



DOCTORAL THESIS

Sciences Doctoral

Presented by

Belkacem KORICH

In order to obtain the degree of Doctor in sciences doctoral

Branch: Automatic

Specialty: Electrotechnic

Topic

**Contribution à l'amélioration des performances d'un système d'énergie
renouvelable**

Supported, on 22 /01/ 2022, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr. MANSOUR Omar	Professor	Djelfa University	President
Mr.BENAISSA Amar	Professor	Djelfa University	Supervisor
Mr.RABHIBoualaga	Professor	Biskra University	Co-Supervisor
Mr.BELADEL Abdelkader	MCA	Djelfa University	Examiner
Mr. MERZOUK Imad	MCA	Djelfa University	Examiner
Mr. BERKANI Abderrahman	MCA	Tiaret University	Examiner
Mr. BENDJEDIA Bachir	MCA	Laghouat University	Examiner

Djelfa University, FST - 2022

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE ZIANE ACHOUR-DJELFA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



N d'ordre :/...../2022

THESE

Présenté pour l'obtention du diplôme de doctorat science

Par : **KORICH BELKACEM**

Spécialité : Automatique

Option : Electrotechnique

Thème :

*Contribution à l'amélioration des performances
d'un système d'énergie renouvelable*

Devant le jury composé de messieurs :

Mr. MANSOUR Omar	professeur	Université de Djelfa	président
Mr.BENAISSA Amar	professeur	Université de Djelfa	Directeur de thèse
Mr.RABHI Boualaga	professeur	Université de Biskra	Co-Directeur de thèse
Mr.BELADEL Abdelkader	MCA	Université de Djelfa	Examineur
Mr. MERZOUK Imad	MCA	Université de Djelfa	Examineur
Mr. BERKANI Abderrahman	MCA	Université de Tiaret	Examineur
Mr. BENDJEDIA Bachir	MCA	Université de Laghouat	Examineur

Remerciements

*Je remercie, en premier lieu, **ALLAH** qui m'a donné la force et la patience pour réaliser ce travail.*

Le sujet de cette thèse m'a été proposé par Pr BENAÏSSA Amar et Pr RABHI Boualaga que je remercie très sincèrement, pour ses conseils et suivis continuels pendant ces années de réalisation de ce travail.

Je remercie aussi mes amis BAKRIA Darradji et MHAMMEDI Djamel pour ses aides et ses soutiens moraux durant la préparation de cette thèse.

Je tiens à remercier Pr MANSOR Omar de l'université de Djelfa pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury.

*Je remercie aussi vivement Dr. BERKANI Abderrahman de l'université de Tiaret, Dr. BENDJEDIA Bchir de l'université de laghouat, Dr. MAERZOUK Imad de l'université de Djelfa et **Dr** BELADEL Abelkader de l'université de Djelfa pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de faire partie du jury.*

Dédicaces

*Je dédie cette thèse
A mes chers parents,*

*RABIA et BENSAMEL
A ma femme et ma fille*

*WAHIBA ET SHAHD,
A mes chers frères et sœurs,*

*A tous mes amis,
A tous ceux que j'aime*

*A vous
Je dédie cette thèse.*

Table des matières

Introduction générale	01
Chapitre 1	
Etat de l'art et modélisation du système photovoltaïque	
1.1 Introduction	03
1.2 Evolution du marché mondial de l'énergie photovoltaïque	03
1-3 Le rayonnement solaire	05
1-3-1- Caractéristique du rayonnement solaire	05
1-3-1-1 L'atmosphère	05
1-3-1-2 Masse d'air	05
1-3-2-Mesure du rayonnement solaire	06
1-3-3-Les type de rayonnement	06
1-3-3-1 Le rayonnement direct	06
1-3-3-2 Le rayonnement diffus	06
1-3-3-3 L'albédo	07
1-3-3-4 Le rayonnement global	07
1-3-4-Spectre du rayonnement	07
1-4 L'énergie solaire	08
1-4-1 L'énergie photovoltaïque	09
1-4-2-Topologies de systèmes photovoltaïques	09
1-4-3-L'effet photovoltaïque	11
1-4-4-Principe générale	11
1-4-5- La Jonction PN utilisée comme capteur	13
1-4-6- La cellule photovoltaïque	13
1-4-7- Type et rendement des cellules photovoltaïques	13
1-5- Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV	14
1-5-1- Les avantage	14
1-5-2- Les inconvénients	15

1-6-La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie	15
1-7 Modélisation du système photovoltaïque	16
1-7-1 Schéma équivalent d'une cellule solaire	16
1-7 -2 Module Photovoltaïque	18
1-7 -3 Caractéristique de module PV	19
1-7 -4 Générateur Photovoltaïque	21
1-8 Influence de L'éclairement sur le GPV	24
1-9 modélisation d'un GPV soumis à un ombrage	26
1-9 -1 Description de l'ombrage	26
1-9-2 Effet d'ombrage partiel	26
1-9 -3-Protection du PV	28
1-10 Convertisseur DC/DC (Hacheur)	29
1-10 -1-Convertisseur Buck	30
1-10-2-Convertisseur Boost	32
1-11 Conclusion	34

Chapitre 2

Techniques classiques de recherche du point de puissance maximale

2-1 Introduction	36
2-2 Principe de la recherche du point de puissance maximale	36
2-3 Les commandes MPPT classique	39
2-3-1 Méthode de perturbe et d'observe (P&O)	39
2-3-2 Méthode d'Incrémentale Conductance	42
2-3-3 Méthode La Tension de circuit ouvert fractionnaire (Voc)	43
2-3-4 Méthode La court-circuit fractionné Courant de circuit (Isc)	44
2-3-5 Méthode logique floue	44
2-3-5-1 La fuzzification	46
2-3-5-2 L'inférence	46
2-3-5-3 La défuzzification	47
2-4 Conclusion	47

Chapitre 3 Techniques méta-heuristiques de recherche du point de puissance maximale

3-1 Introduction	48
3-2 Techniques d'optimisations méta-heuristiques	48
3-2-1 Optimisation d'essaim de particules (PSO)	48
3-2-2 Algorithme d'Optimisation des Loups Gris (GWO)	52
3-2-3 Algorithme d'Optimisation des hyènes tachetées (SHO)	56
3-2-3-1 Introduction	56
3-2-3-2 modèles mathématiques	58
3-2-3-2-1 Recherche et encerclement de proies	58
3-2-3-2-2 Chasse	60
3-2-3-2-3 L'attaque	60
3-2-3-3 Application SHO pour le suivi MPPT	62
3-3 Conclusion	64

Chapitre 4

Résultat de Simulation

4-1 Introduction	65
4-2 Description du système	66
4-3 Performances dans des conditions standard	68
4-4 Performances dans des conditions d'ombrage	71
4-5 Performance sous changement rapide de l'irradiance solaire :	73
4-6 Variation de charge 100Ω à 50Ω avec éclairage constante	75
4-7 Variation de la température avec éclairage constante	77
4-8 Conclusion	80

Conclusion générale	81
----------------------------	----

Bibliographie	84
----------------------	----

Liste des figures

Chapitre 1

Fig 1.1 Puissance des installations ajoutées par différentes sources d'énergie en 2018	03
Fig. 1.2 Evolution de la capacité des installations PV cumulatifs installés globaux 2000-2018 (MW) [6].	04
Fig 1.3 Description du nombre de masse d'air	06
Fig 1.4 Différents composantes du rayonnement	07
Fig 1.5 Répartition spectrale du rayonnement	08
Fig 1.6 Les systèmes photovoltaïques autonomes	10
Fig 1.7 Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau	11
Fig 1.8 Principe de fonctionnement d'une jonction P-N	12
Fig 1.9 Répartition énergétique en Algérie	16
Fig 1.10 Circuit de cellule PV équivalent	16
Fig 1.11 Module photovoltaïque	19
Fig 1.12 Caractéristique de $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque	21
Fig 1.13 Caractéristique de $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque	21
Fig 1.14 Structure d'un générateur photovoltaïque	22
Fig 1.15 Modules photovoltaïques connectés en série	22
Fig 1.16 Modules photovoltaïques connectés en parallèle	16
Fig 1.17 Différentes connexions pour le générateur PV série /parallèle	16
Fig 1.18 Caractéristique $P=f(V)$ d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable.	25
Fig 1.19 Caractéristique $I=f(V)$ d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable	25
Fig 1.20 Différentes configurations avec: (a) irradiation uniforme, (b) ombrage léger, (c) ombrage moyen, (d) ombrage sévère	27
Fig 1.21 la caractéristique $I=f(V)$ on ombrage partial	28
Fig 1.22 la caractéristique $P=f(V)$ on ombrage partial	28
Fig 1.23 Diodes de protection des modules	29
Fig 1.24 Convertisseur DC/DC	29
Fig 1.25 La forme de variation en fonction du rapport cyclique	30
Fig 1.26 Circuit fonctionnel d'un convertisseur Buck	31

Fig 1.27 fermes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck	32
Fig 1.28 Circuit fonctionnel d'un convertisseur Boost	33
Fig 1.29 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur	33

Chapitre 2

Fig 2.1 Chaîne de conversion photovoltaïque.	37
Fig 2.2 Recherche de recouvrement du point de puissance maximale a) suite à une variation d'ensoleillement. b) suite à une variation de charge. c) suite à une variation de température.	38
Fig 2.3 caractéristique de puissance dans la P&O	40
Fig 2.4 Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation	41
Fig 2.5 Incrémentale Conductance (IncCond)	42
Fig 2.6 Organigramme de l'algorithme Incrémental de la conductance	43
Fig 2.7 Fonctions d'adhésion	45
Fig 2.8 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue	45

Chapitre 3

Fig 3.1 organigramme de PSO	50
Fig 3.2 Organigramme de l'algorithme GWO.	53
Fig 3.3 Mise à jour des positions des loups.	55
Fig 3.4 Comportement de la meute des loups gris lors de la chasse : (A) Poursuite de la proie, (B-D) harcèlement et encerclement, (E) Position d'attaque.	55
Fig 3.5 Comportement de chasse des hyènes tachetées : (A) recherche et suivi de proies (B) poursuite (C) gênante et encerclement (D) situation immobile et attaque de proies	57
Fig 3.6 Vecteurs de position 2D de l'hyène tachetée	59
Fig 3.7 Attaquer une proie ($ E < 1$).	61
Fig 3.8 Recherche de proies ($ E > 1$).	62
Fig 3.9 Organigramme de l'algorithme SHO.	63

Chapitre 4

Fig 4.1 Structure du système proposé	67
Fig 4.2 caractéristique $P=f(V)$ en ombrage partial	68
Fig 4.3 Algorithme P&O sous conditions standards	69

Fig 4.4 Algorithme GWO sous conditions standards	69
Fig 4.5 Algorithme SHO sous conditions standards	70
Fig 4.6 Algorithme P&O sous conditions d'ombrage partiel	71
Fig 4.7 Algorithme GWO sous conditions d'ombrage partiel	72
Fig 4.8 Algorithme SHO sous conditions d'ombrage partiel	72
Fig 4.9 Algorithme GWO sous changement rapide d'irradiation	74
Fig 4.10 Algorithme SHO sous changement rapide d'irradiation	74
Fig 4.11 Algorithme GWO sous changement de la charge	76
Fig 4.12 Algorithme SHO sous changement de la charge	76
Fig 4.13 Influence de la température sur $P=f(V)$.	78
Fig 4.14 Algorithme GWO sous changement de la température	79
Fig 4.15 Algorithme SHO sous changement de la température	79

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques	14
Tableau 2.1 résumé du fonctionnement de l'algorithme P&O	42
Tableau 2.2 Tableau de réglage flou	46
Tableau 4.1 Données de caractéristiques électriques du module PV (KC200GT) dans les conditions standard	66
Tableau 4.2 Paramètres du convertisseur élévateur DC-DC	66
Tableau 4.3 Performances dynamiques pour les techniques MPPT pour les conditions standards	71
Tableau 4.4 Performances dynamiques pour les techniques MPPT pour les conditions d' ombrage	73
Tableau 4.5 Performances dynamiques pour les techniques MPPT pour les Changement rapide d' irradiation	75

Liste des symboles

MPPT	Maximum Power Point Tracking.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
DC/DC	Hacheur Courant Continu/Courant Continu
MOSFET	Métal Oxyde Silicone Field effect Transistor
P&O	Perturbe et Observe
INC	incremental conductance
GWO	Grey Wolf Optimization
SHO	Spotted Hyena Optimization
PSO	Particle Swarm Optimization
ABC	Artificial Bees Colony
θ	L'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg)
I_o	Courant de saturation de la diode
n	facteur d'idéalité de la diode
k	constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
q	Charge électrique (en coulomb)
T	température en Kelvin
I_{ph}	Courant photonique généré par la lumière,
R_p	Résistance de parallèle en Ω ,
R_s	Résistance série en Ω ,
I_{RP}	Courant circulant dans la résistance R_p .
I_{RS}	Courant circulant dans la résistance R_s .
a	Facteur d'idéalité [1.6 pour le silicium].
I_{phn}	Courant photonique nominal en STC,
T	Température de la cellule en Kelvin,
T_n	Température nominale en Kelvin au STC, 25 ° C,
K_i	Coefficient de température du courant de court-circuit,
G	Eclairement solaire en 1 kW /
G_n	Rayonnement solaire en KW / c .
STC	Condition de température standard ;
I_{scn}	Courant de court-circuit nominal au STC,
V_{ocn}	Tension nominale à vide du STC,

K_v	Coefficient de température de la tension de circuit ouvert à I_{sc} .
q	Charge de l'électron $1,6 \times C$.
FF	Facteur de forme
P_{max}	Puissance maximale
η	Rendement
N_{pp}	Nombre du module connecté en parallèle.
N_{ss}	Nombre de modules connectés en série.
α	le rapport cyclique
τ	temps à l'état fermé
T_s	Période
I_{pv}	Courant photovoltaïque (A)
V_{pv}	Tension photovoltaïque (V)
L	l'inductance de filtre de convertisseur Buck et Boost
I_L	Courant moyen passant à travers l'inductance
E	l'erreur
CE	variation d'erreur
OP	ombrage partiel
BT	basse tension
AM	masse d'air
K	kelvin
λ	longueur d'onde
PPM	point de puissance maximale

Introduction générale

Un des défis de grande importance pour les années prochaines, c'est la production d'énergie. En plus, les besoins d'énergie des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement [01].

Ces dernières années, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles.

Les sources fossiles sont la source la plus importante pour couvrir la consommation mondiale d'énergie, ce qui a un impact négatif sur la nature et l'environnement. Le changement climatique, qui est l'un des graves problèmes auxquels l'humanité est confrontée ce siècle, est dû aux émissions de gaz à effet de serre, en particulier la combustion de combustibles fossiles [02].

On entend par des énergies renouvelables, celles issues du vent, du soleil, de la chaleur de la terre ou de l'eau. Les énergies renouvelables sont des énergies illimitées, alors que les énergies fossiles sont limitées.

L'énergie solaire photovoltaïque peut être considérée comme l'une des énergies renouvelables qui se caractérise par le plus grand potentiel de développement. Parmi ses avantages, nous citons sa propreté et sa sécurité offerte lors de son utilisation.

Néanmoins, les deux principaux problèmes qui limitent l'utilisation des systèmes PV sont le coût élevé de l'installation et le faible rendement de la conversion d'énergie. De plus, nous ne pouvons obtenir plus de vingt pour cent lorsque nous convertissons l'énergie solaire en énergie électrique. Par conséquent, le reste de l'énergie solaire est perdu dans l'environnement car il n'est pas converti en énergie électrique utile.

Comme dans de nombreux systèmes d'énergie renouvelable, maintenir une efficacité maximale reste un grand défi, en particulier lorsque des changements rapides se produisent dans les conditions météorologiques. Les chercheurs se sont concentrés sur trois sujets de base afin d'augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques [03] : la conception de systèmes de suivi de l'irradiance solaire, la mise en œuvre de convertisseurs de puissance efficaces et le développement d'un suiveur de point de puissance maximale (algorithmes MPPT) utilisés dans les systèmes PV nouveaux et existants, alors que les

deux premiers sujets ne peuvent concerner que la conception et l'installation de nouveaux systèmes PV [04].

Pour augmenter la puissance électrique de sortie d'un système PV, un algorithme de suivi de puissance ponctuelle maximale doit être ajusté au point de fonctionnement. De plus, la connexion du système PV à la charge se fait à l'aide d'un convertisseur élévateur DC-DC [04]. En fait, la sortie des algorithmes MPPT peut être la tension de référence, le courant de référence ou le rapport cyclique du contrôleur de modulation de largeur d'impulsion (PWM), et le point de fonctionnement des systèmes PV peut être contrôlé et ajusté via ces paramètres.

Sous un éclairage uniforme, il existe un MPP unique dans la courbe puissance-tension qui change en fonction des variations de température et d'éclairage. Ici, l'algorithme MPPT est chargé de trouver de nouveaux points de fonctionnement optimaux en ligne avec ces changements. Une partie des algorithmes MPPT conventionnels proposés à cette fin implique l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) [04], l'algorithme de conductance incrémentale et l'algorithme de contrôle de recherche d'extremum [05], [06].

Le mouvement des nuages, des grands bâtiments et des ombres des arbres peut générer une irradiance plus faible reçue par certains éléments des systèmes PV ; une telle condition est appelée condition d'ombrage partiel (PSC). Sous PSC, il existe différents MPP dans la courbe PV en PV systèmes : un cluster de points de puissance maximum locaux (LMPP) et un point de puissance maximum global (GMPP) [06]. Sous PSC, les scientifiques ont découvert que les algorithmes MPPT conventionnels ont de faibles performances, en particulier lorsqu'ils supposent un seul MPP sur la courbe P-V [07].

En réalité, en raison de leurs faibles performances de recherche globale, ces méthodes (telles que la méthode P&O) sont souvent piégées dans les LMPP et ne peuvent garantir la convergence vers GMPP [08]. En raison des limitations existantes dans les algorithmes MPPT classiques, plusieurs algorithmes ont été présentés au cours des années précédentes sur la base d'algorithmes d'intelligence artificielle et d'optimisation stochastique, dont beaucoup ont été examinés dans [05], [06].

Dans cette thèse, un nouvel algorithme SHO est utilisé pour concevoir un algorithme MPPT rapide, robuste et précis pour les systèmes PV. L'algorithme SHO est une méthode nouvelle et puissante qui s'est avérée efficace pour résoudre différents problèmes d'optimisation avec de nombreux points optimaux locaux.

Un système PV est simulé dans cette thèse, et les performances de la méthode suggérée sont examinées dans diverses conditions environnementales. Cette étude est organisée de la manière suivante : Le chapitre 01 comprend un état de l'art sur l'énergie solaire et la modélisation du modèle PV. Dans le chapitre 02, on passe en revue les méthodes classiques telles que P&O. Les nouveaux algorithmes méta-heuristiques PSO, GWO et SHO sont présentés dans le chapitre 03. Les résultats et les discussions sont présentés dans le chapitre 04. Enfin, on termine par une conclusion générale et perspective.

1.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque (PV) fait partie des énergies qui peuvent être une alternative au carburant. Par conséquent, l'intérêt pour elle a augmenté par les chercheurs afin de répondre aux futurs besoins énergétiques mondiaux. Récemment, la technologie de fabrication de modules photovoltaïques a été considérablement améliorée en termes de valeur et de qualité de fabrication [09], [10]. Ces raisons ont conduit les politiques comme les scientifiques à lancer et financer de nombreux travaux de recherche dans de multiples axes afin de promouvoir ce domaine et de créer de nouvelles richesses. Cette évolution se traduit par la réduction du coût de fabrication des modules photovoltaïques en complément des travaux de recherche qui ont permis de promouvoir l'électronique de puissance. Ainsi, la mise en place d'installations photovoltaïques, notamment de petites puissances raccordées au réseau basse tension (BT), est progressivement apparue. Une grande attention a été accordée à l'onduleur utilisé dans le système photovoltaïque connecté au réseau de distribution d'électricité car ses caractéristiques techniques peuvent affecter la qualité de la production d'électricité. Ainsi, la rentabilité financière du système PV peut être affectée [09].

1.2 Evolution du marché mondial de l'énergie photovoltaïque

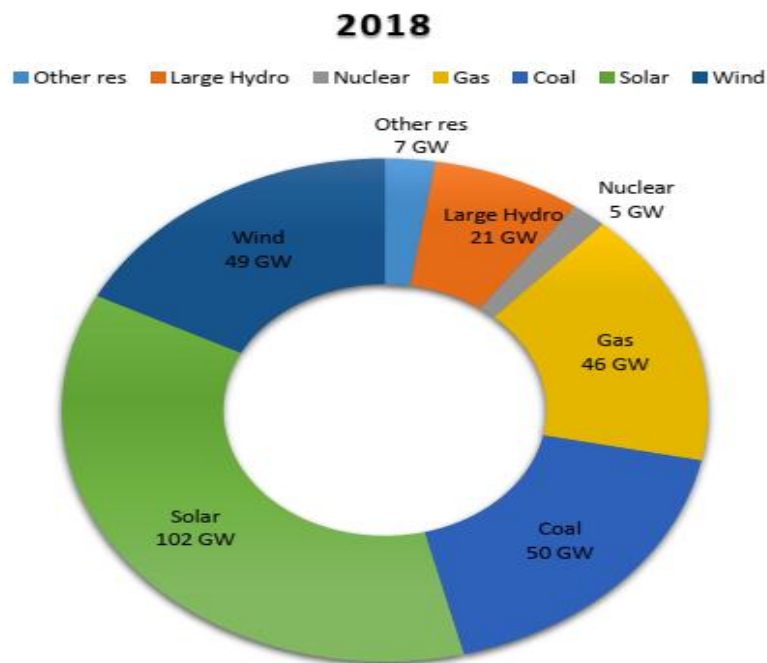


Fig 1.1 Puissance des installations ajoutées par différentes sources d'énergie en 2018 [6]11.

Jusqu'à ces dernières années, le domaine de l'énergie photovoltaïque a connu des progrès remarquables en termes de capacité des installations à l'échelle mondiale si on la compare avec d'autres types d'énergies renouvelables (Fig 1.1) [12]. Malgré cela, son pourcentage total d'énergies renouvelables ne représente que 33% de la production totale d'énergie mondiale en 2017, donc, afin d'être une véritable alternative aux énergies fossiles, il y a encore un effort pour le couper, ainsi que pour avoir un meilleur rendement que les autres énergies renouvelables [13].

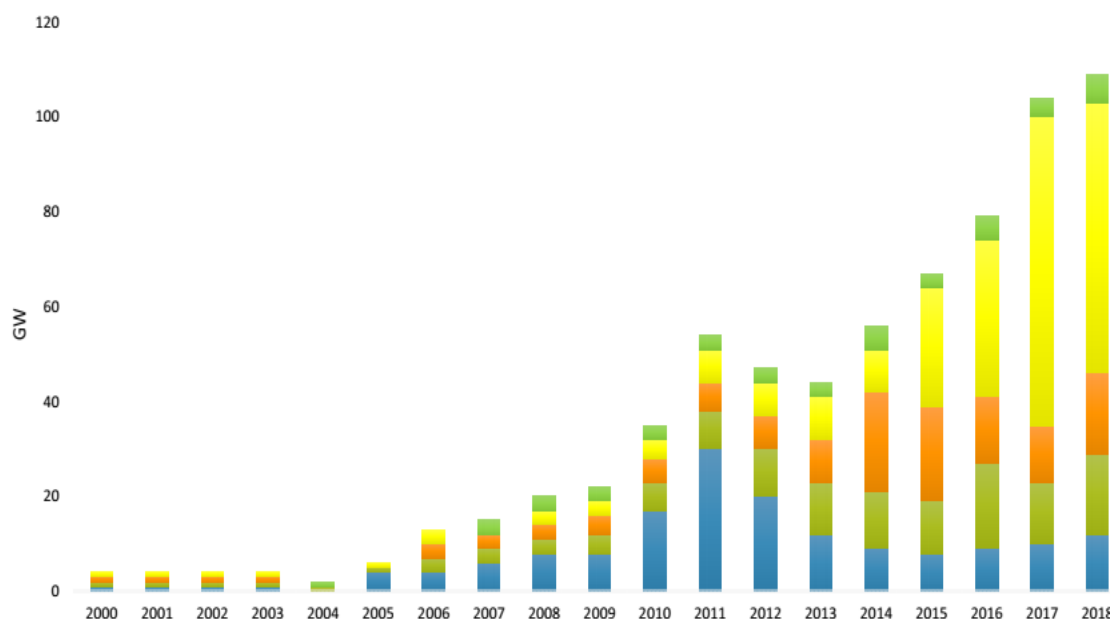


Fig. 1.2 Evolution de la capacité des installations PV cumulatifs installés globaux

2000-2018 (MW) [6]11.

