de sortir d'une trappe (recherche éloignée).

b.4 Autres paramètres de l'algorithme génétique

Les opérateurs de l'algorithme génétique sont guidés par un certain nombre de paramètres fixés à l'avance. La valeur de ces paramètres influence la réussite ou non d'un algorithme génétique. Ces paramètres sont les suivants :

- La taille de la population N et la longueur du codage de chaque individu l (dans le cas du codage binaire). Si N est trop grand, le temps de calcul de l'algorithme peut s'avérer très important, et 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* qui implique que le nombre d'individus traité par l'algorithme est au moins proportionnel au cube du nombre d'individus.
- La probabilité de croisement p_m . Elle dépend de la forme de la fonction de fitness. Son choix est en général 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.
- La probabilité de mutation p_m . Elle est généralement faible puisqu'un taux élevé risque de conduire à une solution sous optimale.

Plutôt que de réduire p_m , une autre façon d'éviter que les meilleurs individus soient altérés est d'utiliser la reconduite explicite de l'élite dans une certaine proportion. Ainsi, bien souvent, les meilleurs 5%, par exemple, de la population sont directement reproduits à l'identique, l'opérateur de reproduction ne jouant alors que sur les 95% restant. Cela est appelé une stratégie élitiste.

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, tels que Novkovic et Sverko [36], 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.

Remarque sur la fonction fitness

Le choix de la fonction de fitness retenue est important et dépend du problème à résoudre et de l'espace de recherche qui en découle. Admettons que l'on cherche simplement à maximiser la fonction : $f(x) = x^2$ avec $x \in [0,10]$. Dans un tel cas, la fonction de fitness coïncide avec celle du problème. Pour des problèmes de minimisation simples, tel que $\min(x-3)^2$, nous utiliserons en général soit la propriété que : $\max f(x) = -\min f(x)$ ou bien, si la fonction est bornée supérieurement la fonction : $\max C - f(x)$, où C est une constante positive supérieure à cette borne.

c. Le codage réel

A l'aide du codage binaire, toutes les opérations sont assez simples à mettre en place. Malgré tout, quelques inconvénients existent [49] :

- Il peut être difficile d'adapter ce codage à certains problèmes :

La représentation binaire traditionnelle utilisée pour les algorithmes génétiques crée des problèmes pour les cas d'optimisation de grandes dimensions à haute précision numérique. Par exemple, avec 100 variables appartenant au domaine $[-500; 500]$ et dont une précision de 6 chiffres après la virgule est requise, la taille du chromosome est 3000.

Cela, en retour, génère un espace de recherche d'environ 101000. Pour de tels problèmes, les algorithmes génétiques basés sur des représentations binaires ont de faibles performances.

La distance de Hamming entre deux nombres réels proches peut être grande (exemple : 0111 qui vaut 7 et 1000 qui vaut 8, la distance est de 4). Ce qui crée bien souvent une convergence mais non l'obtention de la valeur optimale. (*La distance de Hamming entre deux chaînes de bits est le nombre de bits qui diffèrent de l'une à l'autre. Ainsi entre 01100101 et 00101100 la distance de Hamming vaut 3.*)

- Suivant le problème, la résolution de l'algorithme peut être coûteuse en terme de temps.
- Le croisement et la mutation peuvent être inadaptés (création d'individus n'appartenant pas à l'espace de recherche).

Une des améliorations majeures consiste alors à se servir de nombres réels directement. Les résultats donnés par [49] et [48] montrent que la représentation binaire

aboutit souvent à une moins bonne précision et qu'en règle général le gain en termes de temps de calcul (CPU) est positif. La conclusion à laquelle ils arrivent est naturellement qu'une représentation plus naturelle du problème offre des solutions plus efficaces.

En utilisant le codage réel, notre individu n'est alors plus qu'un chiffre à valeurs réelles dans l'espace des valeurs permises $A = a, a \in D \subset \mathfrak{R}$. L'opérateur de sélection reste identique à celui de la roue de loterie biaisée ou du tournoi. En revanche, il existe d'autres opérateurs de croisement et de mutation.

d. Opérateur de croisement

L'opération de croisement simple tel que décrit dans le cas binaire ne peut s'effectuer ici dans le cas de recherche d'un point unique. Toutefois, pour une recherche de plus grande dimension, nous pouvons utiliser de façon analogique cet opérateur. 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.

L'opération de croisement simple est identique dans le principe à celle décrite auparavant. Pour ce faire, nous générons un nombre aléatoire r à partir d'une distribution uniforme sur l'ensemble $\{1,2,3\}$, et deux nouveaux individus, \tilde{X} et \tilde{Y} , sont créés selon la règle suivante :

$$\begin{aligned} \tilde{x}_i &= \begin{cases} x_i, & \text{si } i < r \\ y_i, & \text{sinon} \end{cases} \\ \tilde{y}_i &= \begin{cases} y_i, & \text{si } i < r \\ x_i, & \text{sinon} \end{cases} \end{aligned} \tag{5.7}$$

Un autre opérateur est le croisement arithmétique (valable même pour une recherche de dimension un). Ce croisement effectue une simple combinaison linéaire entre les parents. Soit, après avoir généré un chiffre aléatoire, $\alpha = (0,1)$, les nouveaux parents sont :

$$\begin{aligned} \tilde{X} &= \alpha X + (1 - \alpha) Y \\ \tilde{Y} &= (1 - \alpha) X + \alpha Y \end{aligned} \tag{5.8}$$