En termes de chiffres obtenus, la technologie photovoltaïque a connu un grand développement et à un rythme historiquement rapide par rapport aux autres énergies renouvelables, ce qui en fait l'une des principales sources de production d'énergie dans le monde. Selon les statistiques, le marché mondial du solaire photovoltaïque a atteint un record de 102,4 gigawatts en 2018, alors qu'il ne dépassait pas 5 mégawatts en 1982 [12].

La Chine est restée le leader mondial des installations photovoltaïques (34 %) jusqu'en 2018, suivie des États-Unis (12 %), du Japon (11 %) et de l'Allemagne (9 %). De nombreux marchés hors Europe n'ont consacré qu'une petite partie de leur potentiel financier à ce type d'énergies renouvelables. Cependant, l'expérience est encore balbutiante dans ce domaine pour la plupart des pays en développement à savoir les pays africains, le Moyen-Orient, l'Asie du Sud-Est et l'Amérique latine [12].

1-3 Le rayonnement solaire

Comme on le sait scientifiquement, le rayonnement solaire se propage uniformément dans l'espace et dans toutes les directions. Lorsque le rayonnement solaire vers la couche atmosphérique, l'intensité totale à l'extérieur de la planète diminue à 1367 W/m², et l'énergie disponible en un certain point est variable en raison de la rotation et de l'inclinaison de la terre selon plusieurs facteurs qui parfois augmentent et parfois et à partir de là, on peut dire que l'intensité du rayonnement solaire est très variable selon :

- la localisation géographique du site (spécialement par rapport à sa latitude);
- la saison;
- l'heure;
- les conditions météorologiques (nébulosité, poussière, humidité...)
- l'altitude du lieu.

1-3-1- Caractéristique du rayonnement solaire

1-3-1-1L'atmosphère

Les couches de l'atmosphère modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire qui subit une modulation et une atténuation de son spectre, suite aux phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (poussières de cendres, cristaux fins, fines gouttelettes, fumées de pollution industrielle, qui vont de 0,5 à 10 µm). Sur la base de ce qui précède, la couche d'ozone absorbe la plupart des rayons ultraviolets, tandis que la vapeur d'eau absorbe les rayons infrarouges [14].

1-3-1-2 Masse d'air

On appelle masse d'air, la perte de l'énergie solaire par l'absorption atmosphérique. AM Elle est donnée en fonction de l'angle entre le soleil et le zénith.

$$AM = 1/\sin \theta \quad (I-1)$$

Où : θ : représente l'angle entre la position du soleil et le zénith exprimée en (Deg) [11].

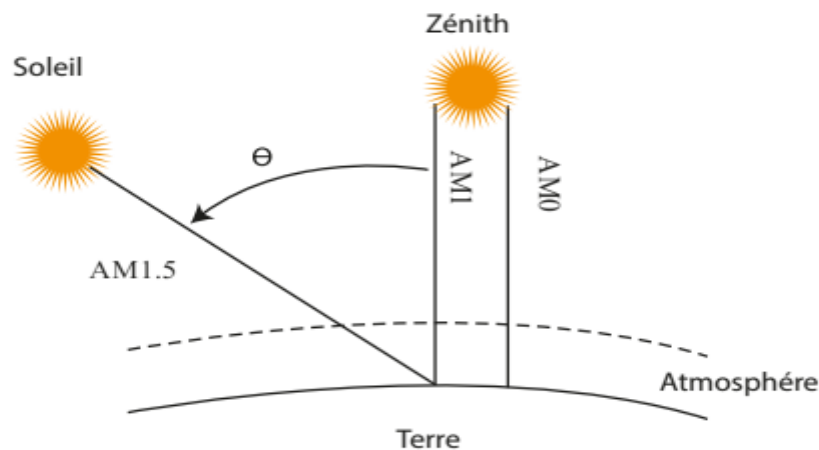


Fig 1.3 Description du nombre de masse d'air

1-3-2-Mesure du rayonnement solaire

L'insolation peut être défini comme l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il peut être exprimé en watts par mètre carré (W/m^2). La ressource solaire et donc l'insolation varie de zéro, au lever du soleil, à sa valeur maximale, généralement à midi solaire.

L'insolation peut également exprimer la quantité d'énergie solaire capturée sur un plan pendant une période de temps spécifiée, généralement exprimé en kilowattheures par mètre carré (kWh/m^2), "l'heure d'insolation maximale", en mégajoules par mètre carré (MJ/m^2) ou en calories par centimètre carré (cal/cm^2) pour l'intervalle de temps spécifié. - un jour ou une heure.

1-3-3-Les type de rayonnement

1-3-3-1 Le rayonnement direct

C'est un rayonnement qui est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux. Ils peuvent être mesurés par un pyromètre.

1-3-3-2 Le rayonnement diffus

C'est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques [12].

1-3-3-3 L'albédo

C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusé ou réfléchi par un obstacle. Ce Terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur Réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par Définition, le corps noir possède un albédo nul.

1-3-3-1-4 Le rayonnement global

C'est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le Sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyromètre ou un Solari Mètre sans écran. Rayonnement Globale = rayonnement direct + rayonnement diffus + Rayonnement réfléchi.

La figure 1.4 représente les différents types composants de rayonnement solaire

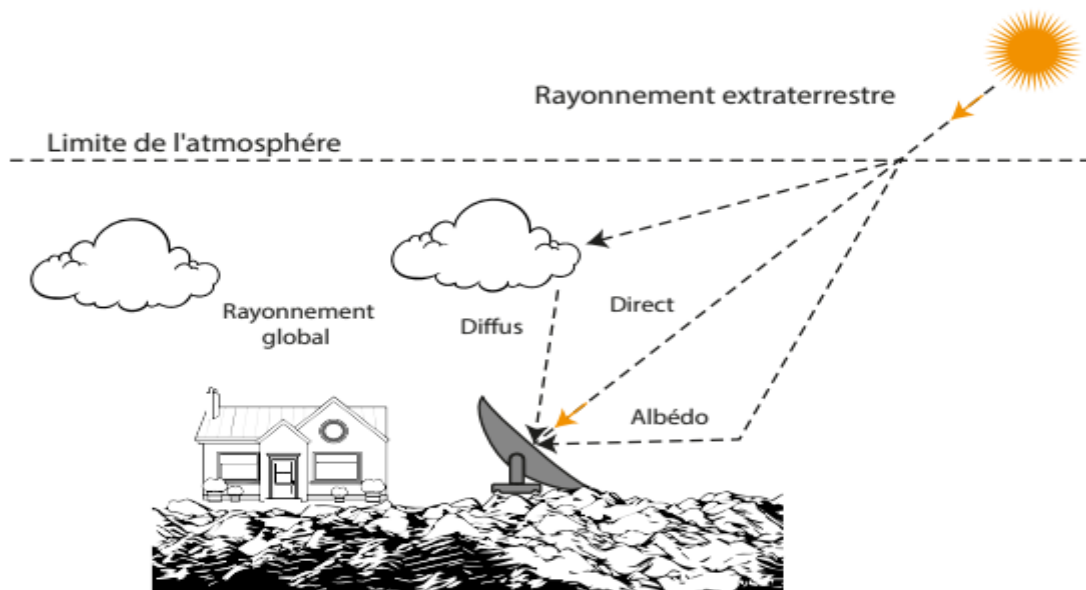


Fig 1.4 Différents composantes du rayonnement

1-3-4-Spectre du rayonnement

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

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom d'AM 0. Sa distribution en énergie est répartie en [12]:

Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \mu\text{m}$ 6.4%

Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ 45.6%

Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \mu\text{m}$ 48.0%

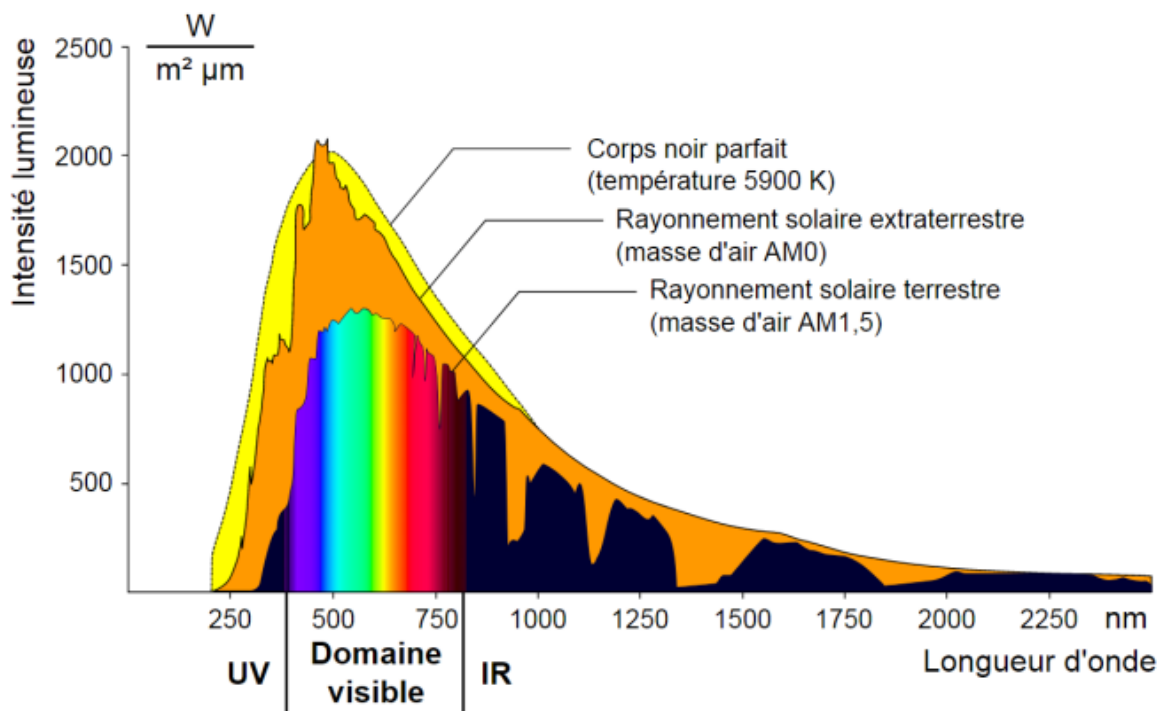


Fig 1.5 Répartition spectrale du rayonnement

1-4 L'énergie solaire

Le soleil est la source d'énergie la plus puissante et cette énergie est gratuite, il n'y a qu'à l'exploiter sur terre, il existe différents types d'énergies solaires.

- l'énergie passive
- l'énergie solaire thermique
- l'énergie thermodynamique :
- l'énergie photovoltaïque

1-4-1 L'énergie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque résulte de la conversion directe de la lumière solaire en énergie électrique grâce à des cellules généralement constituées principalement de silicium cristallin, qui est la technologie la plus avancée du secteur industriel. En fait, le silicium est l'un des éléments les plus avancés et les plus abondants sur Terre sous forme de silice non toxique.

Le mot 'photovoltaïque' vient du grec 'photo' signifiant lumière et de 'voltaïque' qui tire son origine du nom du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827) qui a grandement contribué à la découverte de l'électricité. , le photovoltaïque signifie littéralement « électricité légère » [15]. Antoine Becquerel a découvert la conversion de la lumière en électricité, appelée effet photoélectrique, en 1839, mais les scientifiques n'ont approfondi et exploité ce phénomène physique qu'un siècle plus tard [16].

1-4-2-Topologies de systèmes photovoltaïques

Il existe deux types de systèmes photovoltaïques : Systèmes autonomes et systèmes en réseau. Les systèmes photovoltaïques autonomes avec une puissance photovoltaïque maximale peuvent avoir des milliwatts à plusieurs kilowatts.

Ces systèmes ne sont pas connectés à un réseau électrique. Les systèmes autonomes ont généralement un système de stockage intégré, afin de garantir que le système autonome est également alimenté par une source d'alimentation dans des moments sans rayonnement ou à très faible rayonnement.

Dans le cas où ces systèmes sont utilisés seulement pendant la période où l'ensoleillement est suffisant pour alimenter le système en énergie électrique directement, le système de stockage n'est pas obligatoire.

Actuellement, Il existe plusieurs variétés de systèmes autonomes.

Les exemples vont du solaire calculatrices et montres aux systèmes de contrôle du trafic, aux systèmes capables de fournir un ou plusieurs bâtiments situés dans des zones reculées alimentés en électricité.

Ils peuvent être des systèmes à courant continu avec ou sans batterie de stockage, ou ils peuvent être des systèmes AC avec un onduleur.

Les systèmes PV connectés au réseau sont toujours connectés au réseau public avec un onduleur adapté car un module PV ne délivre que du courant continu [09].

La figure 1.6 schématise un système autonome

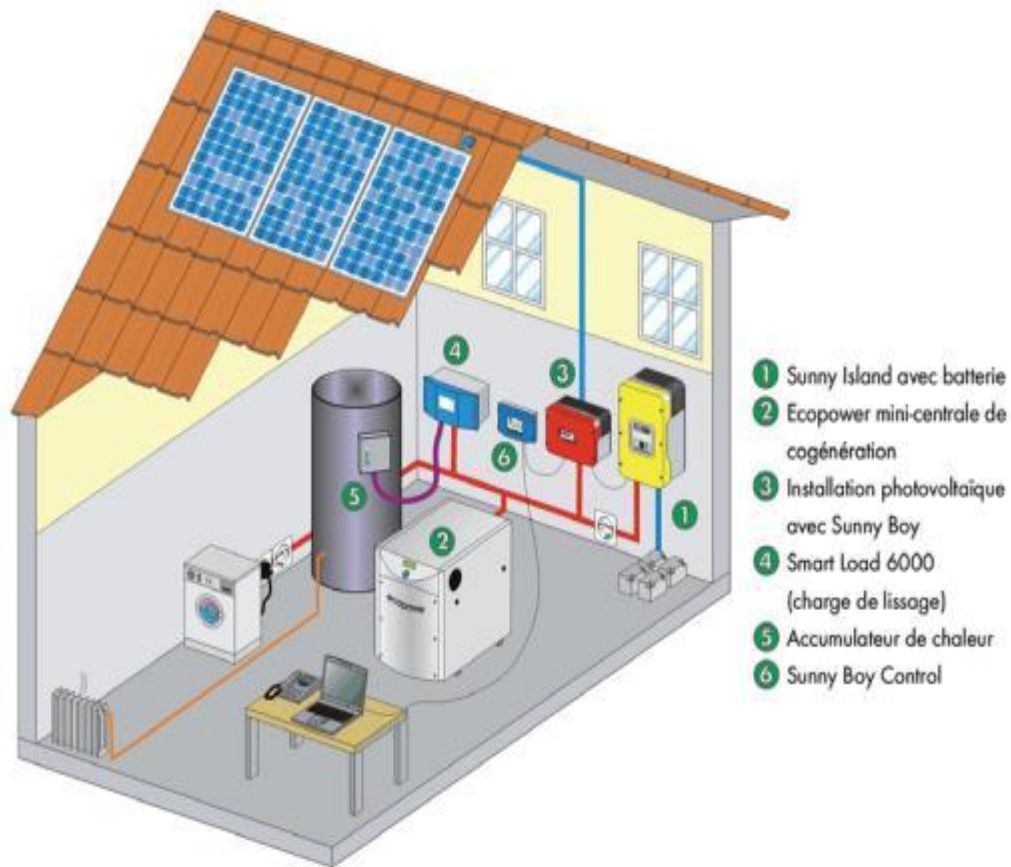


Fig 1.6 Les systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes photovoltaïques décentralisés connectés au réseau ont principalement une petite plage de puissance et sont installés sur le toit des bâtiments (installation sur toit plat) ou intégré aux façades des bâtiments.

Les puissances installées des systèmes PV connectés au réseau électrique peuvent aller jusqu'à la plage en MW. Dans ce cas, il est possible d'alimenter directement le réseau moyenne ou haute tension [09].

La figure 1.7 représente les systèmes PV décentralisés connectés au réseau.

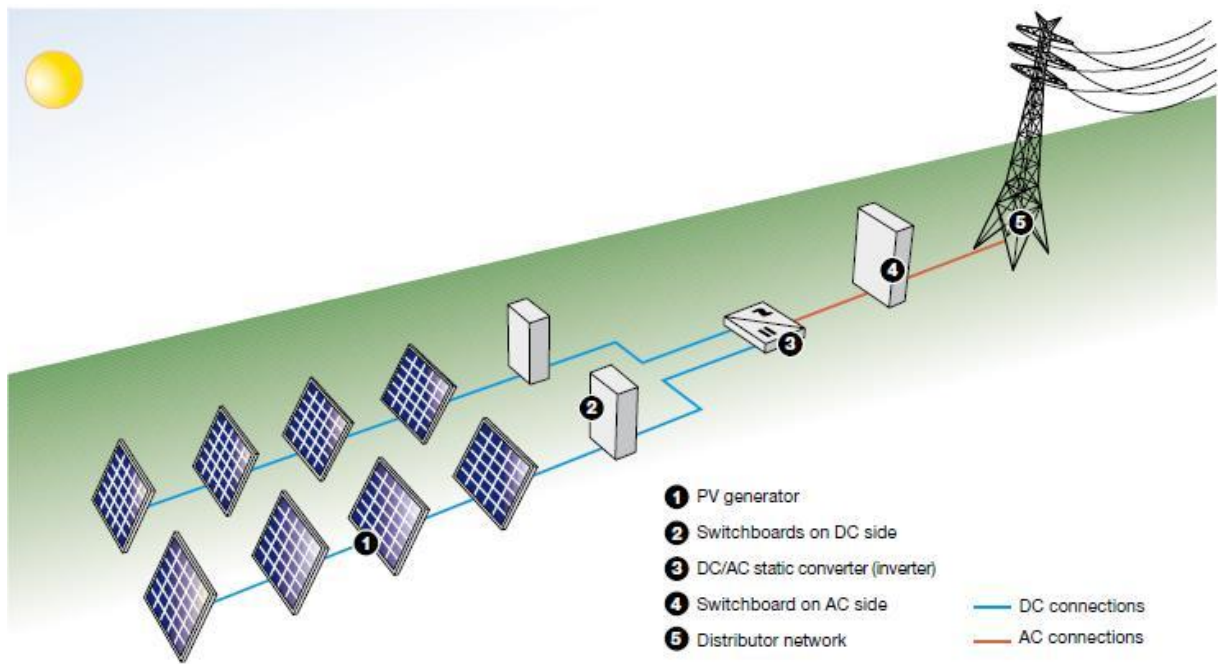


Fig 1.7 Les systèmes PV décentralisés connectés au réseau

1-4-3-L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé Cellule solaire [17].

1-4-4-Principe générale

Le principe de base de la cellule solaire est la formation d'une jonction réalisée par le dopage du silicium. La création de séparation des électrons et des trous, qui sont générés par l'absorption de la lumière dans le matériau, est réalisée par la barrière de potentiel dans le semi-conducteur.

Durant le phénomène de la formation de la jonction, les électrons diffusent vers la zone p et les trous vers la zone n (alignement du niveau de Fermi), afin de tendre vers un équilibre thermodynamique. Le dipôle, créé aux bords de la jonction, entraîne la formation d'un champ électrique qui s'oppose à l'équilibre à tout déplacement de charges.

La polarisation de la Jonction en direct permet alors de diminuer la hauteur de la barrière de potentiel et donc l'intensité de champ électrique permettant le passage de porteurs de

charges. A l'opposé, une Polarisation inverse augmentera la hauteur de la barrière [18]. La relation courant-tension pour une diode idéale à l'obscurité est donnée par la relation:

$$I = I_0 \left(e^{\left(\frac{q*V}{n*k*T}\right)} - 1 \right) \quad (1.1)$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation de la diode

n : facteur d'idéalité de la diode

k : constante de Boltzmann ($1,38*10^{-23}$ J/K)

q : charge électrique (en coulomb)

T : température en Kelvin

- **Dopage de type N** : Dans ce type de dopage on introduit dans la structure cristalline du Semi-conducteur des atomes étrangers possédant 05 électrons périphériques qui ont la propriété de donner chacun un électron Excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (ex : le phosphore) [19].

- **Dopage de type P** : Le dopage de type P (positif) utilise des atomes étrangères possédant 03 électrons périphériques dont l'insertion dans la structure cristalline du Semi-conducteur donnera un trou excédentaire. (ex : le bore) [19].

La figure 1.8 explique le principe du fonctionnement de la jonction P-N

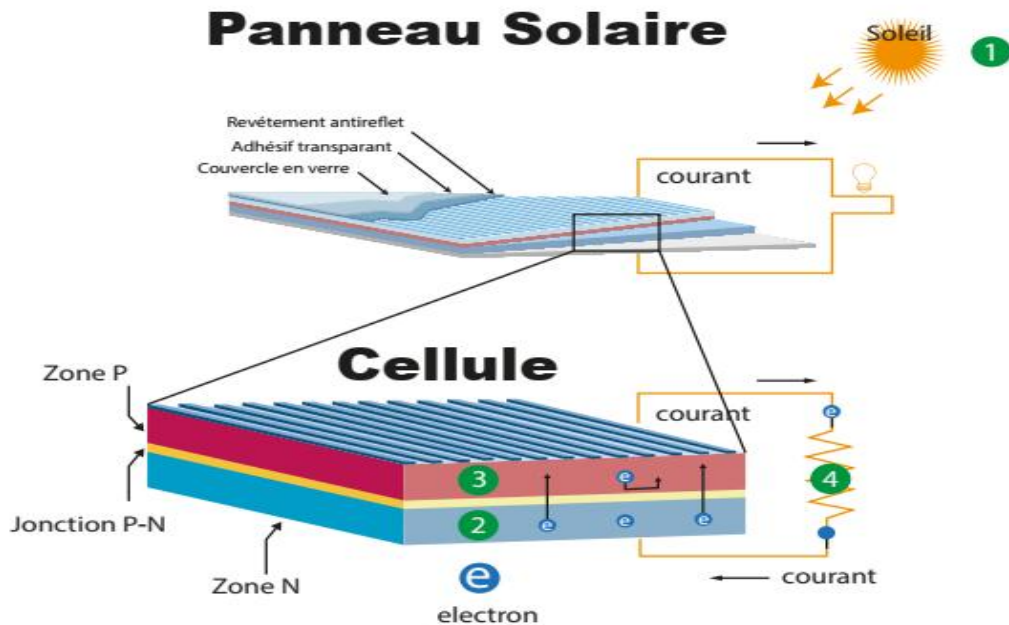


Fig 1.8 Principe de fonctionnement d'une jonction P-N

1-4-5- La Jonction PN utilisée comme capteur

Si on polarise électriquement une jonction PN classique à base de silicium, on obtient les caractéristiques statiques d'une diode. L'avantage de si est qu'un courant proportionnel à l'éclairement apparaît, si la jonction PN est exposée au soleil.

Les générateurs solaires photovoltaïques utilisent cette particularité pour produire l'électricité [20].

1-4-6- La cellule photovoltaïque

Les États-Unis d'Amérique sont le premier pays au monde à développer une cellule photovoltaïque (cellule solaire) en 1954 par des chercheurs affiliés aux laboratoires Bell, qui ont découvert que lorsque des « impuretés » étaient ajoutées à un semi-conducteur, la sensibilité du silicium, en particulier du bore et de phosphore, pourrait augmenter.

1-4-7- Type et rendement des cellules photovoltaïques

Il existe plusieurs types de cellules solaires (ou cellules photovoltaïques), que chaque type de cellule a son propre rendement et son propre coût. Malgré cela, quel que soit leur type, leur rendement est encore très faible : allant seulement de 8 % à 23 % de l'énergie qu'ils reçoivent de la lumière du soleil. Dans l'industrie, il existe aujourd'hui trois principaux types de cellules solaires sur le marché mondial [11].


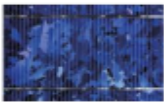
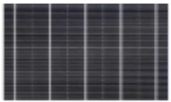


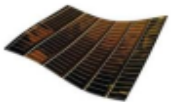
Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaines d'applications
	Théorique	En labo	Disponible	
Silicium Monocristallin 	27	24.7	14-16	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium Poly cristallin 	27	19.8	12-14	Modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe 	25	13	6-8	Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre, de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de gallium GaAs 	29	27.5	18-20	Système de concentrateur, espace (satellites)
CIS (cuivre indium-sélénium) 	27.5	18.2	10-12	Appareils de faible puissance, modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmiium CdTe 	28.5	16	9-11	Modules des grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)

Tableau 1.1 Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques

1-5- Les avantages et les inconvénients d'un générateur PV

1-5-1- Les avantage

Par rapport aux autres sources renouvelables, la photovoltaïque offre des avantages particuliers:

- Elle est exploitable pratiquement partout, la lumière du soleil étant disponible dans le monde entier.
- L'équipement de production peut presque toujours être installé à proximité du lieu de consommation, évitant ainsi les pertes en ligne.
- Il est totalement modulable et la taille des installations peut être facilement ajustée selon les besoins ou les moyens.
- Aucun mouvement, pas de pollution directe ou indirecte (facteurs atmosphériques ou liquides, produits de nettoyage, risque d'accident physique...) aucun déchet, aucune perturbation pour l'environnement de proximité, c'est une énergie purement propre et écologique.
- La maintenance et les réparations sont réduites à presque rien pour la partie photovoltaïque et à peu de chose pour l'électronique associée [16].

I-5-2- Les inconvénients

- le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'existe pas encore.
- Le rendement électrique diminue avec le temps [21].

1-6-La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

En Algérie, la stratégie énergétique repose principalement sur l'accélération du développement de l'énergie solaire photovoltaïque, de sorte que le gouvernement envisage de mettre en place plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 mégawatts d'ici 2020. Au cours de la période 2021-2030, d'autres projets d'une capacité de 200 MW par an devraient être mis en œuvre. La figure 1.9 est un schéma des parts des sources d'énergie renouvelables dans le programme algérien d'énergies renouvelables (2030).

Objectif du programme algérien des Energie Renouvelables

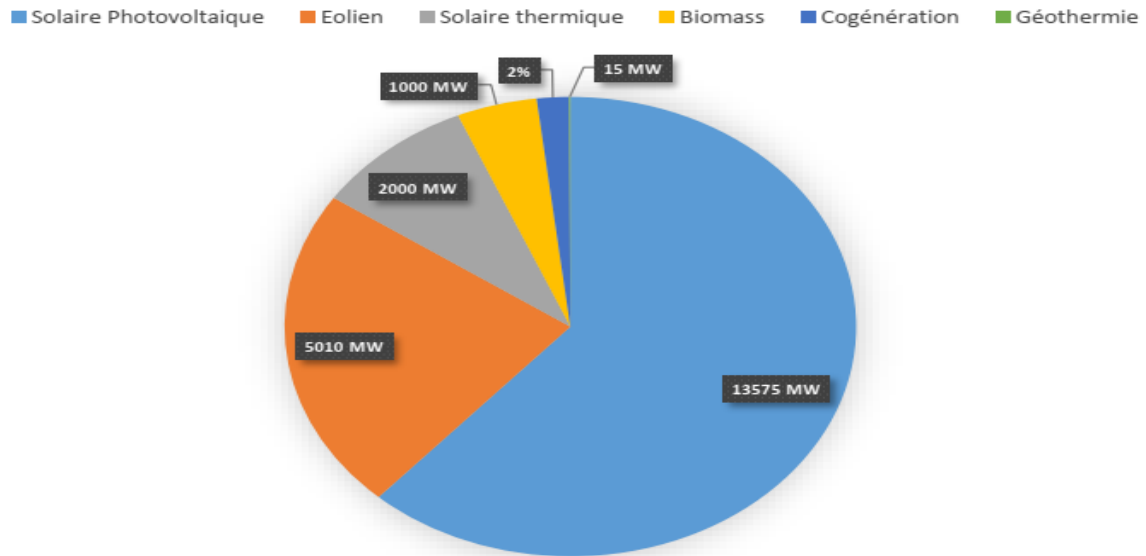


Fig 1.9 Répartition énergétique en Algérie

1-7 Modélisation du système photovoltaïque

1-7-1 Schéma équivalent d'une cellule solaire

Un schéma équivalent à une diode est celui le plus utilisé pour la modélisation de la cellule solaire, il s'agit de modéliser le courant de court-circuit affecté par l'éclairement comme source et l'effet photovoltaïque par une diode, en plus, une résistance en série et une autre en parallèle représentent les pertes du modèle.

La figure 1.10 montre le circuit équivalent du modèle de cellule PV.

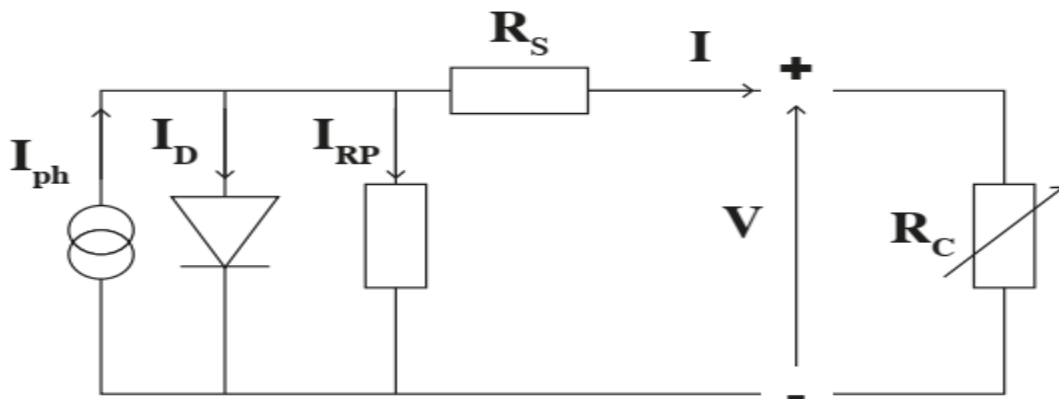


Fig 1.10 Circuit de cellule PV équivalent

L'équation caractéristique d'une cellule solaire est donnée par [22] [23]:

$$I = \left(I_{ph} - I_0 \left(e^{\left((V+I \cdot R_s) \cdot \frac{1}{\alpha \cdot V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V - I \cdot R_s}{R_p} \right) \quad (1.2)$$

Ou :

I_{ph} : est un courant photonique généré par la lumière,

I_0 : Saturation cellulaire du courant d'obscurité,

R_p : Résistance de shunt en Ω ,

R_s : Résistance série en Ω ,

α : Facteur d'idéalité (1.6 pour le silicium).

Le courant photonique (courant dans la cellule) est directement causé par le rayonnement solaire qui vient du soleil. Ce courant dépend du rayonnement et de la température. Par conséquent, sa valeur reste constante quelle que soit la valeur de la tension externe. Elle est donnée par l'équation suivante [18].

$$I_{ph} = \frac{G}{G_n} * \left(I_{phn} + K_i * (T - T_n) \right) \quad (1.3)$$

Ou :

I_{phn} : Courant photonique nominal en STC,

T : Température de la cellule en Kelvin,

T_n : Température nominale en Kelvin au STC, 25 ° C,

K_i : Coefficient de température du courant de court-circuit,

G : Éclairement solaire en 1 kW / m²

G_n : Rayonnement solaire en KW / cm².

Le courant de saturation cellulaire est le courant de saturation inverse de la diode. Il dépend uniquement de la température et peut être calculé à l'aide de:

$$I_0 = \frac{I_{scn} + k_i * (T - T_n)}{e^{\frac{V_{ocn} + K_v * (T - T_n)}{\alpha \cdot V_t}} - 1} \quad (1.4)$$

Où:

I_{scn} : Est le courant de court-circuit nominal au STC,

V_{ocn} : est la tension nominale à vide du STC,

K_v : Coefficient de température de la tension de circuit ouvert à I_{sc} .

La tension thermique est donnée par:

$$V_t = \frac{K \cdot T}{q} \quad (1.5)$$

Où

K : la constante de Boltzmann $1,38 \times 10^{-23} \text{ J / K}$,

q : est la charge de l'électron $1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$

1-7 -2 Module Photovoltaïque

Dans sa forme générale, le module PV se compose d'une connexion en série et en parallèle de cellules solaires, avec des composants supplémentaires des diodes de blocage et de dérivation. Bien que la fabrication et la taille des cellules solaires varient, une seule cellule a généralement une capacité de production de tension relativement faible de l'ordre de 0,6 volt.

Pour augmenter la capacité de traitement de la tension et du courant, la plupart des fabricants produisent des modules solaires; un groupe de cellules solaires connectées en série et en parallèle, et ça pour conditionner les cellules solaires de manière plus pratique,

Alors qu'il existe plusieurs schémas de connexion pour une multitude d'applications, mais le schéma le plus connu et plus utilisé pour les modules photovoltaïques utilisés dans la production d'énergie est la connexion de 72 cellules en série [24].



Fig 1.11 Module photovoltaïque

1-7 -3 Caractéristique de module PV

- **La tension en circuit ouvert**

Si l'on éclaire une cellule solaire par une source lumineuse constante, sans aucune charge à ses bornes, une tension continue mesurée d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert V_{oc} ou à vide (V_{oc} varie légèrement avec la température et l'éclairement) [16].

- **Le courant de court-circuit**

si l'on éclaire une cellule solaire en court-circuit, un Courant maximal sera débité. Ce dernier est appelé le courant de court-circuit I_{cc} .

De plus, comme nous l'avons vu au dit précédent, le courant photonique fourni par la cellule est proportionnel à l'éclairement et à la surface du panneau solaire, donc si, plus l'éclairement et la surface du panneau solaire seront élevés, plus le courant produit sera grande [21].

- **La puissance maximale**

L'intérêt majeur de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que la puissance produite soit la plus élevée possible, elle est influencée à une tension maximale V_m et à un courant maximal I_m .

On mesure la puissance nominale du panneau dans les conditions normalisées d'ensoleillement standard STC (25°C et un éclairement de 1000 W/m²), mesurée en watts (W) [16].

- **Facteur de forme :**

Le facteur de forme est défini comme étant le rapport entre une puissance maximale fournie par la cellule et le produit du courant de court circuit par la tension de circuit ouvert, il

est donnée par :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (1.6)$$

Ce facteur indique la performance du module, plus il s'approche de l'unité plus le module est Performant [25].

- **Rendement de la cellule**

Le rendement est défini comme étant rapport entre la puissance électrique effectivement délivrée par la cellule photovoltaïque et la quantité d'énergie solaire reçue. Le rendement traduit le pourcentage de conversion photons-électrons d'un panneau solaire photovoltaïque; elle est alors définie selon l'équation suivante [25]:

$$n = \frac{P_{max}}{S * G} \quad (1.7)$$

La figure 1.12 et la figure 1.13 représentent les caractéristiques P=f(V) et I=f(V) d'un module photovoltaïque en représentant le point de puissance maximale.

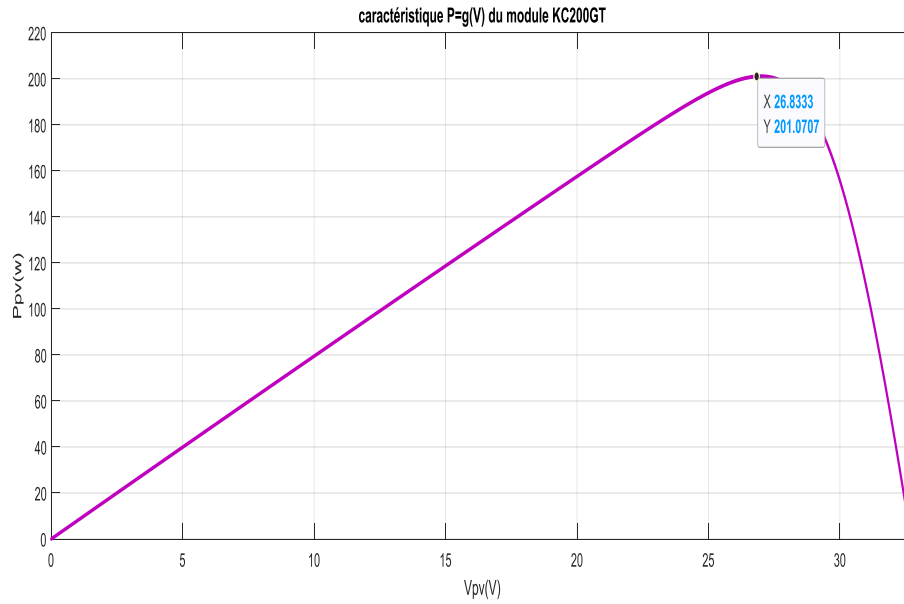


Fig 1.12 Caractéristique de $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque

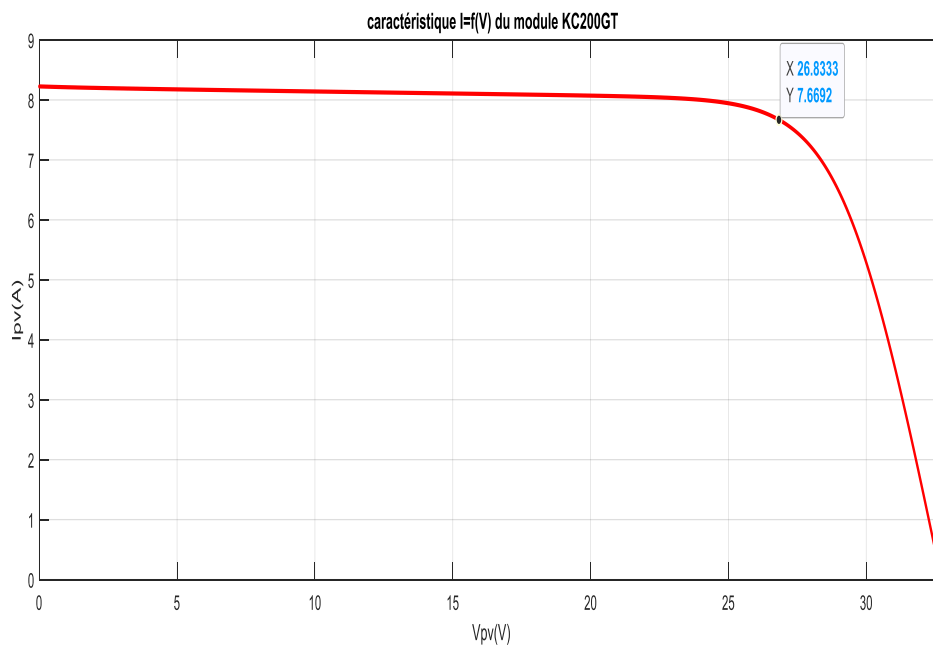


Fig 1.13 Caractéristique de $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque

1-7 -4 Générateur Photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque est une structure composée d'un certain nombre de modules PV, montés en série et en parallèle sur le même plan avec des connexions électriques pour fournir suffisamment de puissance électrique pour une application donnée. La puissance des tableaux varie de quelques centaines de watts à plusieurs centaines de kilowatts. Pour

augmenter la tension, les modules sont connectés en série et pour augmenter le courant, ils sont connectés en parallèle.

La structure d'un tableau est illustrée à la figure 1.14 [26].



Fig 1.14 Structure d'un générateur photovoltaïque

Si on connecte les modules n_s en série, les courbes $I-V$ sont simplement ajoutées le long de l'axe de tension; comme le montre la figure 1.15. C'est-à-dire que la tension totale est simplement la somme des tensions individuelles des modules, le courant dans ce cas là reste le même que pour un seul panneau [27].

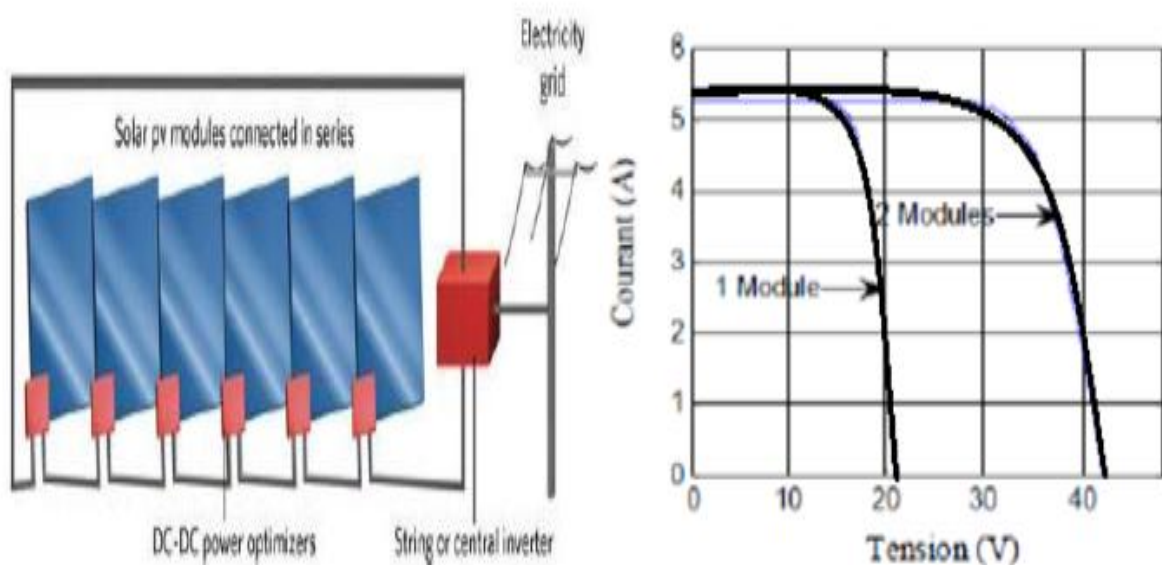


Fig 1.15 Modules photovoltaïques connectés en série

Une association parallèle de np cellules permet d'augmenter le courant de sortie du générateur photovoltaïque.

Dans ce cas de groupement parallèle des modules photovoltaïques, la tension de sortie du générateur est la même que pour un seul panneau et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants comme illustre par la figure 1.16

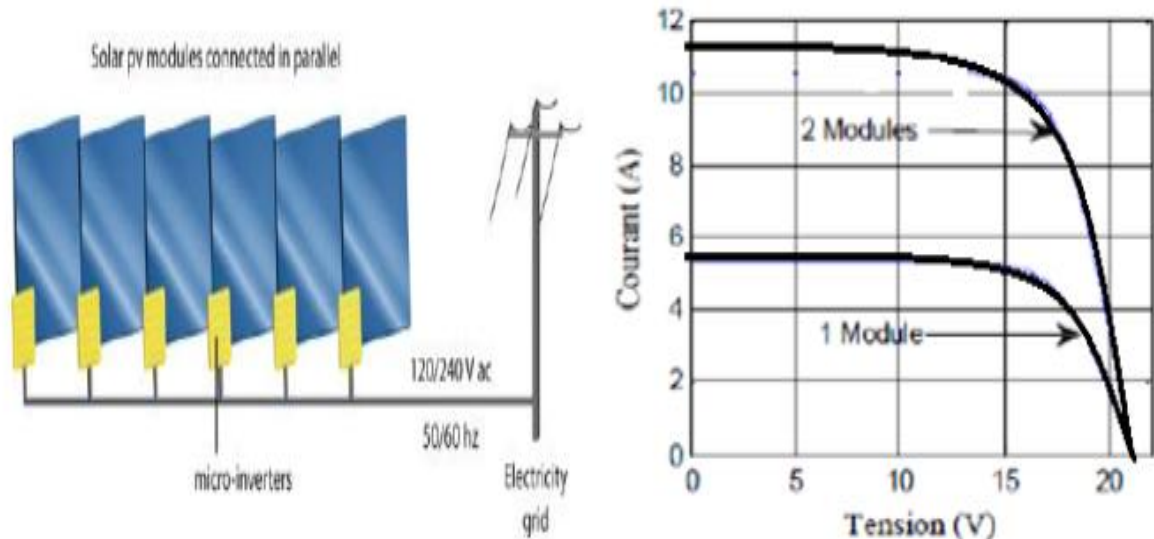


Fig 1.16 Modules photovoltaïques connectés en parallèle

Lorsqu'une puissance élevée est requise, la matrice consiste généralement en une combinaison de modules en série et en parallèle pour lesquels la courbe I –V totale correspond à la somme des courbes I –V de chaque module [18].

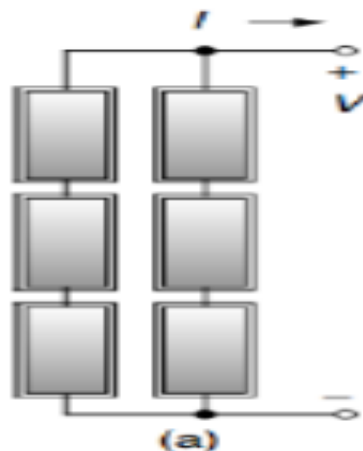


Fig 1.17 Différentes connexions pour le générateur PV série /parallèle

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est exprimé par [27].

$$I = \left(N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_0 * \left(e^{\left(\frac{v}{N_s} + \frac{1}{N_{pp}} * R_s \right) * \frac{1}{\alpha * V_t * N_s}} - 1 \right) - \frac{V \frac{N_{ss} - I * R_s}{N_{pp}}}{R_p} \right) \quad (1.8)$$

Où:

N_{pp} : est le numéro du module connecté en parallèle.

N_{ss} : est le nombre de modules connectés en série.

1-8 Influence de l'éclairement sur le GPV

Une baisse de l'éclairement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant à l'obscurité inchangée. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de L'éclairement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du générateur photovoltaïque vers les puissances inférieures [28].

Les figures précédant montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension. A une température constante Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairement. Ceci implique que La puissance optimale du GPV (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement [28].

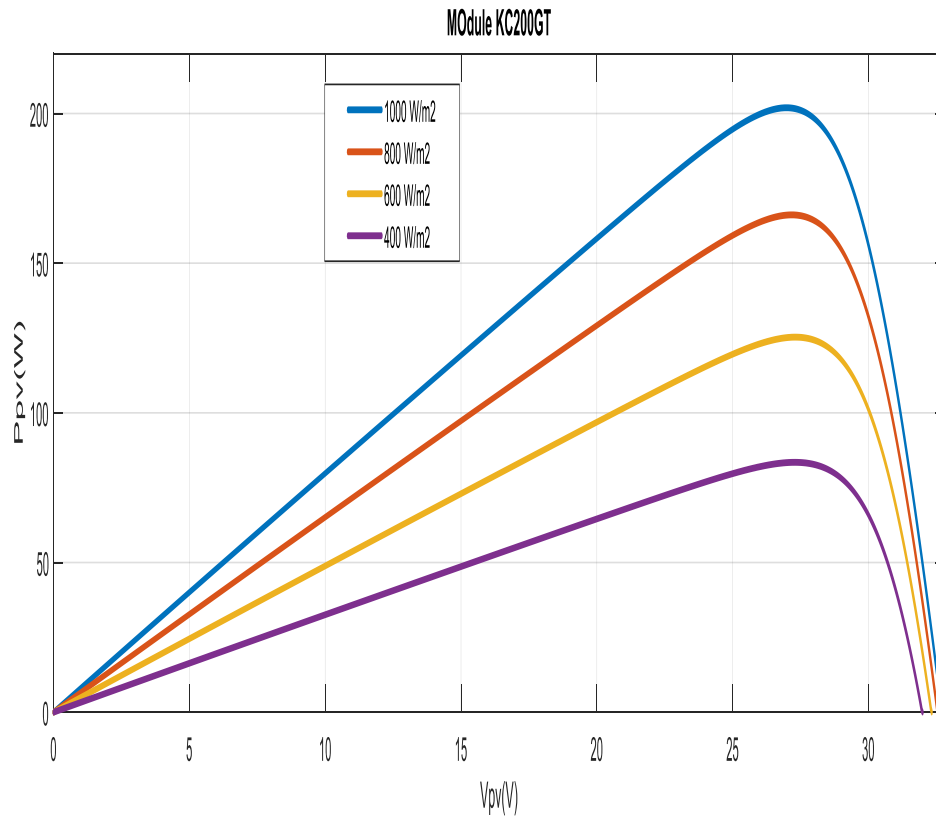


Fig 1.18 Caractéristique $P=f(V)$ d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable.