Enfin, il existe aussi le croisement heuristique. Cet opérateur effectue une extrapolation linéaire des deux individus. Un nouvel individu, \tilde{X} , est créé selon le processus suivant (sous l'hypothèse que $X > Y$ en terme de fitness, sinon nous inversons X et Y dans les équations) :

$$\begin{aligned}\tilde{X} &= X + r(X - Y) \\ \tilde{Y} &= X\end{aligned}\tag{5.9}$$

et où :

$$Faisabilité = \begin{cases} 1, & \text{if } b_1^i < \tilde{x}_i < b_2^i, \quad \forall i \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}\tag{5.10}$$

avec b_1^i et b_2^i sont les bornes autorisées pour x_i , et avec r un nombre aléatoire tiré dans $U(0,1)$. Nous devons donc avoir tout le temps $x_i \in [b_1^i, b_2^i]$. Si \tilde{X} n'est pas faisable (i.e. faisabilité nulle) alors un nombre r est retiré et la procédure est recommencée jusqu'à ce que la solution soit faisable où qu'un certain nombre d'essais ait été effectué. Dans le cas où $f(X) = f(Y)$ (même fitness) on reproduit simplement X et Y . Cet opérateur est le seul des croisements à utiliser *directement* une information reliée à la fitness [48].

Cet opérateur est un croisement unique pour les raisons suivantes :

1. il utilise les valeurs de la fonction objective afin de déterminer une direction de recherche,
2. il produit seulement un enfant,
3. il peut ne produire aucun enfant.

Il semble que le croisement heuristique contribue à trouver une solution plus précise ; ses principales responsabilités (dans la recherche de la solution) sont :

- b. un fine tuning local, et
- c. une recherche dans une direction prometteuse.

e. 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 :

$$\tilde{x}_i = \begin{cases} x_i + (b_2^i - x_i)f(G), & \text{si } \alpha < 0.5, \\ x_i - (b_1^i - x_i)f(G), & \text{si } \alpha \geq 0.5, \end{cases} \quad (5.11)$$

avec :

$$f(G) = \left(\tilde{\alpha} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \right)^b.$$

$\alpha, \tilde{\alpha}$ = nombres aléatoires $\in (0,1)$.

G = la génération courante.

G_{\max} = le nombre maximum de génération (i.e. de création de nouvelle population).

b = un paramètre déterminant le degré de non uniformité.

Un dernier opérateur de mutation existe : la mutation dans les bornes. Avec cet opérateur, chaque variable $x_i \in X$ choisie pour muter prend pour valeur l'une des deux

bornes 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.

5.3 Optimisation par algorithme génétique continu du point de puissance maximale sous différentes conditions climatiques

En raison du changement du point de puissance maximale de fonctionnement en fonction de l'éclairement et de la température (conditions atmosphériques) une grande importance est donnée au suiveur du point de puissance maximum.

Ainsi, les techniques heuristiques basées sur le concept de l'optimisation sont de nos jours de grande importance en raison de leur adaptabilité avec les systèmes photovoltaïques. Le but de ce travail consiste à l'exécution d'un algorithme génétique continu (méthode heuristique) afin d'atteindre le point de puissance maximum quelque soient les conditions climatiques.

De nos jours, les techniques d'optimisation sont appliquées progressivement dans le domaine de l'engineering en raison de leur utilité, ainsi leur application à une grande variété de problèmes devient de plus en plus attrayante. Cette tendance a été motivée par la disponibilité des plateformes informatiques puissantes. Parmi ces techniques numériques, nous trouvons celle des algorithmes génétiques qui donne des résultats plus rigoureux en comparaison avec les techniques analytiques [24]-[11]. L'énergie photovoltaïque est une technique, qui convertit directement la lumière du soleil en électricité. Elle est modulaire, silencieuse, non polluante, et exige peu d'entretien, c'est pour cette raison qu'une puissante attraction aux systèmes photovoltaïques est remarquable. En jetant un regard rapide sur les caractéristiques courant-tension $I-V$ (voir figure 5.3) et puissance-tension $P-V$ (voir figure 5.4) des rayons photovoltaïques, nous constatons clairement la dépendance de la puissance générée d'un système photovoltaïque de l'éclairement et de la température. [1]

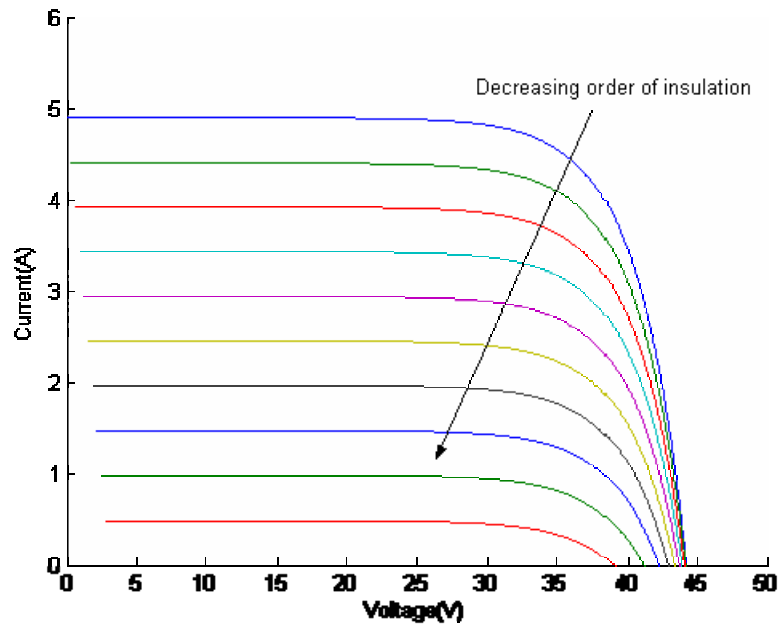


Fig. 5.3 Caractéristique I - V avec éclaircissement variable

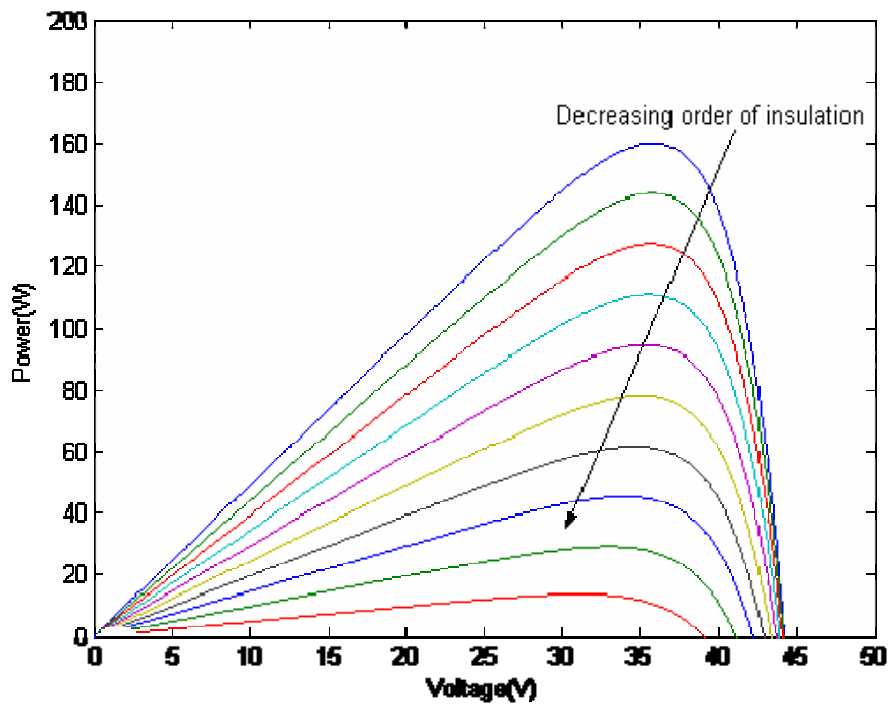


Fig. 5.4 Caractéristique P - V avec éclaircissement variable

Dans ce qui suit, nous présentons une application d'un algorithme génétique continu sur un système photovoltaïque, ce qui nous permettra de suivre instantanément le point de puissance maximum. Ce dernier change instantanément avec l'éclaircissement et

la température, ce qui implique un ajustement continu de la tension de sortie pour réaliser le transfert de la puissance maximum à la charge. La justification de cette application est due au fait que les caractéristiques courant-tension $I-V$ (voir figure 5.3) et puissance-tension $P-V$ (voir figure 5.4) sont non linéaires en raison d'un côté de la non linéarité des systèmes photovoltaïques, et en raison de la variation instantanée de la température et de l'éclairement de l'autre, ce qui fait qu'en réalité les deux caractéristiques précédentes possèdent beaucoup de fluctuations.

Par conséquent, l'adoption de cette technique d'algorithme génétique continu adaptatif offre la possibilité de résoudre avec une grande précision ces problèmes d'optimisation et surtout pour surmonter les incapacités des techniques numériques traditionnelles. L'approche proposée est appliquée sur un module solaire référencé BP SOLAR, BP 4160S dont les caractéristiques sont données en index.

5.3.1. Modélisation du Générateur Photovoltaïque [31]

La caractéristique courant-tension $I-V$ du module photovoltaïque est exprimée par les équations (5.12) à (5.20). Pour définir cette courbe, nous avons besoins des trois points suivants:

- La tension à vide (circuit ouvert) V_{oc} .
- La tension de court-circuit I_{cc} .
- Le point de puissance optimale (I_{opt}, V_{opt})

$$I = I_{cc} \left[1 - C_1 \left(\exp\left(\frac{V}{C_2 \cdot V_{oc}}\right) - 1 \right) \right] \quad (5.12)$$

$$C_2 = \frac{\frac{V_{opt}}{V_{oc}} - 1}{\ln\left(1 - \frac{I_{opt}}{I_{cc}}\right)} \quad (5.13)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{opt}}{I_{cc}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-V_{opt}}{C_2 \cdot V_{oc}}\right) \quad (5.14)$$

L'adaptation de l'équation (5.12) à plusieurs niveaux d'éclairement et de températures donne :

$$I_n = I_{ref} + \Delta I \quad (5.15)$$

$$V_n = V_{ref} + \Delta V \quad (5.16)$$

avec

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (5.17)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \cdot \Delta I \quad (5.18)$$

avec:

α est le coefficient de la variation du courant avec la température

β est le coefficient de la variation de la tension avec la température

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (5.19)$$

avec

T la température du module

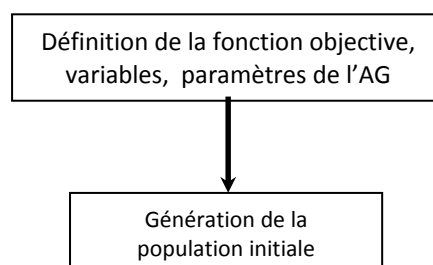
T_{ref} la température de référence

La température du module est liée à la température ambiante par la relation suivante:

$$T_m = T_a + K.E \quad (5.20)$$

avec K est le facteur de température du module, mesuré en m^2/w^2 .

5.3.2. Organigramme de l'Algorithme Génétique



5.3.3. Résultats Analyse & Discussion

Le programme a été développé et exécuté sous l'environnement MATLAB. Les résultats de l'exécution de ce programme d'optimisation sont reportés sur les Tables I, II et III.

Eclairement [W/m²]	V_{max} [V]	I_{max} [A]	MPOP [W]
1000	35.8020	4.4729	160.1399
900	35.7571	4.0246	143.9091
800	35.6680	3.5767	127.5736
700	35.5347	3.1281	111.1551

600	35.3572	2.6778	94.6813
500	35.0471	2.2310	78.1897
400	34.6486	1.7817	61.7324
300	33.9849	1.3356	45.3891
200	33.0118	0.8874	29.2937
100	31.1105	0.4413	13.7280

TABLE I : Résultats de l'optimisation avec éclairement variable à une température constante égale à 25°C

Température [°C]	V_{max} [V]	I_{max} [A]	MPOP [W]
0	39.6006	4.1263	163.4032
15	37.3214	4.3343	161.7613
20	36.5617	4.4036	161.0033
25	35.8020	4.4729	160.1399
30	35.0857	4.5367	159.1716
35	34.3251	4.6059	158.0981

TABLE II : Résultats de l'optimisation avec une température variable et un éclairement constant égal à 1000 W/m²

Température [°C]	Eclairement [W/m ²]	V_{max} [V]	I_{max} [A]	MPOP [W]
8	350	39.0063	1.3773	53.7235
16	500	38.3143	2.0603	78.9384
24	650	37.1338	2.7943	103.7637
32	800	35.5575	3.5852	127.4798
40	950	33.7946	4.4217	149.4303

TABLE III : Résultats de l'optimisation avec la température et l'éclairement qui varient en même temps

5.3.4. Représentation Graphique

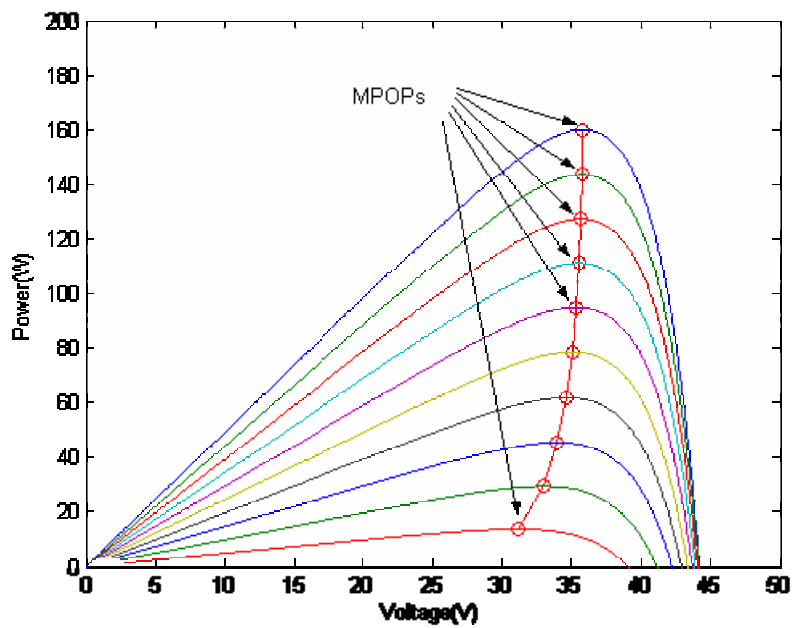


Fig. 5.5 : MPOPs, variation avec l'éclairement à partir de la caractéristique P-V