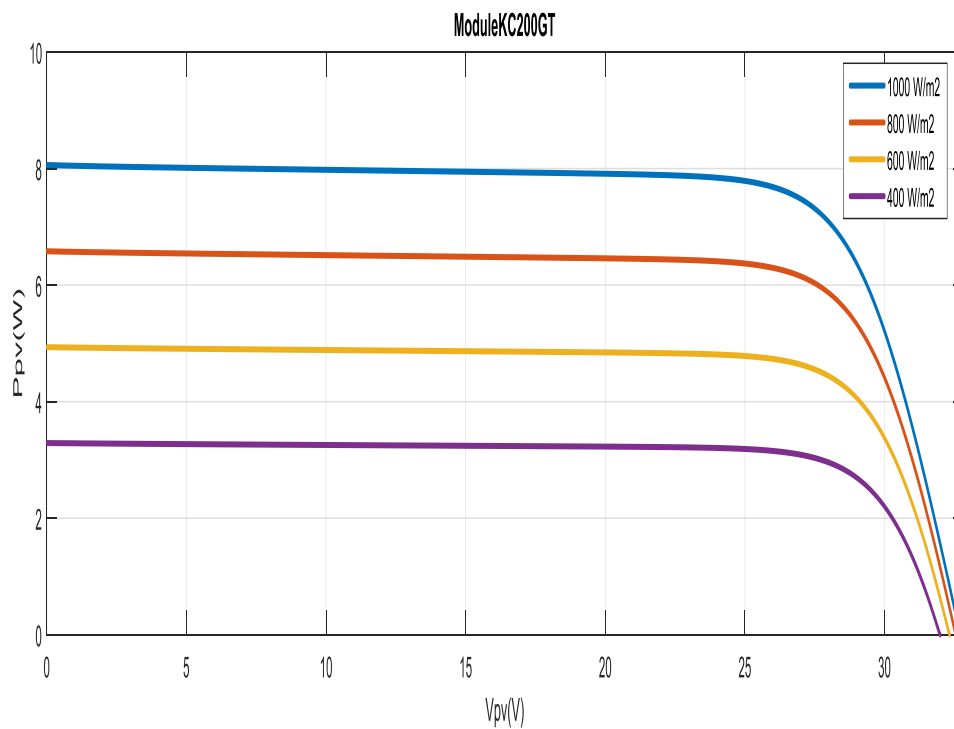


Fig 1.19 Caractéristique $I=f(V)$ d'un GPV pour une température constante de 25°C et un l'éclairement variable

1-9 modélisation d'un GPV soumis à un ombrage

1-9 -1 Description de l'ombrage

L'ombrage influe directement sur le rendement des modules PV puisque ils sont très sensibles à l'éclairement; Les modules Photovoltaïques ne peuvent être occultés,

On distingue 2 types D'ombrage : l'ombrage total et l'ombrage partiel [17].

• L'ombrage complet

Empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une Partie de cellule photovoltaïque (Exemples : une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une couverture).

• L'ombrage partiel

Empêche seulement le rayonnement direct d'atteindre une partie de la cellule photovoltaïque (Exemples : une cheminée, un arbre, un nuage).

1-9-2 Effet d'ombrage partiel

L'ombrage affect principalement la puissance générée par le GPV avec déformation des caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$.

Différents type d'ombrage auxquels peuvent être soumis un GPV sont représentés sur la figure 1.20

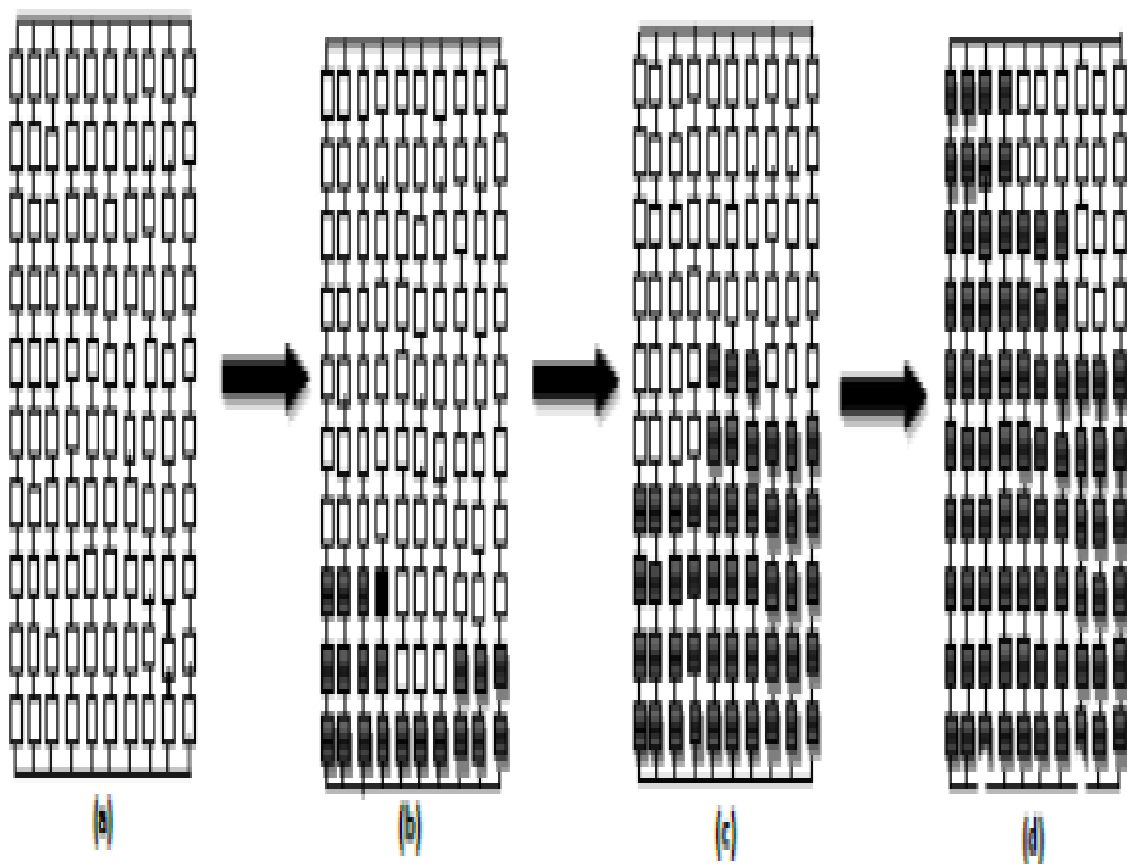


Fig 1.20 Différentes configurations avec:

(a) irradiation uniforme, (b) ombrage léger, (c) ombrage moyen, (d) ombrage sévère

Lorsque l'on mesure la tension de sortie d'une cellule photovoltaïque, on constate qu'elle est très faible. Donc, pour augmenter la tension de sortie, il faut connecter les cellules photovoltaïques en série. Et en cas d'ombrage, si une partie des cellules est ombrée, la tension générée par les cellules ombrées sera inférieure à celle des cellules non ombrées, qui consommeront une partie de l'énergie générée par les cellules non ombrées [27].

La figure 1.21 et la figure 1.22 représente l'allure des caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ d'un GPV soumis à un ombrage partiel. On peut voir par conséquent d'un tel ombrage l'apparition de plusieurs extremums sur la courbe.

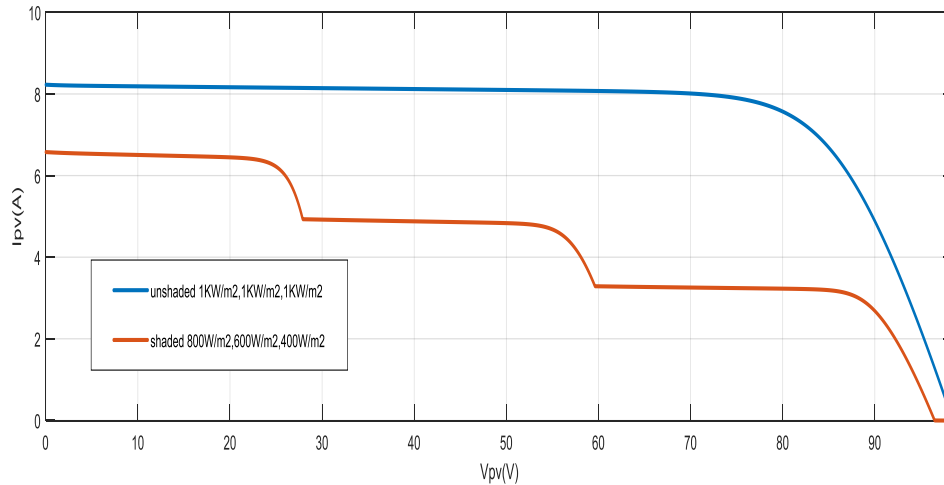


Fig 1.21 la caractéristique $I=f(V)$ on ombrage partiel

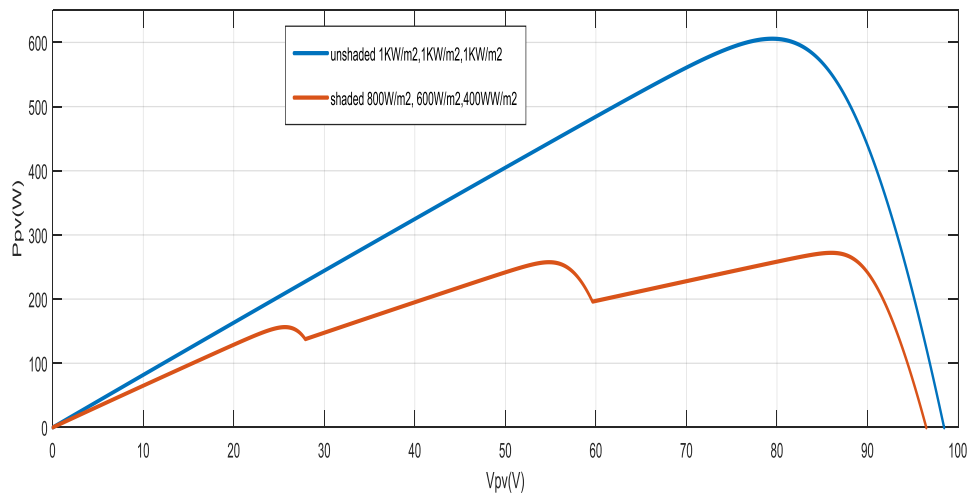


Fig 1.22 la caractéristique $P=f(V)$ on ombrage partiel

1-9 -3- Protection du PV

Généralement, lorsqu'on conçoit une installation photovoltaïque, nous devons assurer la Protection électrique de l'installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant Notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et leur fonctionnement en cas d'ombrage. Pour cela, deux types de protections sont classiquement Utilisés dans les installations actuelles []:

- la protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (**diode by-pass**) et éviter les points chauds [17].

- la protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les Courants négatifs dans les GPV (**diode anti-retour**)

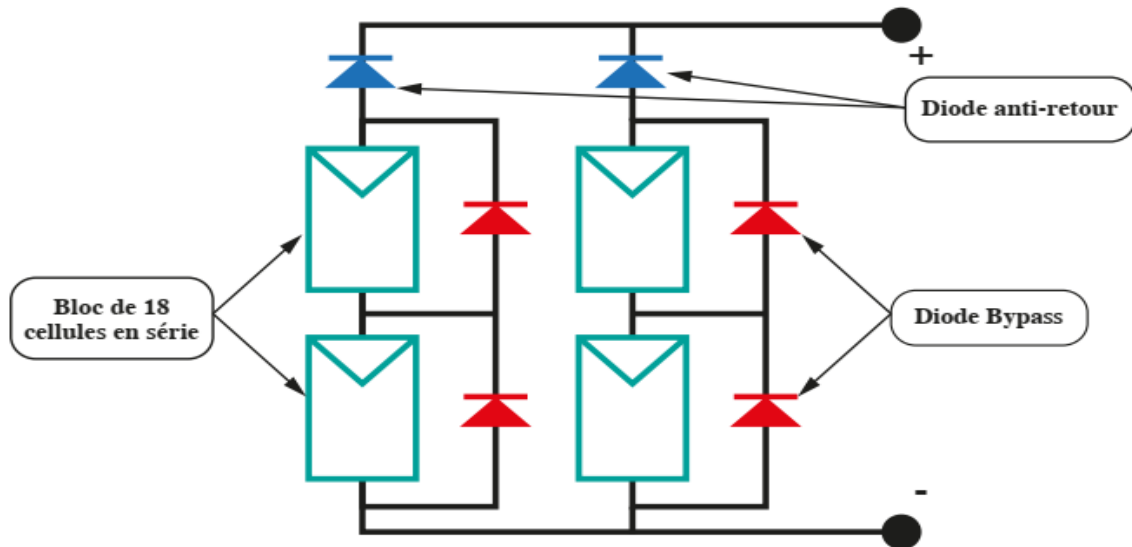


Fig 1.23 Diodes de protection des modules

1-10 Convertisseur DC/DC (Hacheur)

Les hacheurs sont les convertisseurs statiques -continu- continu qui font transiter L'énergie électrique d'une source continue vers une autre source continue (fournir une tension continue à la sortie à partir d'une tension continue de l'entrée). La figure suivant montre les schéma synoptique du hacheur [17].

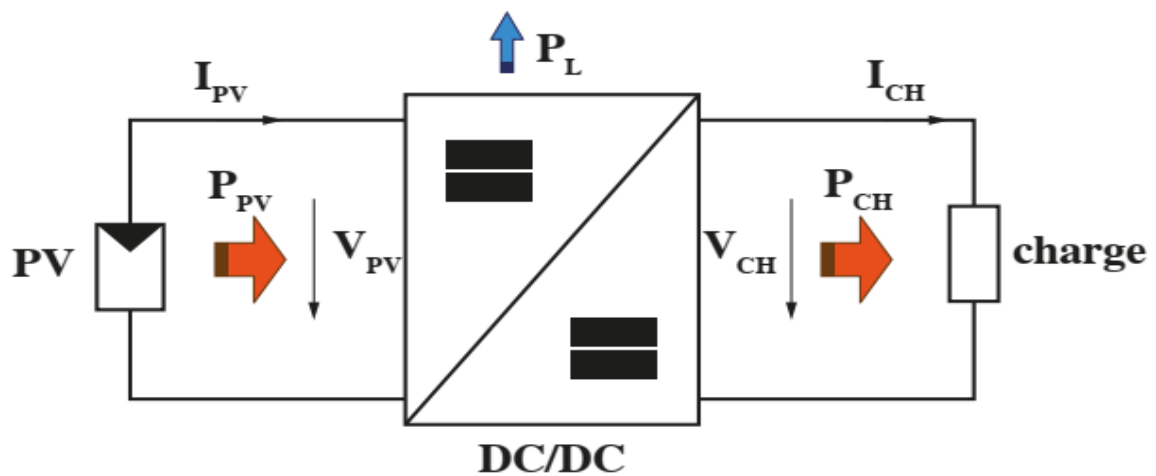


Fig 1.24 Convertisseur DC/DC

Le rapport cyclique α

Le rapport cyclique est défini comme le temps pendant lequel l'interrupteur est Fermé divisé par la période T de commutation de l'interrupteur du hacheur. Il varie entre 0 et 1. Il s'exprime comme suit [17]:

$$\alpha = \frac{\tau}{T_s} \quad , \quad \tau = \alpha * T_s \quad (1.9)$$

α : le rapport cyclique

τ : temps à l'état fermé

T : Période

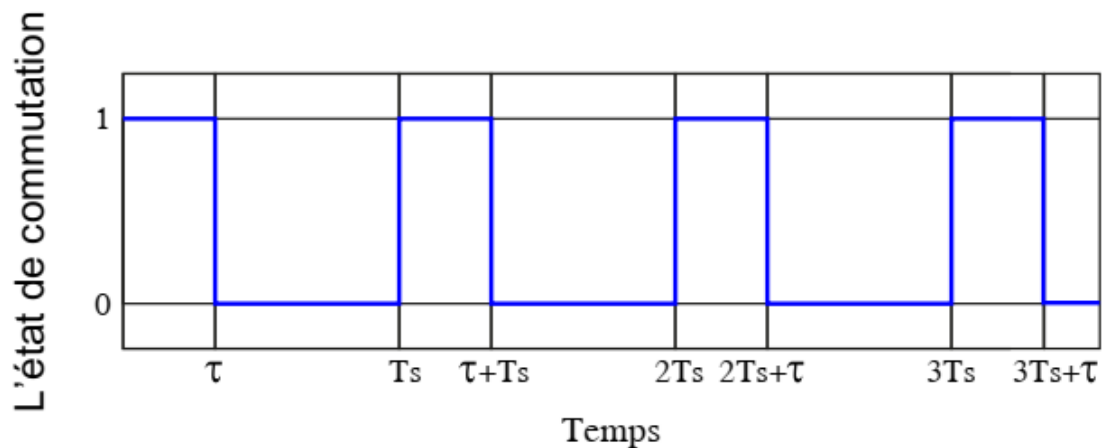


Fig 1.25 La forme de variation en fonction du rapport cyclique

L'état de commutation: 0 pour l'interrupteur ouvert et 1 pour l'interrupteur fermé.

1-10 -1-Convertisseur Buck

Le convertisseur Buck est l'un des circuits électroniques de puissance les plus simples et consiste essentiellement en une inductance, un commutateur électronique de puissance (généralement un MOSFET ou un IGBT) et une diode. Il peut avoir un condensateur pour lisser la sortie. Sa fonction est d'abaisser la tension continue et est illustré à la figure 1.26 [28].

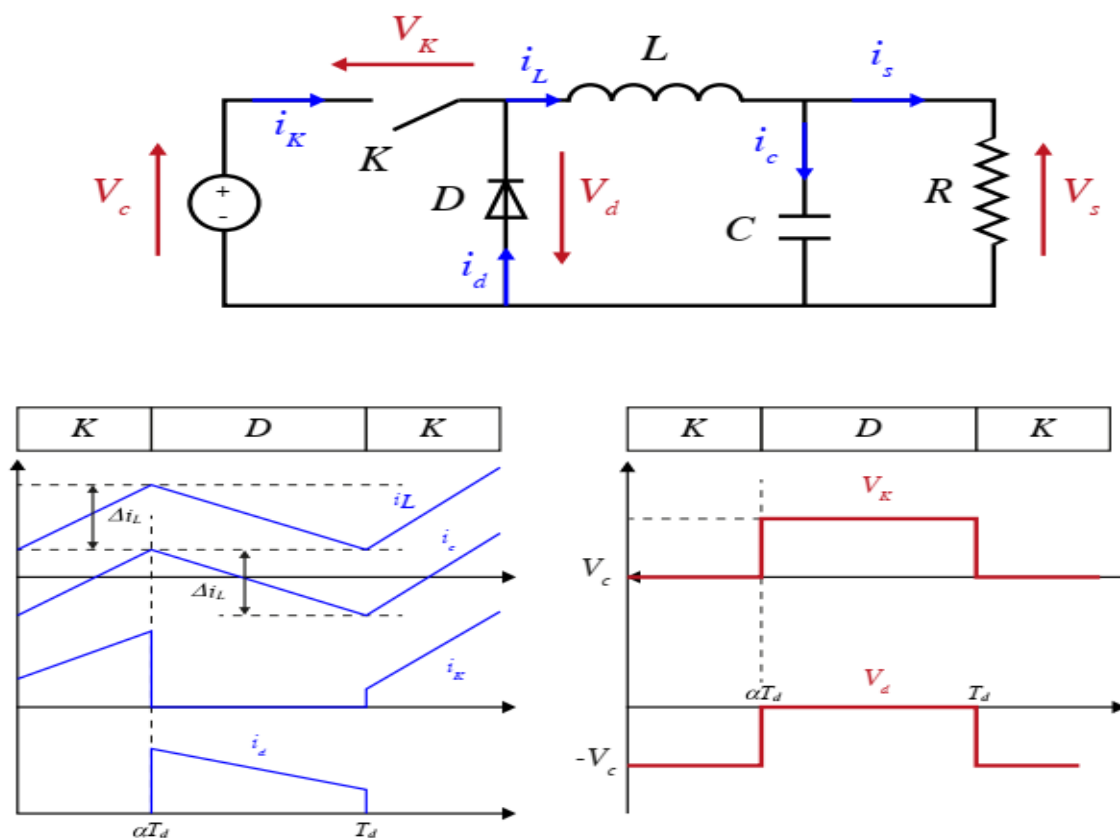


Fig 1.26 Circuit fonctionnel d'un convertisseur Buck

Le principe de fonctionnement de ce hacheur est divisé en deux états (état de L'interrupteur) passant et bloqué.

Dans l'état passant, l'interrupteur est fermé, la tension aux bornes de l'inductance présentée dans (1.10).

Le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La tension aux bornes de la diode étant négative, aucun courant ne la traverse [18].

$$V_L = V_e - V_s \tag{1.10}$$

Dans l'état bloqué, l'interrupteur est ouvert. La diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance présentée dans (1.11). Le courant traversant l'inductance décroît [18].

$$V_L = -V_s \tag{1.11}$$

Les variations de tension présentée dans la Figure (II-17).

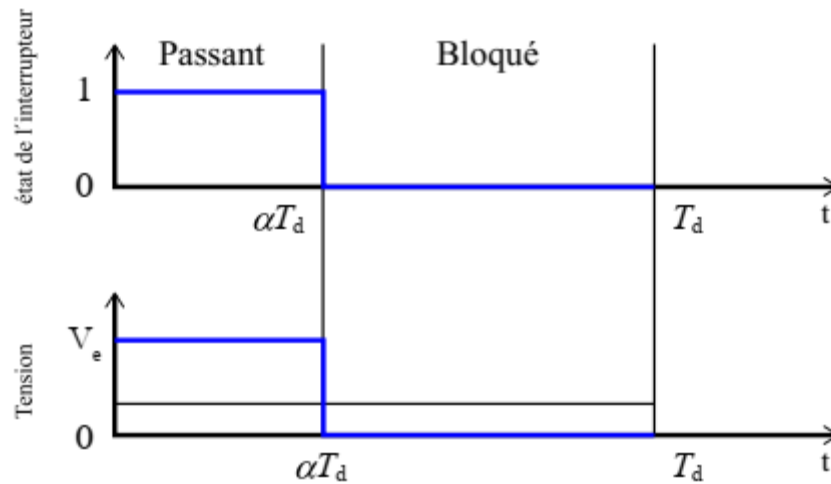


Fig 1.27 formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Buck

A partir la figure précédente : $V_s = V_e$ dans l'état passant, et $V_s = 0$ dans l'état bloqué

$$V_s = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T_d} V_e dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T_d}^{T_d} 0 dt = \frac{1}{T} V_e (\alpha T_d) , \quad V_s = \alpha v_e \quad (1.12)$$

1-10-2-Convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est un autre convertisseur électronique de puissance simple et consiste essentiellement en une source de tension, une inductance, un commutateur électronique de puissance (généralement un MOS-FET ou un IGBT) et une diode. Il a généralement aussi un condensateur à filtre pour lisser la sortie.

Sa fonction est d'augmenter la tension continue pour l'amener au niveau souhaité, comme le montre la figure 1.28 [21]. D est ouvert ; et quand K est ouvert, D est fermé. Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT et ouvert de αT à T . On distingue deux modes de fonctionnement selon que le courant dans l'inductance s'annule (conduction discontinue) ou pas (conduction continue).

On s'intéresse au second cas qui est le plus important. La figure 1.28 donne le schéma de principe de ce convertisseur, les intervalles de conduction de l'interrupteur et de la diode ainsi que les formes d'ondes de ses courants (à gauche) et tensions (à droite) [16].

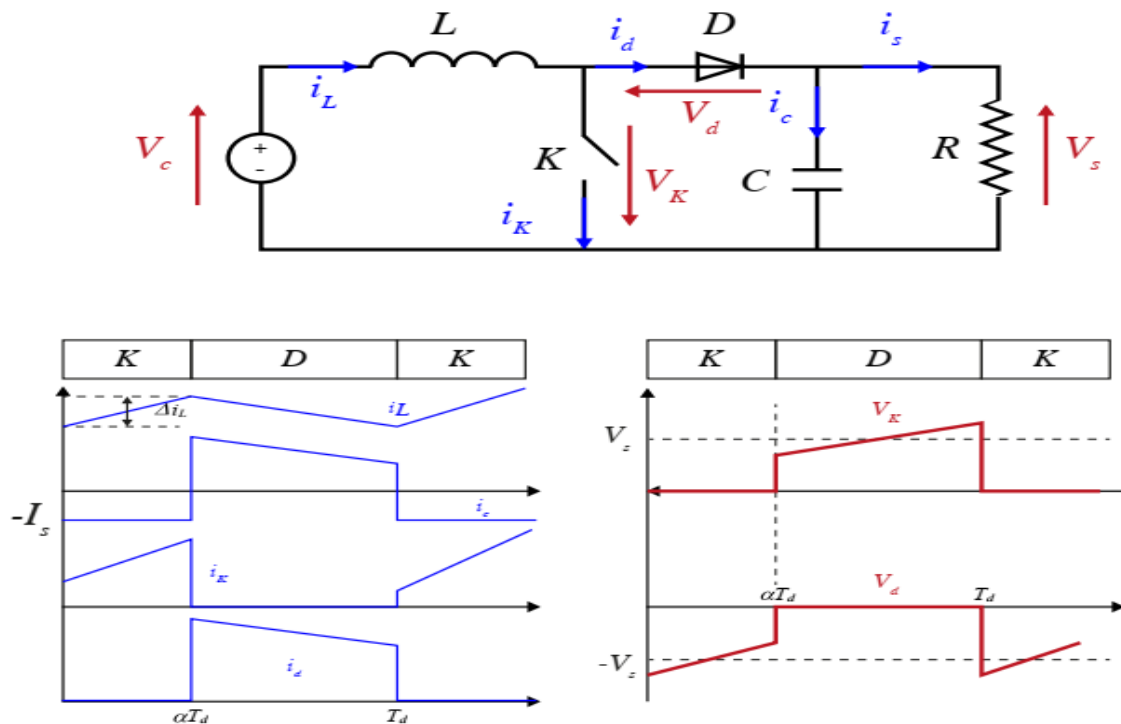


Fig 1.28 Circuit fonctionnel d'un convertisseur Boost

Le modèle mathématique équivalent d'un convertisseur Boost : Lorsque l'interrupteur K est fermé ($0 < t < \alpha T_d$), et l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$), le circuit du convertisseur devient figure (1.29) [16].

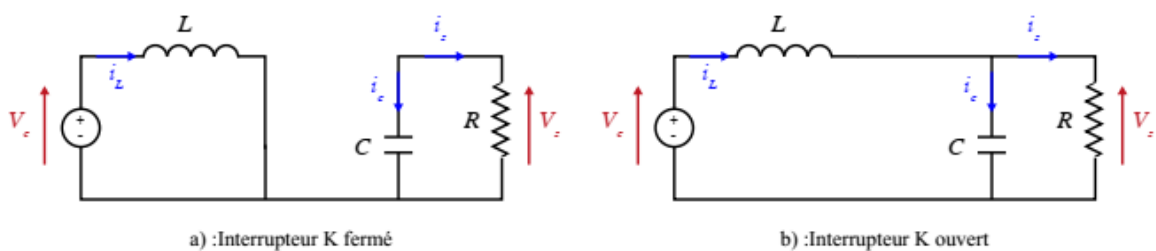


Fig 1.29 Circuit équivalent du Boost quand l'interrupteur

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e \tag{1.13}$$

$$i_L = I_{min} + \frac{V_e}{L} t \tag{1.14}$$

Avec I_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance.

A l'instant, $t = \alpha T$ le courant dans l'inductance atteint sa valeur maximale I_{max}

$$I_{max} = I_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T_d \quad (1.15)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert ($\alpha T_d < t < T_d$), le circuit du convertisseur sera comme montré dans la figure (II-19) (b)

$$L \frac{di_t}{dt} = V_e - V_s \quad (1.16)$$

$$i_L = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T_d) \quad (1.17)$$

A l'instant $t = T_d$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale I_{min}

$$I_{min} = I_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T_d \quad (1.18)$$

Soit $\Delta I = I_{max} - I_{min}$ l'ondulation du courant dans l'inductance.

En faisant l'égalité des valeurs de l'ondulation du courant tirées des équations (1.15) et (1.18), on peut déduire la valeur moyenne de la tension de sortie V_s [16]:

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (1.19)$$

On remarque qu'on peut contrôler la tension de sortie du convertisseur en faisant varier sa tension d'entrée ou son rapport cyclique. Celui-ci étant toujours compris entre 0 et 1, alors le montage fonctionne en élévateur de tension [12].

1-11 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre présenté la généralité sur l'énergie solaire. D'abord nous avons parlé du rayonnement solaire et leurs types ; ensuite nous avons présenté l'énergie photovoltaïque avec leurs caractéristiques, on a donné un aperçu sur la future de l'énergie photovoltaïque dans Algérie.

Nous avons aussi dans ce chapitre présenté la modélisation des les cellules PV et modèle PV et générateur PV. Ensuite, nous avons étudié l'influence des différents paramètres exogènes tel que la température et l'éclairement sur ces modèles. Nous avons modélisé aussi le convertisseur DC-DC associé au système photovoltaïque. Dans le chapitre suivant une description des approches classiques de commande MPPT des systèmes PV sera détaillée.

2-1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'on pouvait faire assurer toujours le transfert d'énergie à l'aide d'un étage d'adaptation inséré entre la charge et le GPV. Dans la plupart des cas, cet étage d'adaptation est doté d'une commande MPPT jouant sur la valeur du rapport cyclique pour maximiser la puissance produite par le générateur photovoltaïque. Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mpp}, I_{mpp}).

Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximale » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglais (MPPT). Donc la MPPT est une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. Dans ce chapitre, nous exposons le principe de la recherche du PPM et présentons les différentes techniques MPPT classique.

2-2 Principe de la recherche du point de puissance maximale

Le principe de la commande MPPT consiste à effectuer une recherche du point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La chaîne de conversion photovoltaïque, associée à une commande MPPT, est représentée sur la figure 2.1. On choisie une charge DC Pour faire fonctionner cette commande, La commande MPPT est obligatoirement associée à un hacheur pour de la conversion solaire de telle sorte que la puissance maximale (P_{MAX}) est celle qui est fournie par le GPV [01].

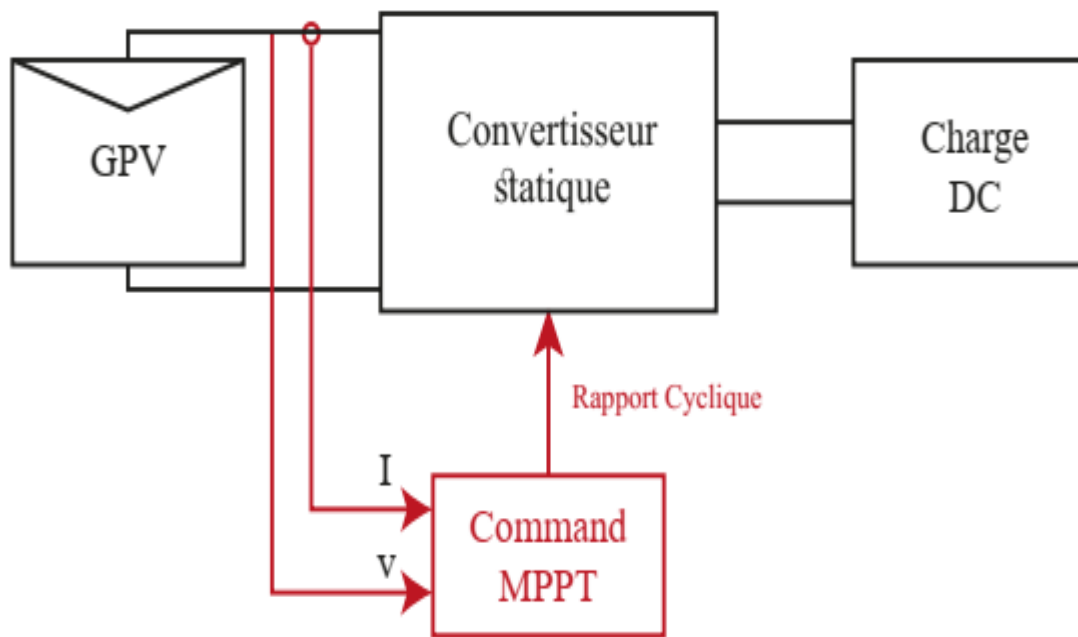


Fig 2.1 Chaîne de conversion photovoltaïque.

On agissant sur le rapport cyclique, on peut contrôler le système PV, de manière à amener le générateur à sa valeur maximale de la puissance qu'elles que soient les variations des charges ou les conditions météorologiques [54].

Comme le montre la figure 2.2, on voit que pour les 3 cas de variation de l'insolation (situation : a), de la charge (situation : b) et de la température (situation : c), il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2. Donc, il faut agir sur le rapport cyclique du hacheur pour poursuivre et atteindre le MPP dans n'importe quel cas de fonctionnement du générateur PV.

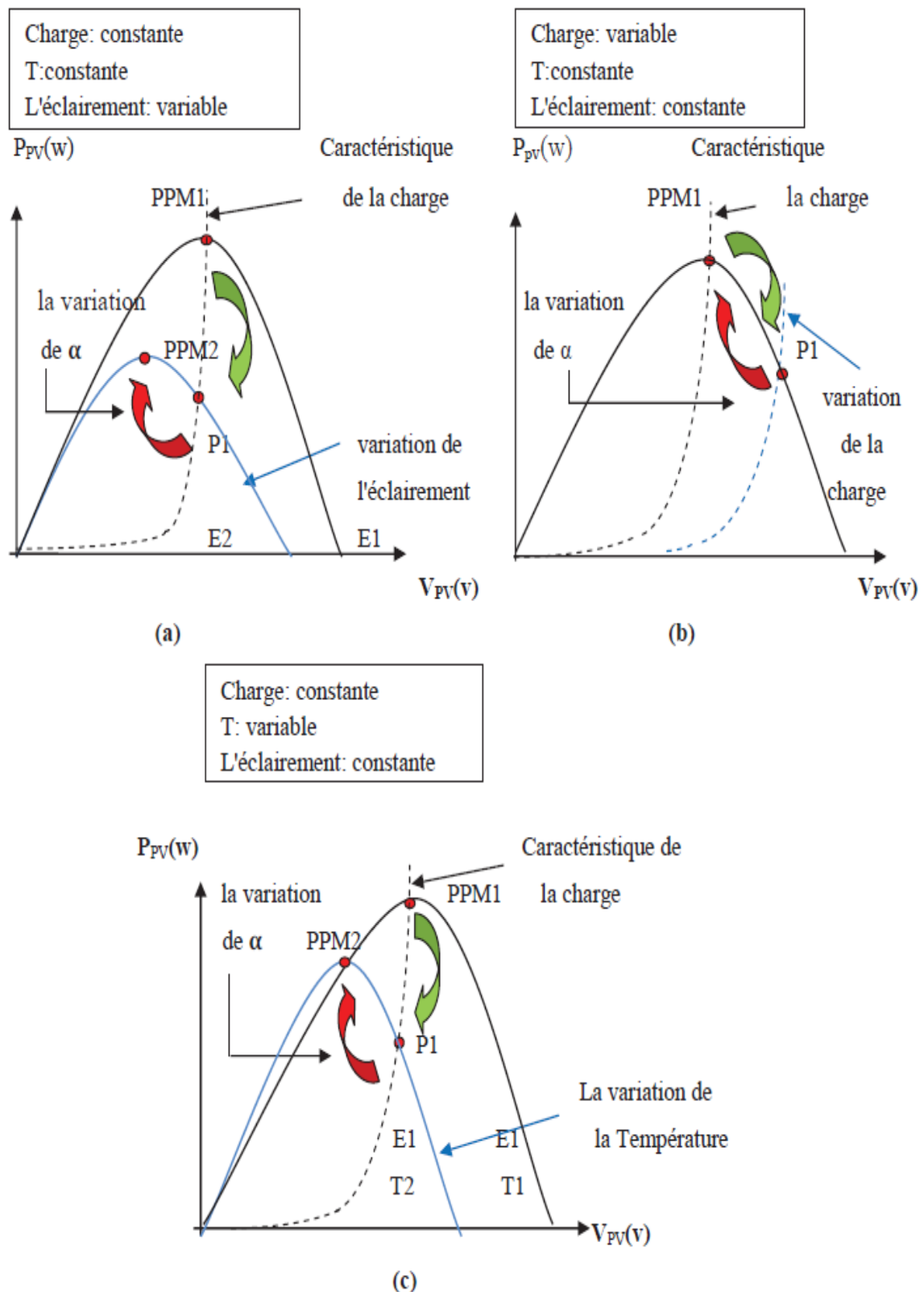


Fig 2.2 Recherche de recouvrement du point de puissance maximale [01],[30] a) suite à une variation d'ensoleillement. b) suite à une variation de charge. c) suite à une variation de température.

2-3 Les commandes MPPT classique

il existe Actuellement plusieurs types de commandes classiques effectuant la recherche du point de puissance maximale. Parmi les algorithmes les plus utilisés on peut cite [31] [32], [33].

- algorithmes Perturber et Observer (P & O) ;
- algorithmes de la conductance incrémentale (INC) ;
- algorithmes Tension constante (CV : constant Voltage) ;
- algorithmes courant constante (CC : Constant Curent) ;
- Méthode de logique floue.

2-3-1 Méthode de perturbe et d'observe (P&O)

En raison de sa simplicité et de sa facilité réalisation, la méthode P & O est l'une des méthodes MPPT les plus largement utilisées .son principe repose sur la création d'une perturbation de la tension continue du générateur PV et ensuite, observe les variations sur la puissance de sortie de générateur PV.

Si la puissance augmente avec la perturbation incrémentielle, elle continue à faire la perturbation dans le même sens, sinon elle est inversée. En cas d'augmentation de puissance avec perturbation incrémentale, le point de fonctionnement serait sur côté gauche du point de puissance maximale, Si une perturbation incrémentielle entraîne une diminution de la puissance, cela indique que le MPP a traversé et que le point de fonctionnement se trouve quelque part sur le côté droit du MPP.

Dans ce cas, il inverse sa perturbation et commence à produire une perturbation préjudiciable de la tension du générateur PV afin de suivre le point de puissance maximale. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement serait au point de puissance maximale, comme indiqué dans la figure (2.3) [34]. [05], [36].

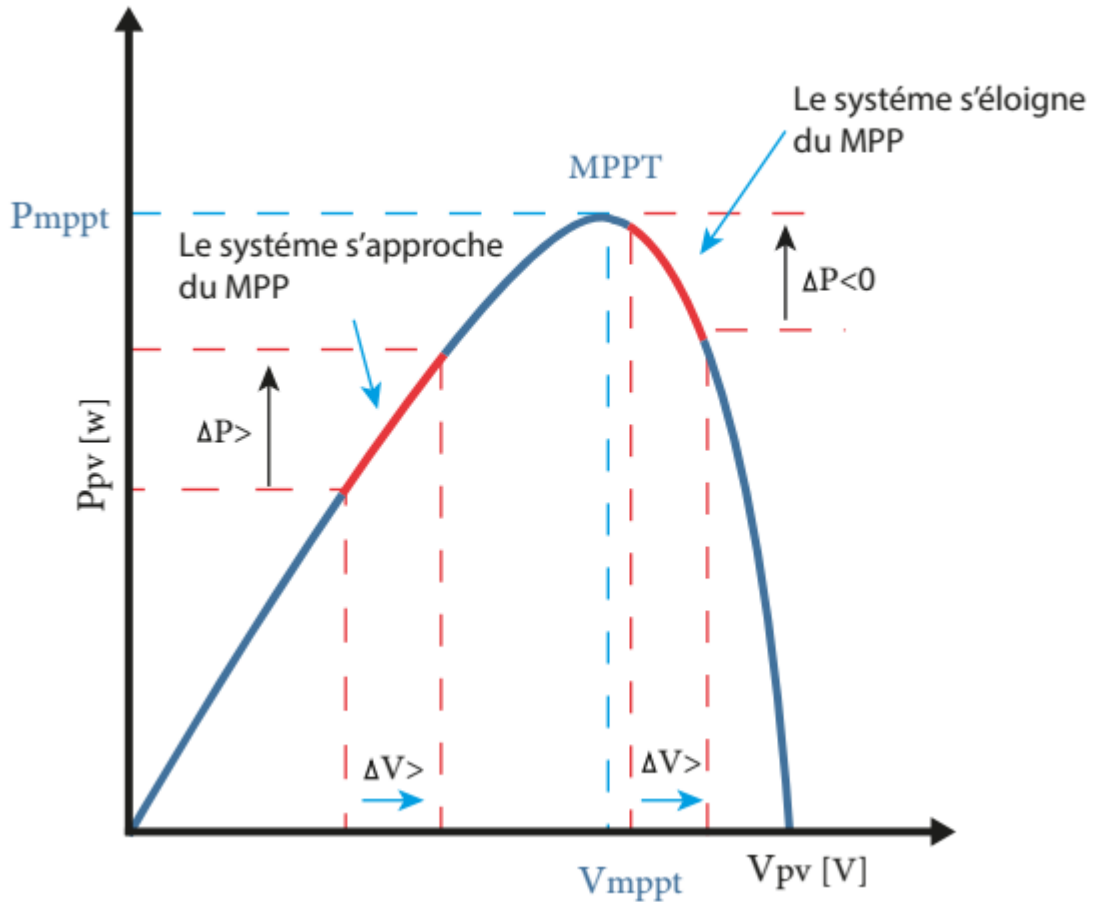


Fig 2.3 caractéristique de puissance dans la P&O

Cas	dP	dP	Action
1	$P(k) > P(k-1)$	$V(k) > V(k-1)$	++
2	$P(k) > P(k-1)$	$V(k) < V(k-1)$	--
3	$P(k) < P(k-1)$	$V(k) > V(k-1)$	--
4	$P(k) < P(k-1)$	$V(k) < V(k-1)$	++

Tableau 2.1 résumé du fonctionnement de l'algorithme P&O

Le changement d'un point « k » à un point suivant « k+1 » se fait avec un pas Constante (méthode déterministe).

La figure (2.4) représente l'organigramme de l'algorithme de la méthode P&O :

2-3-2 Méthode d'Incrémentale Conductance

La méthode de la conductance incrémentielle est basée sur le fait que la somme de la conductance instantanée (dI / dV) et de la conductance incrémentielle est nulle en MPP. Parce que c'est négatif du côté droit du député et positif du côté gauche du député. Cette relation découle du fait que la pente de la courbe de puissance du générateur photovoltaïque est nulle au MPP, positive à gauche du MPP et négative à la droite. La figure (2.5) montre la pente de la courbe de puissance du réseau P-V. Ainsi, la conductance incrémentielle peut déterminer que le MPPT a atteint le MPP et cesser de perturber le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Si cette condition n'est pas remplie, la relation dans laquelle le point de fonctionnement MPPT doit être perturbé peut être calculée [39], [35].

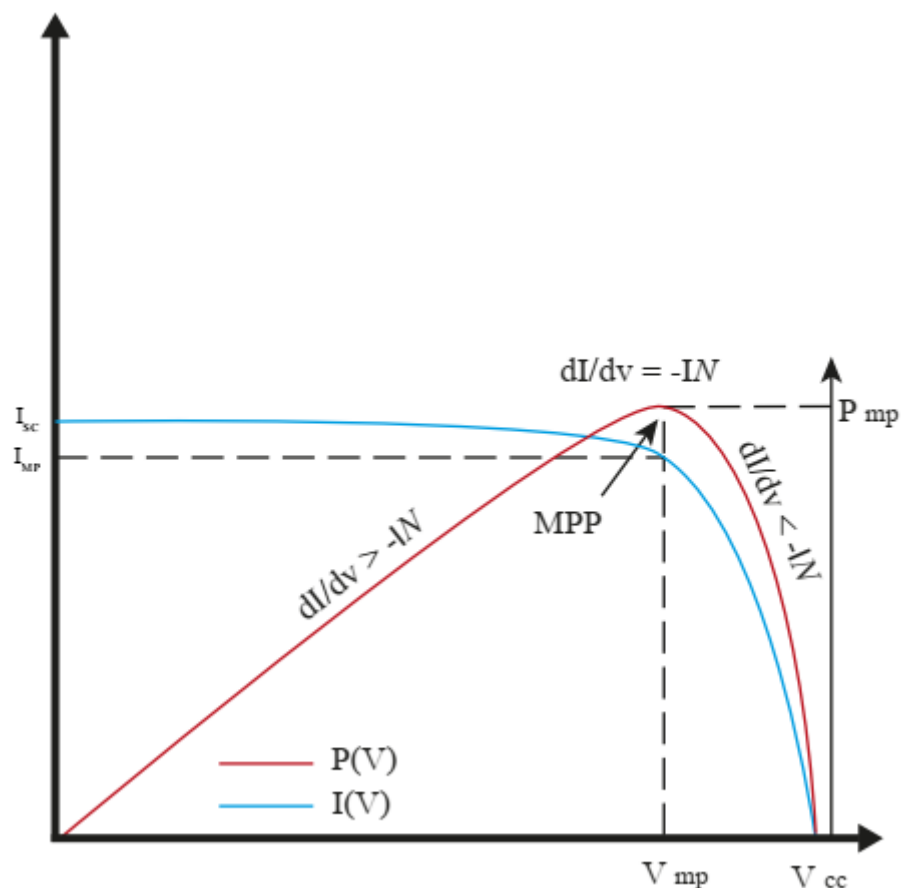


Fig 2.5 Conductance incrémentale (IncCond)

La figure (2.6) illustre l'organigramme de l'algorithme Incrémentale de la conductance.

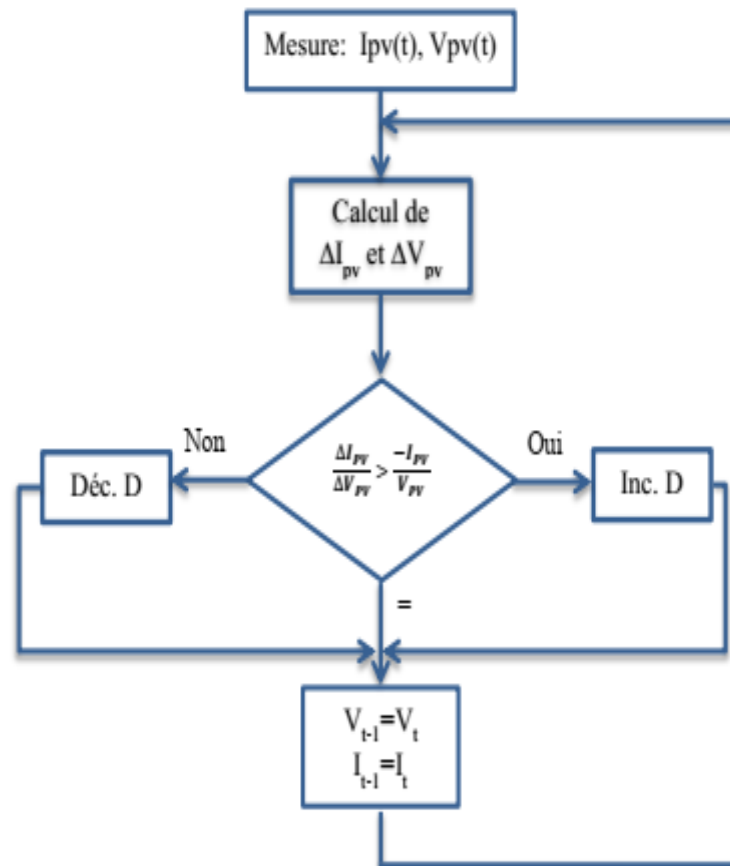


Fig 2.6 Organigramme de l'algorithme Incrément de la conductance [55]

2-3-3 Méthode La Tension de circuit ouvert fractionnaire (Voc)

La relation entre le V_{mpp} et les V_{oc} du générateur photovoltaïque, à des températures variables, a donné naissance à la méthode des V_{oc} fractionnaires. On observe :

$$V_{mpp} = K_1 * V_{oc} \quad (2.1)$$

Que où K_1 est une constante qui dépend des caractéristiques du panneau photovoltaïque. Cette technique de contrôle nécessite la mesure du V_{oc} et du V_{mpp} à différents niveaux d'irradiance et de température pour la détermination de la constante. Généralement, cette valeur est comprise entre 0,71 et 0,78. Avec la valeur déterminée de la constante, la tension au point de puissance maximale est facilement déterminée à partir de l'équation (2.1).

En exposant des cellules pilotes aux mêmes conditions environnementales des panneaux, on résout les problèmes liés à la déconnexion aux bornes de la sortie de générateur PV afin de prendre des mesures de V_{oc} [40].

2-3-4 Méthode La court-circuit fractionné Courant de circuit (I_{sc})

L' I_{sc} fractionnaire résulte du fait que, dans différentes conditions d'insolation, I_{mpp} est approximativement linéairement corrélé à l' I_{sc} du générateur photovoltaïque et est donné par :

$$I_{mpp} = K_2 * I_{sc} \quad (2.2)$$

Où K_2 est une constante de proportionnalité et I_{mpp} est le courant du panneau au niveau de MPP. Tout comme la technique des V_{oc} fractionnaires, K_2 doit être déterminé en fonction du générateur PV utilisé. La constante K_2 s'avère généralement comprise entre 0,78 et 0,92. Un commutateur supplémentaire est généralement ajouté à la PCU pour mettre périodiquement le champ PV pour mesurer I_{sc} [41].