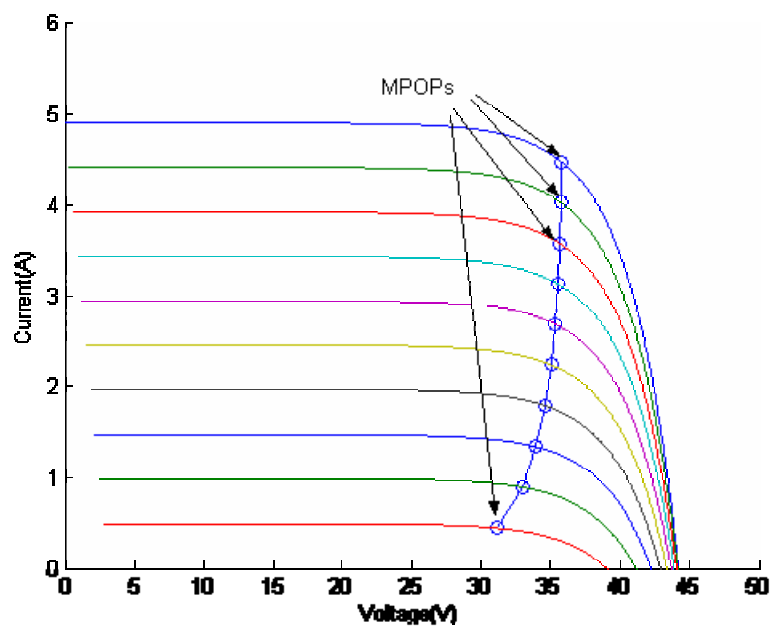


Fig. 5.6 : MPOPs, variation avec l'éclairement à partir de la caractéristique I-V

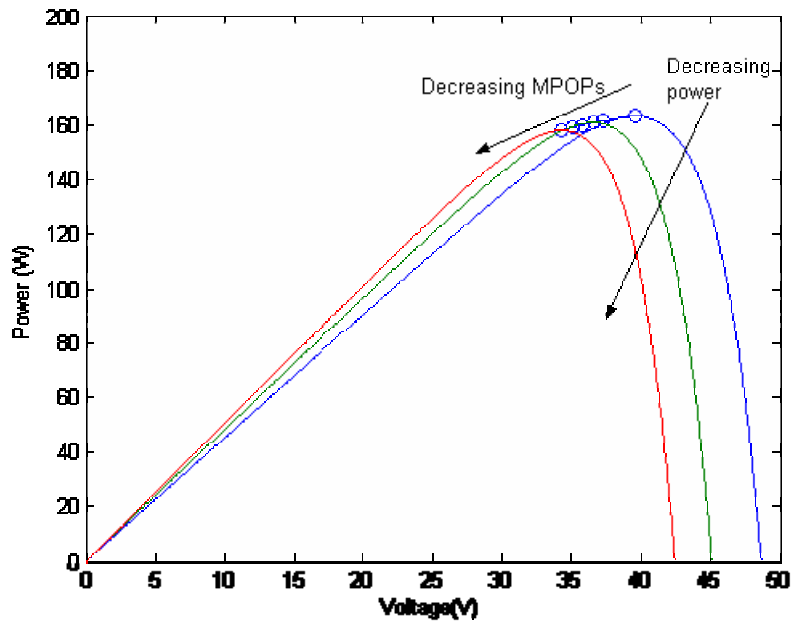


Fig. 5.7 : MPOPs, variation avec la température à partir de la caractéristique P - V

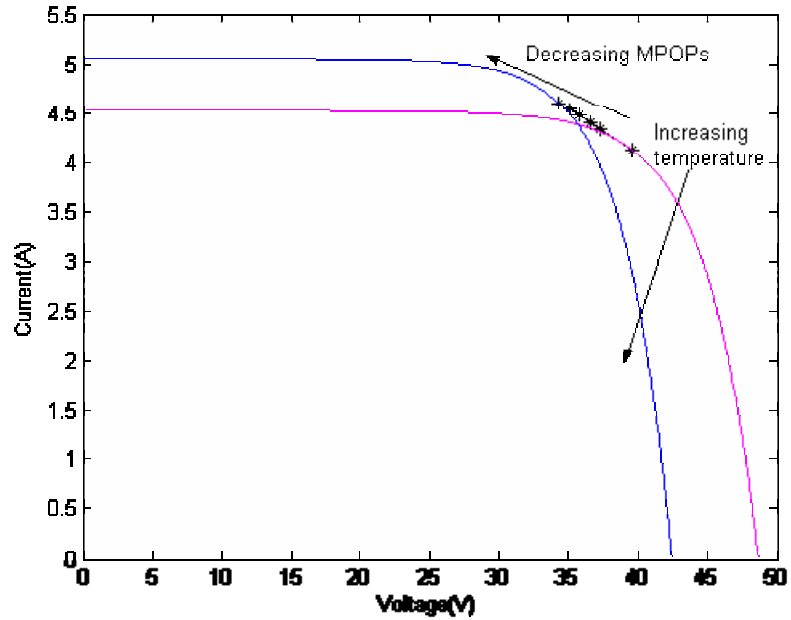


Fig. 5.8 : MPOPs, variation avec la température à partir de la caractéristique I - V