2-3-5 Méthode logique floue

Dernièrement, l'utilisation de la technique de la logique floue est devenue populaire, car elle possède plusieurs avantages tel que le traitement entrées imprécises, pas de nécessité de modèle mathématique précis et pouvoir gérer la non-linéarité. En plus, les microcontrôleurs ont également contribué à la généralisation de la technologie de commande logique floue [01].

Trois étapes de la logique floue:

- la fuzzification,
- Le système d'inférence
- la défuzzification.

La fuzzification comprend le processus de transformation d'entrées numériques précises en variables linguistiques basées sur le degré d'appartenance à certains ensembles. Les fonctions d'appartenance, comme celles de la figure (2-7), permettent d'associer une note à chaque terme linguistique. Le nombre de fonctions d'appartenance utilisées dépend de la précision du contrôleur, mais il varie généralement entre 5 et 7 [42].

Dans la figure (2-7) sept niveaux flous sont utilisés: NB (Négative Big), NM (Négative Medium), NS (Négative Small), ZE (Zéro), PS (Positive Small), PM (Positive Medium) et PB (Positive Big). Il existe des commandes qui ajoutent aux valeurs

précédentes deux autres valeurs qui sont : NM (Négative Means) et PM (Positive Means) [42], [43]..

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance sont choisies moins symétriques, voire optimisées pour l'application pour une meilleure précision [42][44].

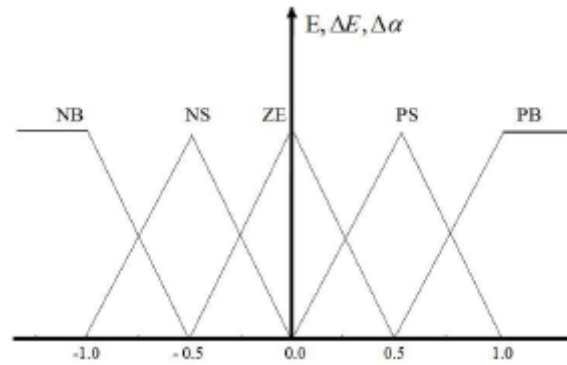


Fig 2.7 Fonctions d'adhésion

En général la présentation de la logique floue est adoptée en trois parties qui sont La fuzzification qui permet de passer de variables réelles à des variables floues, le cœur du régulateur représenté par les règles reliant les entrées et sorties, et enfin l'inférence et la défuzzification qui permettent à partir des ensembles flous d'entrée de déterminer la valeur Réelle de sortie .

La figure suivante représente le schéma synoptique de base de l'algorithme flou.

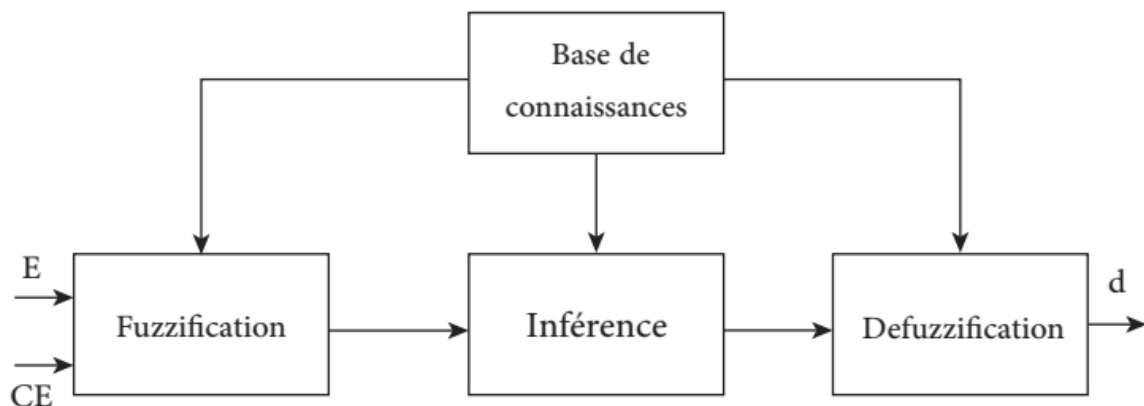


Fig 2.8 Schéma bloc de l'algorithme à base de la logique floue

2-3-5-1 La fuzzification

La fuzzification permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues [44].

Généralement on utilise à deux variables d'entrées qui sont l'erreur $E(k)$ et la variation d'erreur $CE(k)$ à l'instant k qui sont définis comme suit :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (2.3)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (2.4)$$

2-3-5-2 L'inférence

La stratégie de réglage dépend des inférences adoptées. Elles lient les variables d'entrée à une variable de sortie. Cette étape consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie (α).

Les règles d'inférence utilisées dans le cas de la logique floue sont illustrées dans le Tableau 2-2

CE E	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

Tableau 2.2 Tableau de réglage flou

2-3-5-3 La défuzzification

La défuzzification est la réalisation de l'opération inverse de la fuzzification, c'est de calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue et c'est le but de la défuzzification.

2-4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques techniques MPPT classiques les plus utilisées et qui ont été citées dans la littérature. On a sélectionné cinq types de méthodes MPPT qui sont : algorithmes de Perturbation et observation, algorithme de la conductance incrémentale, algorithme de Tension constante, algorithme de courant constant et Méthode de la logique floue.

Malgré, plusieurs d'entre eux s'avèrent défectueux en cas d'ombrage partiel à cause de la présence des nuages, des grands bâtiments et des ombres des arbres etc. D'autres méthodes sont plus performantes en cas d'ombrage. Dans le chapitre suivant, nous allons exposer les algorithmes méta-heuristiques MPPT les plus populaires cas d'ombrage partiel.

3-1 Introduction

Le contrôleur de poursuite de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking(MPPT)) est conçu pour parer aux contraintes engendrées par différents changements climatiques. Les performances de ce contrôleur dépendent de la rapidité d'atteindre le point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPP)), de la façon d'osciller autour de ce point et de la robustesse de ce contrôleur face aux changements atmosphériques brutaux tels que l'ombrage partiel (OP).

Dernièrement, la technique MPPT est devenue le centre d'intérêt d'un nombre important de recherches afin d'améliorer les performances dynamiques du système PV, principalement en termes d'aptitude à poursuivre rapidement le point de puissance global (GMPP) en présence d'autres maximums locaux durant l'OP.

Des chercheurs se sont intéressés à un type de technique MPPT qui est basée sur l'approche méta-heuristique. Parmi ces chercheurs, on cite : Khaldoun et al. (2016) ont appliqué l'algorithme golden section optimization pour suivre le MPP dans des conditions de changements atmosphériques rapides et durant l'OP. Sakthigokulrajan et al. (2017) ont créé une technique de la PSO modifiée (MPSO). Les auteurs attestent que le principal avantage MPSO est la réduction d'oscillation à l'état stationnaire une fois que le MPP est atteint. Benyoucef et al. (2016) ont mis au point l'algorithme axé sur la colonie d'abeilles artificielles(Artificial Bees Colony (ABC)) qui avait été validée expérimentalement en termes de robustesse et d'efficacité.

Dans ce chapitre, nous allons exposer les principes des algorithmes méta-heuristiques les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques dans le cas d'ombrage tel que l'Algorithme d'Optimisation d'essaim de particules (PSO), l'Algorithme d'Optimisation des Loups Gris (GWO) et le nouveau algorithme d'optimisation des hyènes tachetées (SHO)

3-2 Techniques d'optimisations méta-heuristiques

3-2-1 Optimisation d'essaim de particules (PSO)

En 1995, James Kennedy et Russell Eberhart ont développé l'algorithme d'optimisation d'essaim de particules (Particle Swarm Optimization (PSO)). Cet algorithme

est une technique d'optimisation stochastique inspirée du comportement des animaux tels que les oiseaux [45], [46]. La PSO est une méthode méta-heuristique de recherche globale qui est basée sur l'activité commune et auto-organisationnelle des particules de même groupe [47],[48]. Comme le montre la fig. 3.1, cette technique est régie par des règles de déplacement (dans l'espace des solutions), permettant à ces particules de se déplacer progressivement de leurs positions aléatoires pour atteindre une position locale optimale [47]. La PSO repose sur les règles, de la mise à jour des positions locales et globale de particules et du groupe, donnée par les équations (3.1, 3.2)[45,48,49] :

$$V_i(t+1) = w * \left(V_i(t) + c_1 * rand_1 * (PBest_i(t) - D_{fitness_i}(t)) + c_2 * rand_2 * (GBest_i(t) - P_i(t)) \right) \quad (3.1)$$

$$P_i(t+1) = P_i(t) + V_i(t+1) \quad (3.2)$$

$$D = PSO(V, I) \quad (3.3)$$

P : Position de la particule.

• V : Vitesse.

• $PBest$: Meilleure position de la particule qui correspond à Local_Dbest.

• $GBest$: Meilleure position du groupe de particule qui correspond à Global_Dbest.

• $rand$: Variable aléatoire uniformément distribuée sur un intervalle de $[0, 1]$ (fonction définie dans Matlab).

• D : Rapport cyclique.

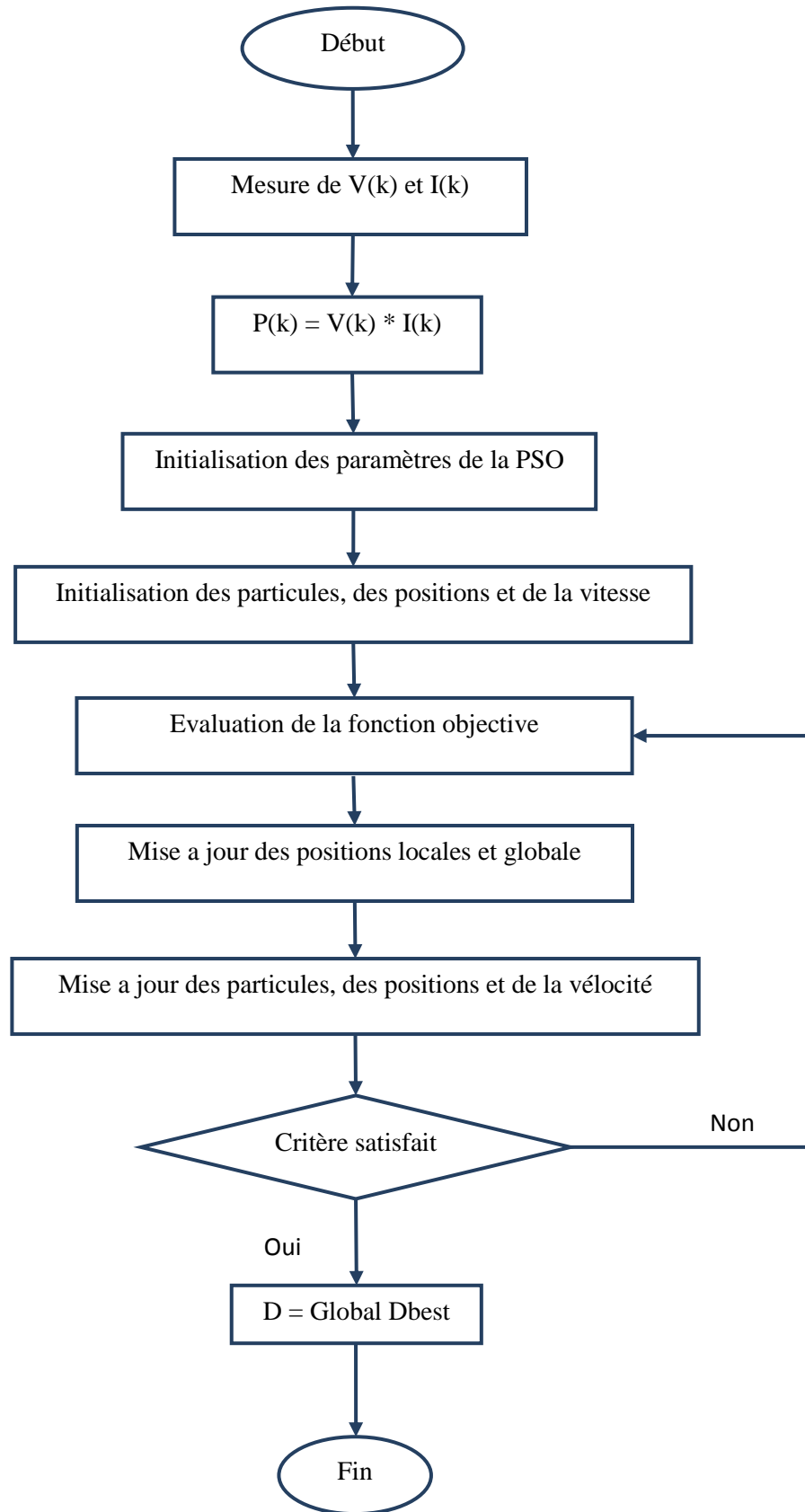


Fig 3.1 organigramme de PSO [50]

Selon la fig. 3.1, l'organigramme PSO consiste à satisfaire l'Eq. (3.3). Cet organigramme repose sur les étapes suivantes :

1. Initialisation des Paramètres de la PSO.
2. Initialisation des particules, des positions et de la vitesse.
 - L'initialisation des particules revient à attribuer la valeur de zéro aux composantes précédentes et nouvelles des vecteurs PPV :

$$P_{pv}Old = zero(1, swarms) \quad (3.4)$$

$$P_{pv}New = zero(1, swarms) \quad (3.5)$$

L'initialisation des positions revient à attribuer des valeurs aléatoires entre 0 et 1 aux composantes de vecteur de positions qui sont ceux des rapports cycliques :

$$D_Cur = 0.3 * rand(1, swarms) \quad (3.6)$$

L'initialisation aléatoire de la vélocité selon l'équation suivante :

$$Vel = 0.5 * (rand(1, swarms)) * (Vmax - Vin) + Vin \quad (3.7)$$

3. L'évaluation de la fonction objective dans cet algorithme consiste à comparer la précédente puissance avec la nouvelle puissance (l'Eq. (3.15)).

$$P_{PV}Old = P_{PV}New \quad (3.8)$$

Pour une itération donnée et pour chaque position on calcule PPV _New à partir des valeurs de D_Cur et on détermine le nouveau GMPP. Donc on définit le meilleur rapport cyclique local. Ensuite, on compare le nouveau GMPP avec le précédent GMPP selon l'Eq. (3.9)

$$GMPP_{PV}Old = GMPP_{PV}New \quad (3.9)$$

4. Le premier critère d'arrêt à satisfaire repose sur l'Eq. (3.2). Si le GMPP_New est égal au GMPP_Old donc le point de fonctionnement a atteint le GMPP et le rapport cyclique qui lui correspond (D) est égal au meilleur rapport cyclique global (Global_Dbest). La seconde condition pour que l'algorithme PSO s'arrête est d'atteindre le nombre d'itérations sans satisfaire l'Eq. (3.2).

5. La mise à jour des positions et de la vélocité repose sur les Eq. (3.1, 3.2)

3-2-2 Algorithme d'Optimisation des Loups Gris (GWO)

L'algorithme d'optimisation des loups gris (Grey Wolves Optimisation (GWO)) a été développé afin d'imiter la hiérarchie sociale des loups gris et en particulier leurs comportements durant la chasse [51],[52]. Dans la fig. 3.2, le GWO utilise quatre types de populations de loups : Les loups α qui mènent la chasse sont considérés les meilleures solutions. Les loups β et δ qui représentent les meilleures seconds et troisièmes respectivement, peuvent assister les loups α dans la prise de décision. Les loups ω sont des loups suiveurs [51],[53]. La Fig. 3.3 montre la mise à jour des positions des loups gris lors de la chasse de gibier. D'après la Fig. 3.4, les principales phases sur lesquelles est basé le GWO sont :

- Reconnaissance de la position de la proie et encerclement de cette dernière les Eq.(4.12, 4.13) [54].
- Harceler la cible jusqu'à ce qu'il cesse de bouger. Par conséquent, les positions de loups sont mises à jour pour converger vers les meilleures positions obtenues tel présenté dans les Eq. (3.12- 3.15) [54].
- Attaque du gibier [44] [58] [59].

$$D = |CX_p - AX(t)| \quad (3.10)$$

$$X(t + 1) = X_p(t) - AD \quad (3.11)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 * (\vec{D}_\alpha) \quad (3.12)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 * (\vec{D}_\beta) \quad (3.13)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 * (\vec{D}_\delta) \quad (3.14)$$

$$\vec{X}(t + 1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (3.15)$$

- A, C: Vecteurs coefficients dont les éléments sont déterminés aléatoirement.
- X : Vecteur de position du loup.
- Xp : Vecteur de position de la proie.
- D : Distance entre les positions du loup et de la proie.

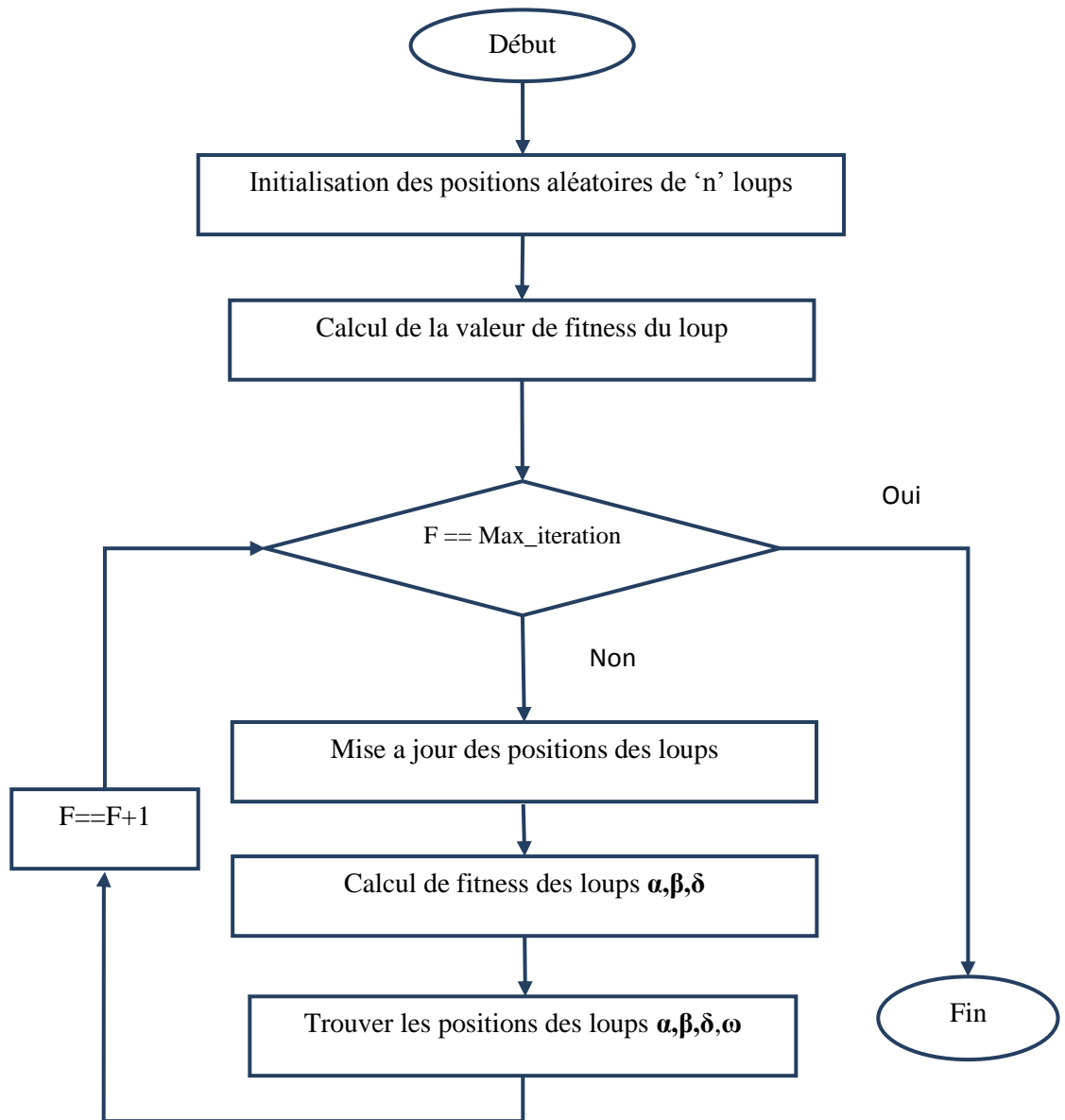


Fig 3.2 Organigramme de l’algorithme GWO [48].

L'algorithme GWO donné par la fig. 3.2 se déroule selon les étapes suivantes[45] :

1) Initialisation aléatoire des positions des loups α , β , δ dans l'espace de recherche limitées par les valeurs minimales et maximales (Eq. (3.17)). On attribue à la position initiale de chaque type de loup la valeur égale à l'infini (Eq. (3.17)).

$$\text{Alpha_position} = \text{Beta_position} = \text{Delta_position} = \text{zeros}(1,4) \quad (3.16)$$

$$\text{Alpha_score} = \text{Beta_score} = \text{Delta_score} = \infty \quad (3.17)$$

2) Le calcul de la fonction objective (fitness) consiste à choisir l'indice de performance le plus approprié pour avoir une erreur minimale qui correspond à fitness.

Alpha_score, Beta_score et Delta_score sont comparés à fitness comme suit :

- Si $\text{Alpha_score} < \text{fitness}$, on actualise Alpha_score qui sera égale à fitness et on définit la nouvelle position (Alpha_position) du loup α qui correspond à Alpha_score récent.
- Si $\text{Alpha_score} > \text{fitness}$ et $\text{Beta_score} < \text{fitness}$, on actualise Beta_score qui sera égale à fitness et on définit la nouvelle position (Beta_position) du loup β qui correspond à Beta_score récent.
 - Si $\text{Alpha_score} > \text{fitness}$ et $\text{Beta_score} > \text{fitness}$ et $\text{Delta} < \text{fitness}$, on actualise Delta_score qui sera égale à fitness et on définit la nouvelle position (Delta_position) du loup δ qui correspond à Delta_score récent.

3) La mise à jour des positions des loups est représentée par la fig. 3.3. Cette mise à jour se fait à chaque itération selon les Eq. (3.12–3.15). Les paramètres A, C et a sont mis à jour selon ces équations ce qui permet de rétrécir l'espace de recherche et réduire la distance qui sépare les loups de la proie.

4) Le calcul de fitness et la mise à jour des positions des loups se fait à chaque itération jusqu'à atteindre Max_itération qui est le critère d'arrêt de la GWO [46],[47].

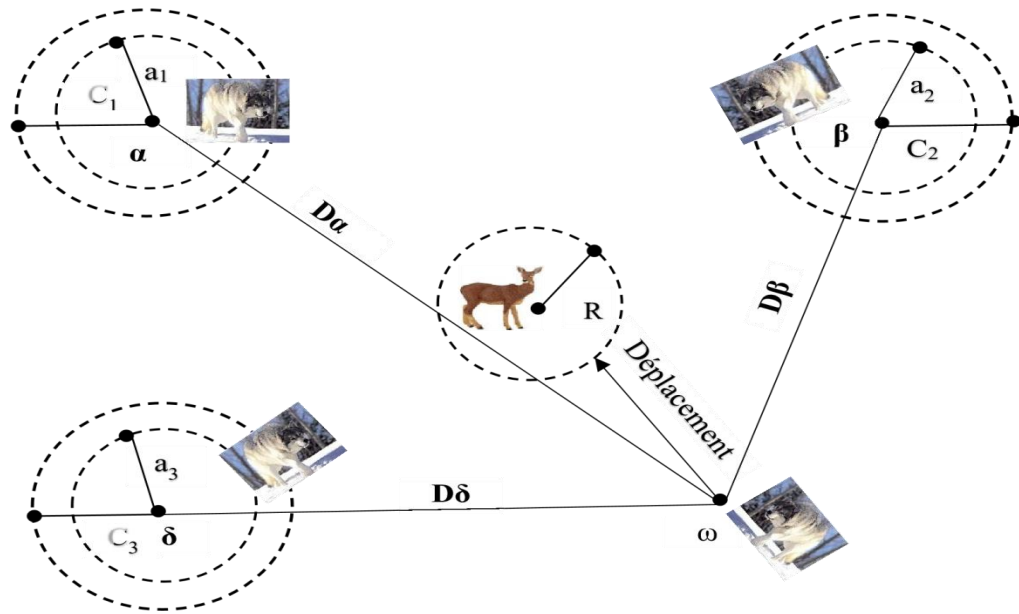


Fig3.3 Mise à jour des positions des loups.

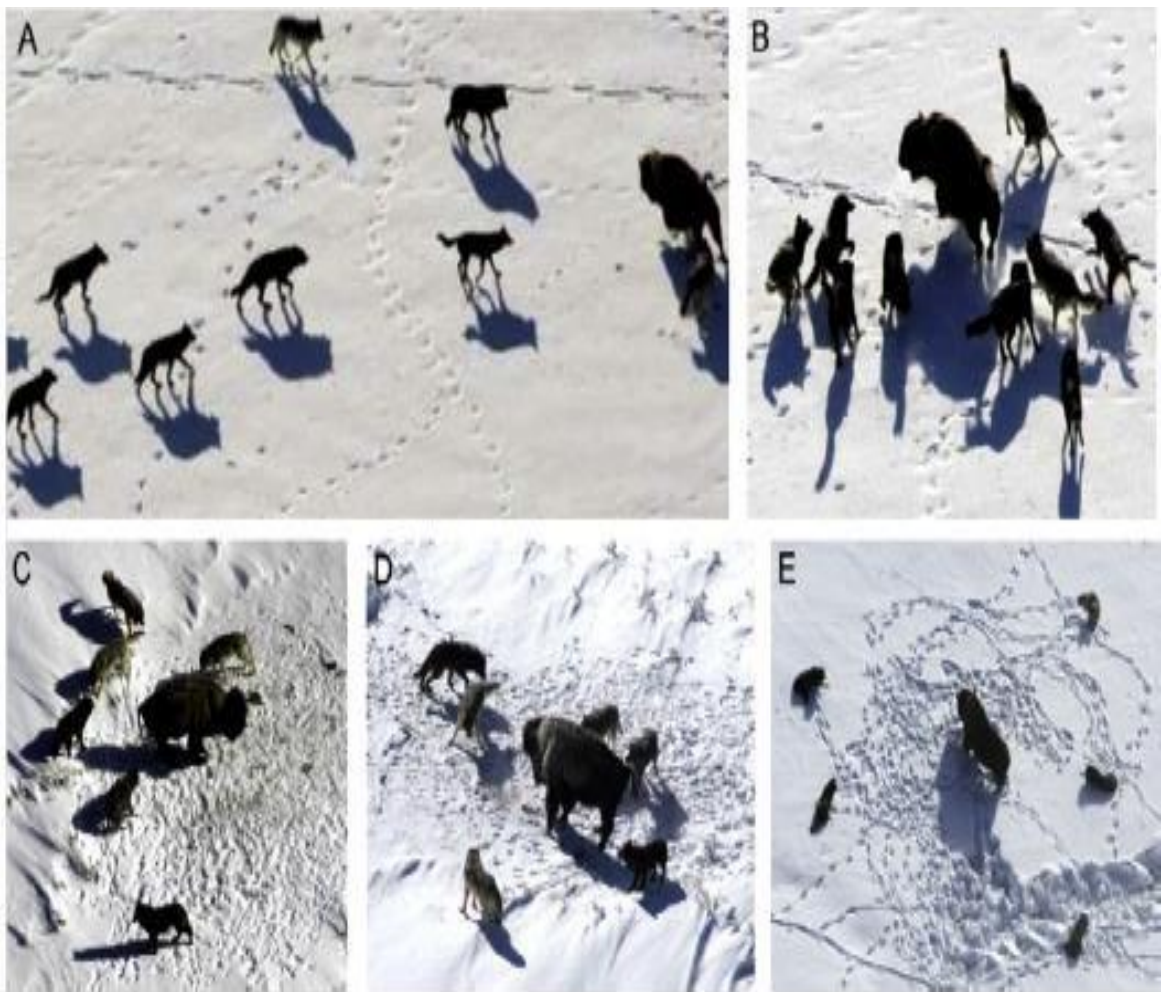


Fig 3.4 Comportement de la meute des loups gris lors de la chasse : (A) Poursuite de la proie, (B-D) harcèlement et encerclement, (E) Position d'attaque.

3-2-3 Algorithme d'Optimisation des hyènes tachetées (SHO)

3-2-3-1 Introduction

La relation sociale entre les animaux est l'inspiration de notre travail et corrèle ce comportement à l'hyène tachetée qui est scientifiquement nommée *Crocuta*. Les hyènes sont de grands carnivores ressemblant à des chiens. Ils vivent dans les savanes, les prairies, les sous-déserts et les forêts d'Afrique et d'Asie. Ils vivent 10 à 12 ans dans la nature et jusqu'à 25 ans en prison [48]. Il existe quatre espèces connues d'hyènes, à savoir l'hyène tachetée, l'hyène rayée, l'hyène brune et le loup-garou qui diffèrent par leur taille, leur comportement et leur type de régime. Toutes ces espèces ont une attitude semblable à celle d'un ours car les pattes avant sont plus longues que les pattes arrière.

Les hyènes tachetées sont des chasseurs habiles et la plus grande des trois autres espèces d'hyènes (c'est-à-dire rayées, brunes et aardwolf). L'hyène tachetée est également appelée hyène qui rit parce que ses sons ressemblent beaucoup à un rire humain. Ils sont appelés ainsi parce qu'il y a des taches sur leur fourrure qui est de couleur brun rougeâtre avec des taches noires. Les hyènes tachetées sont des animaux compliqués, intelligents et très sociaux avec une réputation vraiment épouvantable. Ils ont la capacité de se battre sans fin pour le territoire et la nourriture.

Dans la famille des hyènes tachetées, les membres féminins sont dominants et vivent dans leur clan. Cependant, les membres masculins quittent leur clan lorsqu'ils sont adultes pour rechercher et rejoindre un nouveau clan. Dans cette nouvelle famille, ce sont les membres les moins bien classés pour obtenir leur part du repas. Un membre masculin qui a rejoint le clan reste toujours longtemps avec les mêmes membres (amis). Alors qu'une femelle, est toujours assurée d'une place stable. Un fait intéressant à propos des hyènes tachetées est qu'elles produisent une alerte sonore très similaire au rire humain pour communiquer entre elles lorsqu'une nouvelle source de nourriture est trouvée.

Selon Ilany et al. [48] les hyènes tachetées vivent et chassent généralement en groupe, s'appuient sur un réseau d'amis de confiance comptant plus de 100 membres. Et pour augmenter leur réseau, ils se lient généralement à une autre hyène tachetée qui est l'amie d'un ami ou qui est liée d'une manière ou d'une autre par la parenté plutôt qu'à une hyène tachetée inconnue. Les hyènes tachetées sont des animaux sociaux qui peuvent communiquer entre eux par des appels spécialisés tels que des postures et des signaux. Ils

utilisent de multiples procédures sensorielles pour reconnaître leurs proches et d'autres individus. Ils peuvent également reconnaître des parents tiers et classer les relations entre leurs camarades de clan et utiliser ces connaissances lors de la prise de décision sociale. L'hyène tachetée traque ses proies à la vue, à l'ouïe et à l'odorat. La figure suivante montre le mécanisme de suivi, de poursuite, d'encerclement et d'attaque des hyènes tachetées. Les grappes cohésives sont utiles pour une coopération efficace entre les hyènes tachetées et maximisent également la forme physique. Dans ce travail, la technique de chasse et la relation sociale des hyènes tachetées sont modélisées mathématiquement pour concevoir SHO et effectuer une optimisation [48].



Fig3.5 Comportement de chasse des hyènes tachetées :

(A) recherche et suivi de proies (B) poursuite (C) gêne et encerclement

(D) situation immobile et attaque de proies

L'optimiseur de hyènes tachetées a été présenté pour la première fois par Gaurav Human et Vijay Kumar en 2017 [48]. Cette technique d'optimisation bio-inspirée imite la hiérarchie sociale et le comportement de chasse en groupe des hyènes tachetées dans le but de résoudre divers problèmes d'optimisation [48], [49], [50]. De plus, la meute de hyènes tachetées peut contenir plus de 100 membres travaillant ensemble dans un groupe organisé. Dans le détail, c'est une technique de chasse qui peut être divisée en quatre comportements principaux qui sont la recherche, l'encerclement, la chasse et enfin l'attaque de la proie.

3-2-3-2 modèles mathématiques

Dans cette section, les modèles mathématiques de la recherche, de l'encerclement, de la chasse et de l'attaque des proies sont fournis. Ensuite, l'algorithme SHO est décrit

3-2-3-2-1 Recherche et encerclement de proies

Les hyènes tachetées peuvent connaître l'emplacement des proies et les encercler. Pour modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des hyènes tachetées, nous considérons que la meilleure solution candidate actuelle est la proie cible ou l'objectif qui est proche de l'optimum en raison de l'espace de recherche non connu a priori. Les autres agents de recherche essaieront de mettre à jour leurs positions, une fois la meilleure solution candidate de recherche définie, sur la meilleure solution candidate optimale.

Autrement, au début de la chasse, il n'y a pas assez d'informations sur la position de la proie ; donc l'agent de recherche actuel le plus apte selon la fonction objectif sera considéré comme la proie, le reste de la meute essaiera d'entourer cette position, ce comportement est présenté dans le modèle mathématique suivant :

$$\vec{D}_h = |\vec{B} \cdot \vec{P}_p(x) - \vec{P}(x)| \quad (3.18)$$

$$\vec{P}(x+1) = \vec{P}_p(x) + \vec{E} \cdot \vec{D}_h \quad (3.19)$$

Dans laquelle x est l'itération actuelle, $\vec{P}_p(x)$ représente la position de la proie, tandis que $\vec{P}(x)$ est l'emplacement de la hyène tachetée ; \vec{D}_h représente l'espace entre la hyène tachetée et la proie ; les positions vainqueurs \vec{E} et \vec{B} sont données par :

$$\vec{B} = 2 \cdot \vec{r}_1 \quad (3.20)$$

$$\vec{E} = 2\vec{h} \cdot \vec{r}_2 - \vec{h} \quad (3.21)$$

$$\vec{h} = 5 - \left(\text{current}_{iteration} * \frac{5}{\text{Maximum}_{iteration}} \right) \quad (3.22)$$

Où \vec{r}_1 et \vec{r}_2 sont des vainqueurs aléatoires en 1 et 0, \vec{h} est un vainqueur linéairement décroissant tout au long des itérations de 5 à 0 comme dans l'équation.(3.22). La recherche de la solution optimale globale et de l'évitement optimal local pendant la chasse est garantie par les vainqueurs \vec{E} et \vec{B} , où \vec{B} randomise le poids de la proie et \vec{E} oblige les agents de recherche à s'écarter de la position de la proie lorsque $1 < |\vec{h}|$ [48], [49].

Pour équilibrer correctement l'exploration et l'exploitation, h est diminué linéairement de 5 à 0 au cours du nombre maximum d'itérations (Maxitération). De plus, ce mécanisme favorise plus d'exploitation dans la mesure que la valeur d'itération augmente. Cependant, rd 1, rd 2 sont des vecteurs aléatoires dans [0, 1]. Sur la figure suivante, la hyène tachetée (A,B) peut mettre à jour sa position vers la position de proie (A*,B*). En ajustant la valeur des vecteurs B et E, il y a un nombre différent d'endroits qui peuvent être atteints autour de la position actuelle.

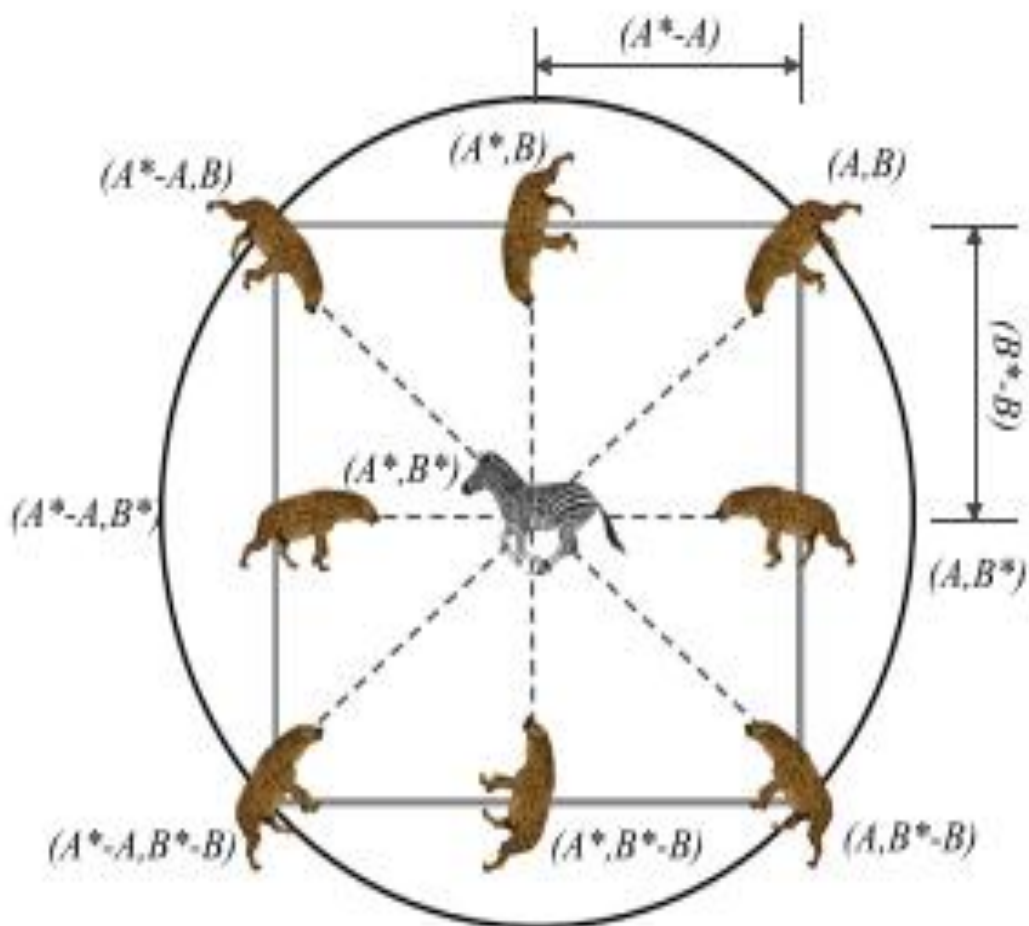


Fig 3.6 Vecteurs de position 2D de l'hyène tachetée

3-2-3-2-2 Chasse

Les hyènes en pot vivent et chassent généralement en groupe et s'appuient sur un réseau d'amis de confiance et sur la capacité de reconnaître l'emplacement des proies. Pour définir mathématiquement le comportement des hyènes tachetées, nous supposons que le meilleur agent de recherche, quel que soit l'optimum, connaît l'emplacement de la proie. Les autres agents de recherche forment un cluster, groupe d'amis de confiance, vers le meilleur agent de recherche et ont enregistré les meilleures solutions obtenues jusqu'à présent pour mettre à jour leurs positions[48].

Le comportement de chasse en groupe des hyènes tachetées est basé sur un groupe d'amis de confiance qui réadaptent leurs emplacements en fonction de l'hyène la plus apte et des meilleures positions trouvées lors de la recherche. Ce comportement est modélisé mathématiquement comme dans les équations fluides :

$$\vec{D}_h = |\vec{B} \cdot \vec{P}_h - \vec{P}_k| \quad (3.23)$$

$$\vec{P}_k = \vec{P}_h - \vec{E} \cdot \vec{D}_h \quad (3.24)$$

$$\vec{C}_h = \vec{P}_k + \vec{P}_{k+1} + \dots + \vec{P}_{k+N} \quad (3.25)$$

$$N = \text{count}_{nos}(\vec{P}_h, \vec{P}_{h+1}, \dots, (\vec{P}_h + \vec{M})) \quad (3.26)$$

où \vec{P}_k est la position de l'agent de recherche courant, \vec{P}_h représente la première solution optimale, \vec{M} est un vainqueur choisi aléatoirement dans [0.5,1], \vec{M} est utilisé pour définir le groupe des N premières solutions optimales, et \vec{C}_h c'est un groupe de N nouvelle position calculée à l'aide de l'Eq.(3.23) et l'Eq.(3.24).

3-2-3-2-3 L'attaque

La phase d'attaque commence lorsque $1 > |\vec{h}|$ dans lequel chaque agent de recherche est obligé d'ajuster son placement dans l'espace existant entre son emplacement actuel et le positionnement de la proie. Aussi, l'Eq.(3.27) représente le modèle mathématique de ce comportement.

$$\vec{P}(x+1) = \frac{\vec{C}_h}{N} \quad (3.27)$$

Afin de modéliser mathématiquement l'attaque de la proie, nous diminuons la valeur du vecteur h. La variation du vecteur E est également diminuée pour changer la valeur du

vecteur h qui peut passer de 5 à 0 au cours des itérations. La figure suivante montre que $|E| < 1$ force le groupe d'hyènes tachetées à attaquer la proie.

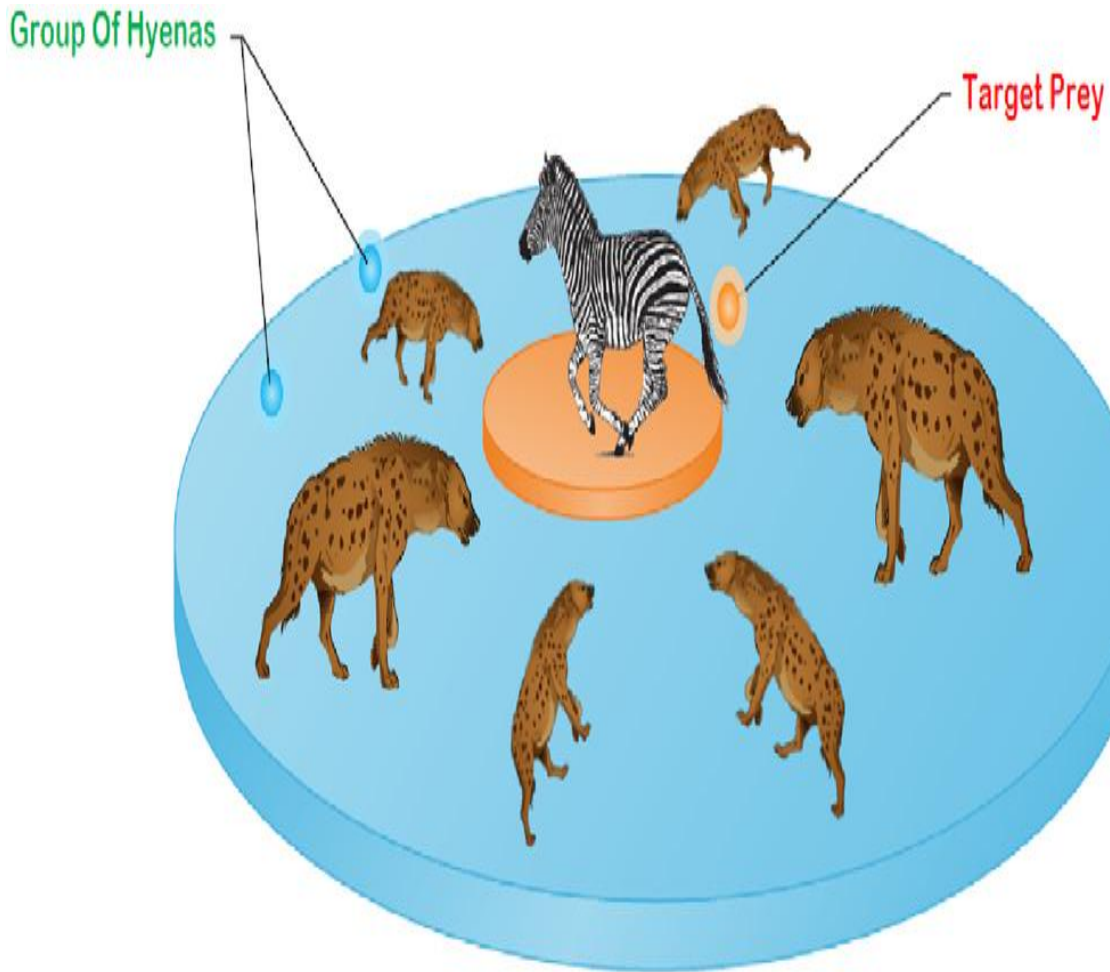


Fig 3.7 Attaquer une proie ($|E| < 1$).

Les hyènes tachetées recherchent principalement la proie, selon la position du groupe ou du groupe d'hyènes tachetées qui résident dans le vecteur Ch . Ils s'éloignent les uns des autres pour rechercher et attaquer des proies. Par conséquent, nous utilisons E avec des valeurs aléatoires supérieures à 1 ou inférieures à -1 pour forcer les agents de recherche à s'éloigner de la proie. Ce mécanisme permet à l'algorithme SHO de rechercher globalement. Pour trouver une proie appropriée, la figure suivante montre que $|E| > 1$ permet aux hyènes tachetées de s'éloigner de la proie. Un autre constituant de l'algorithme SHO qui rend possible l'exploration est B . Dans l'Eq. (3), le vecteur B contient des valeurs aléatoires qui fournissent les poids aléatoires des proies. Pour montrer le comportement plus aléatoire de l'algorithme SHO, supposons que le vecteur $B > 1$ priorité sur $B < 1$ pour démontrer l'effet sur la distance. Cela sera utile pour l'exploration et l'évitement des optima

locaux. Selon la position d'une hyène tachetée, elle peut décider au hasard d'un poids à la proie et la rend éventuellement rigide ou au-delà pour atteindre les hyènes tachetées. Nous avons intentionnellement besoin du vecteur B pour fournir des valeurs aléatoires pour l'exploration non seulement pendant les itérations initiales mais aussi pour les itérations finales. Ce mécanisme est très utile pour éviter les problèmes d'optimums locaux, plus que jamais dans les itérations finales [48].

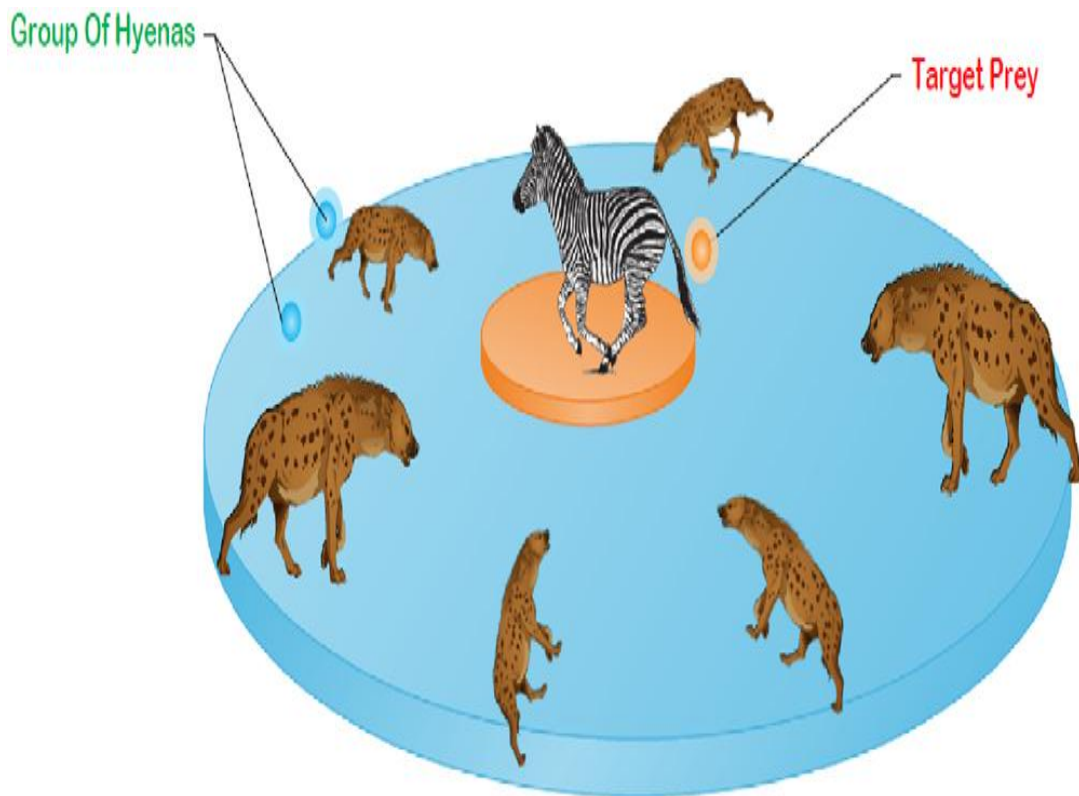


Fig 3.8 Recherche de proies ($|E| > 1$).