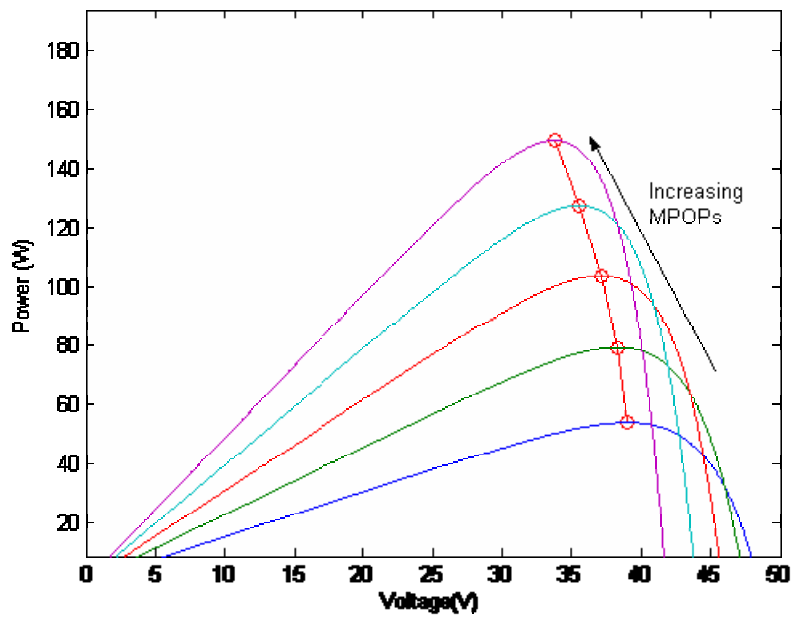


Fig. 5.9 : MPOPs, variation avec la température et l'éclairement en même temps à partir de la caractéristique $P-V$

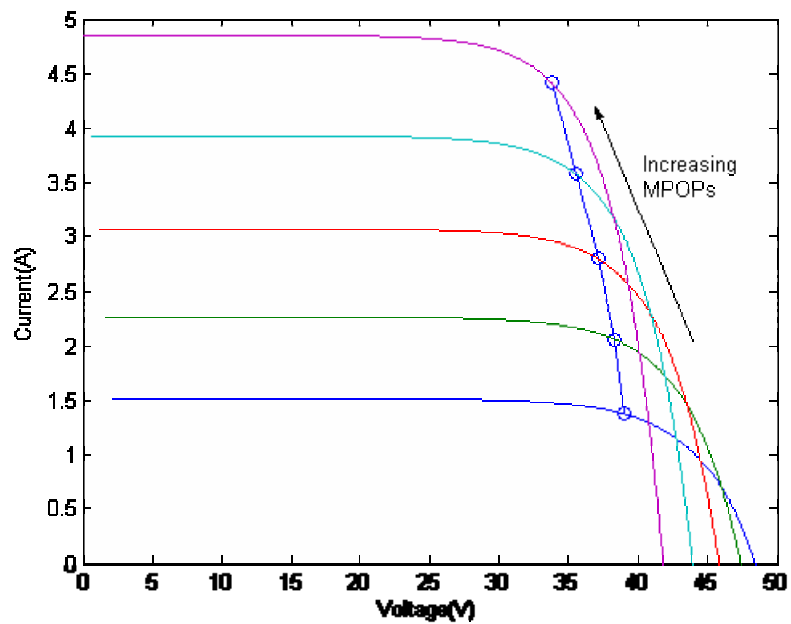


Fig. 5.10 : MPOPs, variation avec la température et l'éclairement en même temps à partir de la caractéristique $I-V$

5.3.5. Conclusion

Cette étude présente un algorithme génétique continu, qui calcul instantanément le point de puissance maximum MPOP d'un module photovoltaïque afin de maximiser le profit en termes de la puissance instantanément délivrée par le générateur photovoltaïque. A cause du changement instantané des caractéristiques $I-V$ et $P-V$, cette méthode heuristique est utilisée pour suivre réellement et avec une certaine précision le point de puissance maximum et surtout pour éviter les erreurs dues au maximum local. En fait, l'implémentation de cette technique réduit considérablement le temps de calcul et rapporte en plus des résultats plus précis.

Les résultats obtenus par ce travail de recherche sont rapportés dans les tableaux I, II et III et tracés dans les figures 5.3 à 5.10.

On constate que le modèle de variation de la fonction éclairement semble être plus clair et non linéaire. Quant à la fonction température la variation, elle est légèrement non linéaire. La connaissance de ces deux modèles de variation rend la modélisation du système plus compliquée et hautement non linéaire, ce qui fera de leur simulation une tâche très pénible.

CONCLUSION GENERALE

A la fin de ce modeste travail on peut dire franchement que notre contribution a été axée sur plusieurs aspects. Le premier est lié à l'énergie renouvelable à travers une étude descriptive avec des informations pratiques concernant l'utilité, l'importance de l'implantation de ces énergies dites vertes afin de préserver l'écosystème. Une investigation sur les énergies renouvelables exploitées sur tous les sites du territoire national a permis une quantification de cette ressource d'énergie ainsi que sa répartition géographique ce qui permettra de bien planifier l'exploitation stratégique et optimale de cette énergie parrainée par la Direction de la Recherche de Nouvelles Energies Renouvelables du Ministère de l'Energie et des Mines. Le second aspect est axé sur la structure et techniques d'implantation d'un système photovoltaïque en partant de la cellule photovoltaïque avec ses caractéristiques physiques, en passant par le panneau solaire résultat d'une combinaison série/parallèle des cellules élémentaires avec sa technologie et sa puissance, puis le champ photovoltaïque qui constitue le cœur d'un système énergétique photovoltaïque dit encore centrale photovoltaïque. L'étude détaillée des batteries d'accumulateurs qui constituent sans aucun doute un élément essentiel dans un système photovoltaïque notamment pour le stockage de l'énergie électrique dont on aura besoin pendant l'absence de l'ensoleillement, nous a permis de s'approfondir et de connaître leurs caractéristiques électriques technologiques ainsi que leur implémentation dans le domaine du solaire.

La modélisation mathématique des systèmes photovoltaïques est dans notre cas réduite à celui du photogénérateur, élément clé de la chaîne photovoltaïque. Elle est basée sur l'étude du schéma du circuit équivalent de quatre cas possibles. La modélisation ainsi que la simulation des quatre cas face aux influences respectifs de l'éclairement et de la température a permis une bonne compréhension de la dynamique du photogénérateur. Aussi, l'étude comparative entre les modèles permettra d'entreprendre une étude pratique permettant de dire lequel des modèles est le mieux pour certaines conditions climatiques, et ceci à travers l'installation d'une carte d'acquisition et par conséquent la création d'une base de données regroupant toutes les saisons et les périodes de l'année.

L'investigation des méthodes de calcul décisionnel nous a permis de bien modéliser un problème de recherche opérationnelle ainsi que de distinguer s'il a besoin d'une solution basée sur une programmation linéaire dont les algorithmes sont de plus en plus complexes ou non ; cela dépend principalement du nombre de variables du système à résoudre, ou sur une programmation dynamique, en général très difficile à entreprendre surtout lorsque la dynamique du système n'est pas connue.

La résolution du problème du suiveur du point de puissance maximale MPPT, qui est en fait un problème à plusieurs paramètres (variables), tels le courant, la tension, la température, l'éclairement, la tension thermique ... etc., en variation non linéaire, n'est pas une tâche facile. Etant donné que le problème du suiveur du point de puissance maximale MPPT est un problème d'optimisation non linéaire, nous avons utilisé la technique des algorithmes génétiques afin de maximiser le profit en termes d'énergie alimentant la charge ce qui signifie la minimisation des pertes d'énergie délivrée par le photogénérateur face aux autres contraintes notamment de celles de la température et de l'éclairement, d'où optimisation. Du moment que la dynamique du système est connue au préalable, on peut dire que les résultats obtenus sont très satisfaisants.

Ce travail a été objet de deux publications internationales.

Nous envisageons de continuer ce travail par l'investigation des points suivants :

1. Optimisation du pris de revient du KWh par des installations hybrides.
2. Modélisation par reconnaissance de forme du photogénérateur.
3. Applications de nouvelles techniques du "Swarm Intelligent Systems" au processus d'implantation globale d'un système de conversion d'énergie renouvelable.
4. Etude des différents modèles de simulation en comparaison avec une étude pratique par l'installation d'une carte d'acquisition, et déduire par la suite le modèle de variation de la température et de l'éclairement par une méthode appropriée telle que la méthode "Curve fitting".

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. LABOURET, M. Villos, "Energie solaire photovoltaïque, le manuel du professionnel". DUNOD Paris 2003.
- [2] A. LABOURET, P. Cumunel, J.P. Braun, B. Faraggi, "Cellules Solaires, Les bases de l'énergie photovoltaïque", 3^{ème} édition, ETSF, DUNOD 2001.
- [3] A. MEKKI, "Guide des Energies Renouvelables". Ministère de l'Energie et des Mines, Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables, www.mem-algeria.org.
- [4] A. MIRECKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance", thèse Doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH, Unité Mixte de Recherche CNRS N° 5828, Institut National Polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [5] A. N. CELIK et N. Acikgoz, 'Modelling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models', Applied Energy, Vol. 84, Issue 1, January 2007, pp.1-15, 2007.
- [6] A. RICAUD, « Photopiles solaires, De la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés », ISBN: 2-88074-326-5, 352 pages, 15x21 cm, thermocollé 1997.
- [7] A. ZAATRI, "Les techniques de la Recherche Opérationnelle, Algorithme du Simplexe". Collection "les Mathématiques à l'université" SARL DAR EL DJAZAIRIA, 2002.
- [8] B. BACHELET, "Recherche Opérationnelle" GNU Free Documentation Licence, free software Foundation copyright © 1999-2003. <http://www.gnu.org>
- [9] B. WILLIAM A. and Duffie, John A., Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd Ed. John Wiley and Sons, Inc. 1991, pp.768-793.
- [10] C. TANG sah "high efficiency crystalline silicon solar cells" third technical report, final technical report june 15, 1986
- [11] D. E. GOLDBERG, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, New York: Addison-Wesley Publishing Co. -MA-, USA, 1989.
- [12] EurObserv'ER, "Photovoltaic Energy Barometer". Systèmes solaires, Le journal des énergies renouvelables. n°160. Avril 2004.
- [13] EurObserv'ER, Systèmes solaires. Le journal des énergies renouvelables. n°140. 2000.
- [14] G. O. P. OBASI, "Climate Change- Expectation and Reality", Lecture at the World Renewable Energy Congress-VI, UK, 2000.

- [15] G. ROUSSELOT, "Les énergies AEDIS" éditions 03200 VICHY 2007.
- [16] G. THABUIS, "Energies Renouvelables et Efficacité Energétique" Association Hespul. Mars 2007. Available on <http://www.hespul.org>.
- [17] H. BAREAU, "Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie". 20, avenue Grésillé ANGERS Cedex 01. Available on <http://www.ademe.fr>.
- [18] H. DAWID, Adaptive learning by Genetic Algorithm. Analytical results and applications to economic models, Springer, Berlin. (1999)
- [19] H. PAUL G., "Conceptual Physics", Third Edition, Scott-Foresman-Addison-Wesley, Inc., Menlo Park, Calif. 1999.
- [20] H. SUGIMOTO et al.' A New Scheme for Maximum Photovoltaic Power Tracking Control', Power Conversion Conference IEEE/PCC Vol.2 Nagaoka'97, pp.961-696, 1997.
- [21] J. O. ATTIA, "Electronics and Circuit Analysis using Matlab". *Department of Electrical Engineering Prairie View A&M University* © 1999 by CRC Press LLC. Boca Raton London New York Washington, D.C.
- [22] J. R. FANCHI, "Energy: Technology and Directions for the Future", Edition Elsevier Academic Press, 2004.
- [23] K. S. NARENDRA "neural networks for identification and control". Copyright by © K. S. Narendra. Center for Systems Science. Yale University. December 1998.
- [24] [5.7] L. Davis, Handbook of Genetic Algorithms, New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [25] M. A GREEN, "solar cells: operating principles, technology, and system applications", Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 3 editions. ©1982
- [26] M. AIDEN, O. OUKACHA, "Recherche Opérationnelle, Programmation Linéaire" éditions pages bleues internationales, 2005.
- [27] M. BENNASSAR, "les réseaux de neurones artificiels dans les commandes des systèmes". Wichita State University, Kansa, USA. Octobre 1993.
- [28] M. BRAIN, "How many solar cells would I need in order to provide all of the electricity that my house needs?" <http://www.howstuffworks.com/question418.htm>
- [29] M. BRAIN "How Semiconductors Work" by <http://www.howstuffworks.com/question418.htm>
- [30] M. BRAIN and Charles W. Bryant, "How Batteries Work", <http://www.howstuffworks.com> ©2007.

- [31] M. M. BELLO. and I.E. Davidson, Performance Analysis of a Photovoltaic System Coupled to a Universal Motor Using Matlab Tool, IEEE 2006.
- [32] P. GIPE, "le grand livre de l'éolien",. Energies Renouvelables. <http://www.energies-renouvelables.org>. 2006.
- [33] P. KIMMEL, Stephen Bullen, John Green, Rob Bovey, Robert Rosenberg, "Excel 2003 VBA Programmer's Reference". Copyright C_ 2004 byWiley Publishing, Inc.
- [34] R. GUIDO Araújo, Dr. Stefan Krauter, Kim Onneken, Dr. Volker Quaschnig, "Photovoltaic Energy Systems, Experiment PE1, Solar-Modules" UFRJ-COPPE-EE, TU-Berlin. 2006.
- [35] R. SIMS, 'Energy for Tomorrow's World- a renewable energy perspective', Renewable Energy World, pp.24-30, Review Issue 2000-2001.
- [36] S. NOVKOVIC, & Sverko, D. (1997), Genetic waste and the role of diversity in genetic algorithm simulations. Working Paper. Saint Mary's University. Canada.
- [37] S. RAYMOND A, and Jerry S. Faughn, "Holt Physics", Holt, Rinehart, and Winston, Austin, Texas. 1999.
- [38] S. T. KARRIS, "Numerical Analysis Using MATLAB and Spreadsheets" Second Edition, Copyright 2004 Orchard Publications.
- [39] T. MARKVART & Luis Castañer, "Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications" Copyright ©2003 Elsevier Ltd.
- [40] T. VALLEE et Murat Yildizoglu, "Présentation des algorithmes génétiques et de leurs applications en économie". Université de Nantes, LEA-CIL, Université Montesquieu Bordeaux IV. 7 septembre 2001, v. 1.2
- [41] U. KASSEL, "Photovoltaic Systems Technology", Kassel, Germany, 2003, www.uni-Kassel.de/re
- [42] W. BILLING, "Centre d'Information sur l'Energie et l'Environnement". La maison écologique, n° 17 Octobre- Novembre 2003. Available on <http://www.ciele.org>.
- [43] W.E.C, World Energy Council: Energy for Tomorrow's World – Acting Now! 2000.

- [44] W. E, Wave Energy, "Waveenergy". <http://www.waveenergy.dk>], 21. http://europa.eu.int/comm/energy_transport/atlas/htmlu/wavint.html
- [45] W. S. R. GREEN, M. A., Watt, M. E. "Applied Photovoltaics" Center of Photovoltaic Systems and Devices, University of New South Wales, Sydney, Australia, 1994.
- [46] W. & SUN, "What the heck is an MPPT? Theory, operation, and use of MPPT charge controllers for solar electric systems" © 199762006 Northern Arizona Wind & Sun. Inc.
- [47] Z. KEN. "Harnessing Solar Power: The Photovoltaics Challenge". Plenum Press, New York and London. 1990.
- [48] Z. MICHALEWICZ, Logan, T. & Swaminathan, S. (1994), Evolutionary operators for continuous convex parameters spaces, in A. Sebald & L. Fogel, eds, 'Proceedings of the 3rd Annual Conference on Evolutionary Programming', World Scientific Publishing, pp. 84–107.
- [49] Z. MICHALEWICZ, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag. (1992)