3-2-3-3 Application SHO pour le suivi MPPT

La figure suivante représente le schéma de l'algorithme basé sur SHO ;dans ce dernier cas, notre problème d'optimisation est la maximisation de la puissance de sortie PV ;le rapport cyclique (D) du signal PWM (qui commande le commutateur du convertisseur élévateur) est défini comme une hyène.[49],

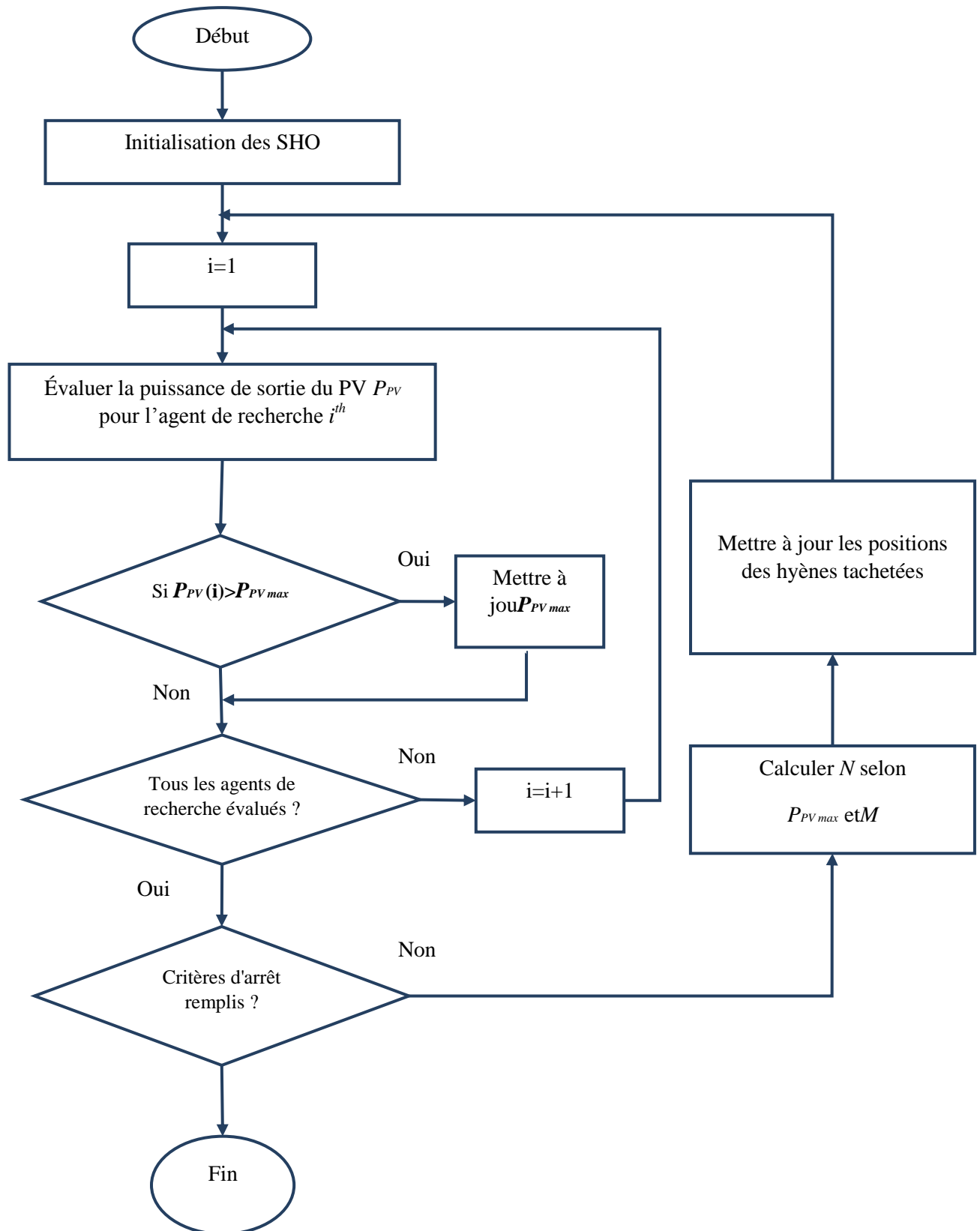


Fig 3.9 Organigramme de l'algorithme SHO.

3-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques MPPTméta-heuristiquesles plus utilisées pour lacommande de système photovoltaïque. De plus, nous avons présenté aussila nouvelle méthode SHOutilisée dans le cas d'ombrage partiel. Les résultats comparatifs de cettéméthode de avec la méthodeconventionnelle (P &O) et la méthode méta-heuristique GWO seront présentés dans le chapitre suivant.

4-1 Introduction

Pour valider notre algorithme SHO et le comparant avec les deux algorithmes P&O, GWO, nous choisissons des charges résistives constantes et variables. Dans notre cas, l'éclairement est une source de perturbation pour le GPV causée par ombrage partiel ou total, ou par l'intensité de l'éclairement variable durant la journée.

Nous présentons dans un premier temps l'application des trois algorithmes pour deux cas sans ombrage et avec ombrage. Dans les cas avec ou sans ombrage on applique trois essais pour comparer les résultats:

- éclairement constant pour les trois panneaux;
- éclairement variables pour les trois panneaux;
- variation brusque de l'éclairement.

Deuxièmement, nous présentons l'application des deux algorithmes GWO et SHO pour deux cas :

- changement de la charge ;
- changement de température.

Dans cette thèse, nous avons utilisé le module KC200GT (Tableau 4.1) pour faire les simulations [03].

Parameter	Value
Model	KC200GT
Maximum power	200.143 (W)
Voltage of MPP	26.3 (V)
Current of MPP	7.61 (A)
Open-circuit voltage	32.9 (V)
Short-circuit current	8.21 (A)
Kv	-0.123(V/°C)
Ki	0.003 (A/°C)
Cells per module	54

Tableau 4.1 Données de caractéristiques électriques du module PV (KC200GT) dans les conditions standard

Cette étude utilise un convertisseur DC-DC ; ses éléments sont présentés dans le tableau 4.2.

Element	Value
Inductance	300 (μH)
Output Capacitor	100 (μF)
Load	100 (Ω)
Switching frequency	10 (kHz)

Tableau 4.2 Paramètres du convertisseur élévateur DC-DC

4-2 Description du système

Comme il est montré dans la figure 4.1, dans notre scénario de fonctionnement du système PV, un groupe de trois modules PV en série de la marque KC200GT, est simulé dans Matlab/Simulink.

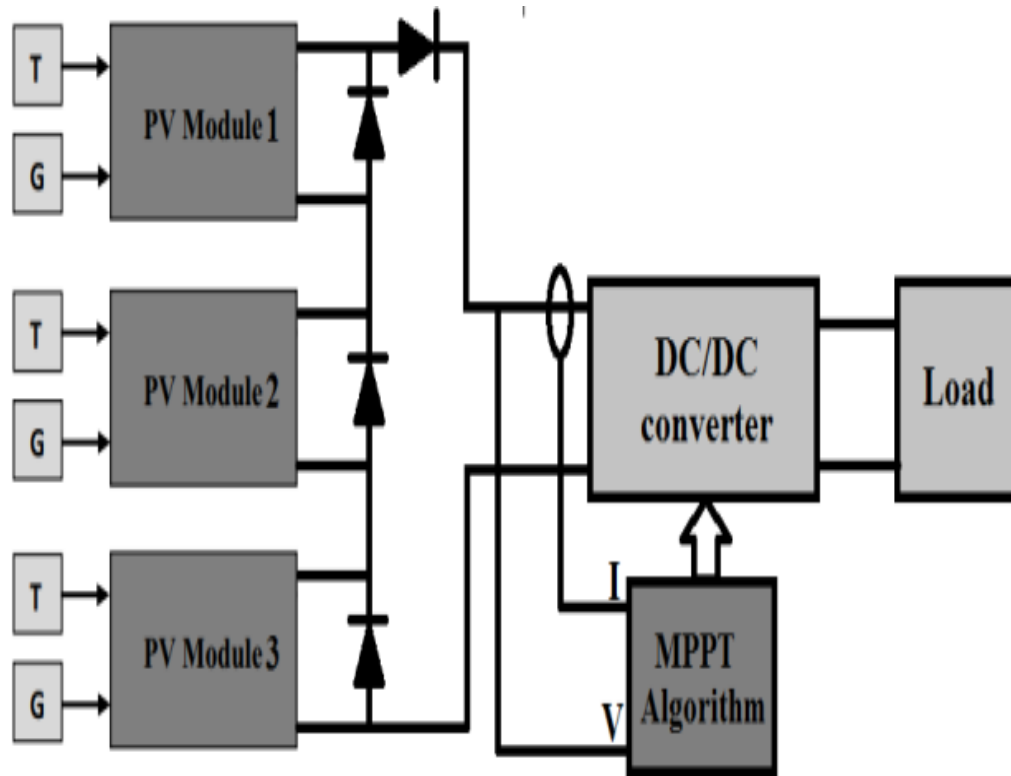


Fig 4.1 Structure du système proposé

Selon les exigences de la demande, pour augmenter la puissance du système PV, les modules PV sont regroupés en série et en parallèle. Un changement d'ensoleillement rapide et dynamique peut apparaître sur les panneaux pendant les PC ou les jours nuageux. Dans des conditions similaires, plusieurs pics sont observés dans la courbe de la caractéristique P-V, comme le montre la Figure 4.2 (points maximaux locaux LMPP et point global GMPP) et cela est dû à l'existence des diodes by-pass [8]. Pendant les PSC, l'avantage de l'existence d'une diode de by-pass que nous aidons à réduire la possibilité d'apparition de points chauds. Cela fait que le module, qui est ombré, se comporte comme s'il consomme l'énergie au lieu de la générer. Comme il est apparait dans la figure 4.2, le GMPP évolue principalement en fonction de l'irradiation. Par conséquent, sous ombrage partiel, le suivi du GMPP est important afin d'améliorer l'efficacité de la production d'énergie.

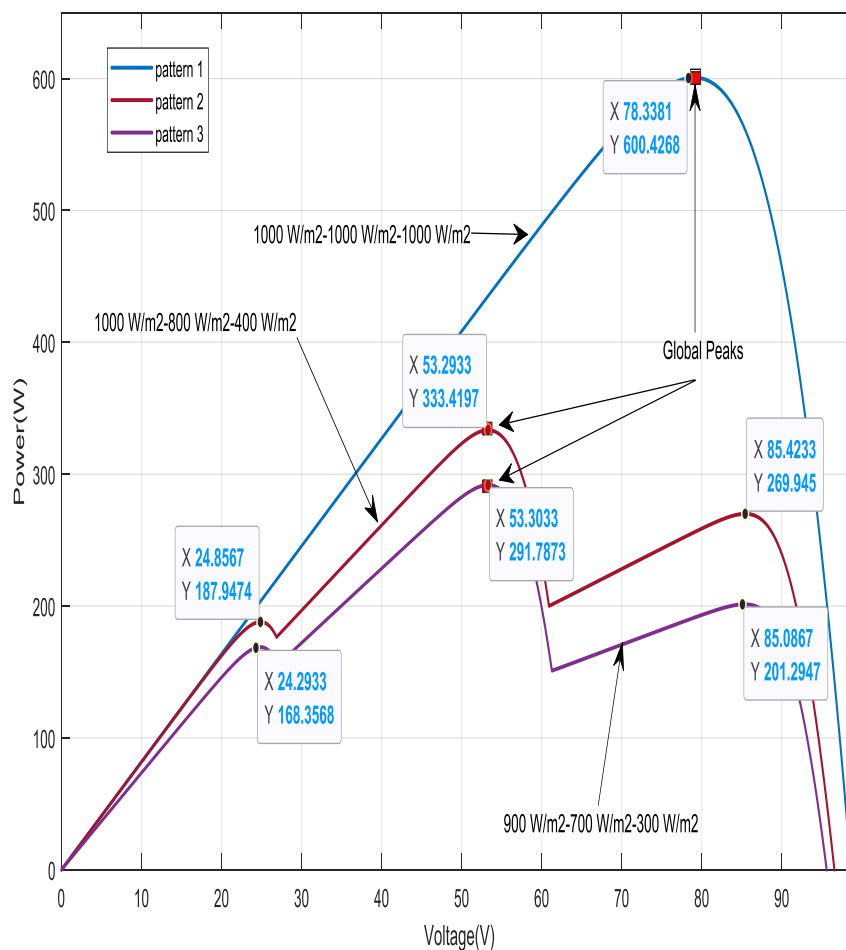


Fig 4.2 caractéristique P=f(V) en ombrage partial

4-3 Performances dans des conditions standard

Dans cette situation, les performances de la méthode proposée, en la comparant avec les deux autres méthodes, sont évaluées tout au long de la simulation du système PV dans des conditions standard ; les niveaux d'éclairement des trois modules PV sont fixés à 1000 W/m². La température des modules est de 25 °C comme indiqué sur la figure 4.2, scénario 1, (1000w/m²-1000w/m²-1000w/m²).

Les figure 4.3, figure 4.4 et figure 4.5 montrent la puissance, la tension et le courant de sortie PV des trois algorithmes.

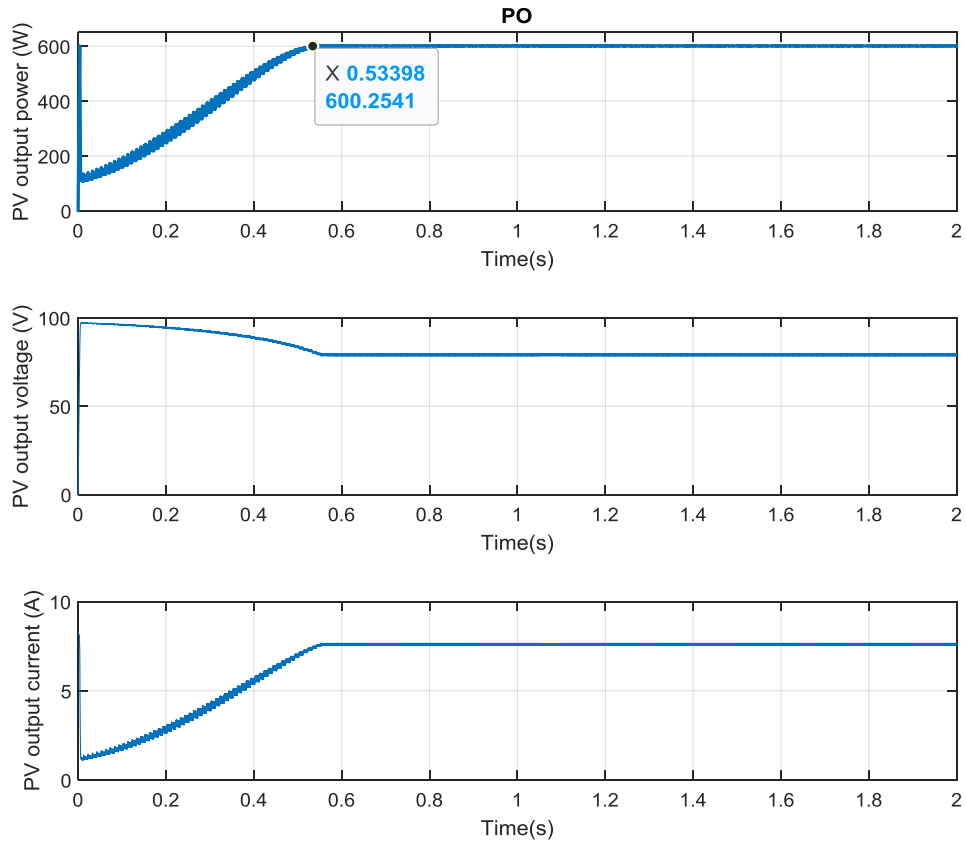


Fig 4.3 Algorithme P&O sous conditions standards

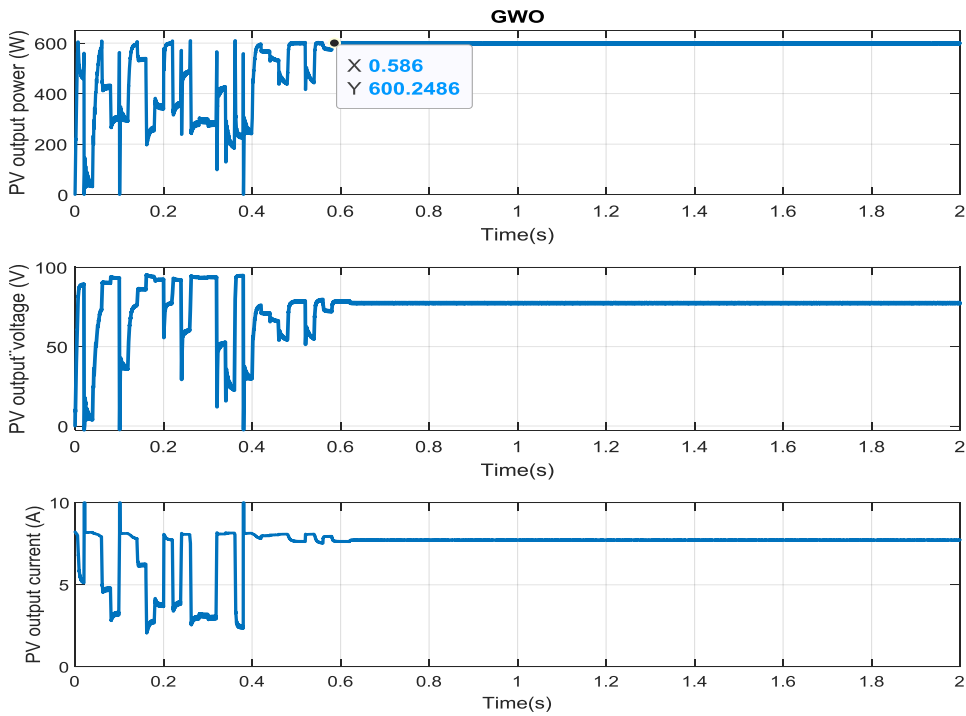


Fig 4.4 Algorithme GWO sous conditions standards

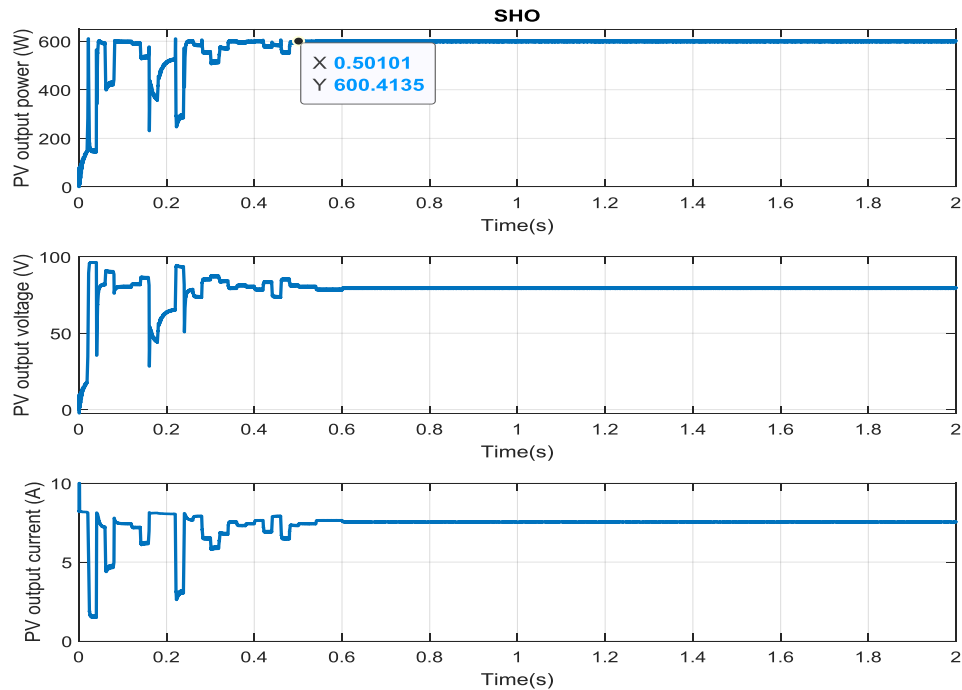


Fig 4.5 Algorithme SHO sous conditions standards

Nous constatons d'après les figures précédentes, P&O, GWO et SHO ont pris environ 0,53 s, 0,58 s et 0,50 s, respectivement, pour arriver au MPP. Nous notons que la réponse temporelle de SHO est meilleure que celle des algorithmes P&O et GWO. De plus, la sortie en régime permanent la puissance est d'environ 600,41 W, ce qui est très approximatif de la puissance maximale PV, c'est-à-dire ($200,143 * 3 = 600,43$ W) par rapport à d'autres méthodes. Ainsi, nous pouvons conclure que l'algorithme SHO est plus efficace que les algorithmes mentionnés précédemment.

Les paramètres statistiques donnés dans le Tableau suivant Tableau 4.3 ont montré l'efficacité de méthode SHO, avec une puissance PV extraite de 600.41 W et un taux d'efficacité 99.99 %. Les résultats de simulation montrent que la SHO est supérieure aux deux autres méthodes proposées en termes de poursuite de MPP et d'efficacité.

	P&O	GWO	SHO
Puissance extraite (W)	600.25	600.25	600.41
Temps de convergence (s)	0.53	0.59	0.50
Efficacité du MPPT (%)	99.97	99.97	99.99

Tableau 4.3 Performances dynamiques pour les techniques MPPT pour les conditions standards

4-4 Performances dans des conditions d'ombrage

Sous PSC, ce test est fait pour évaluer les performances et faire une comparaison entre trois algorithmes. Ici, les modules PV ont trois valeurs d'irradiance définies comme suit : 900, 700 et 300 W/m². Leur température est de 25 °C comme le montre la figure 4.2, scénario 3, (900w/m²-700w/m²-300w/m²).

Dans ce cas, on observe l'existence d'un GMPP (291,78 W) et de deux LMPP (168,35 W et 201,29 W). Les figure 4.6, figure 4.7 et la figure 4.8 montrent la puissance de sortie PV, la tension de sortie PV et le courant de sortie PV des trois algorithmes.

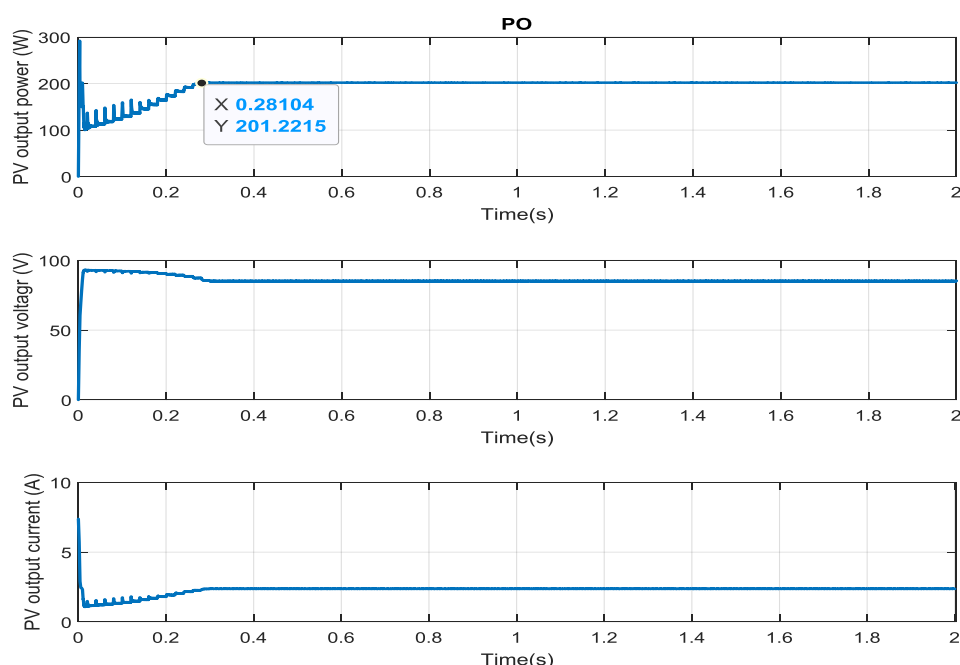


Fig 4.6 Algorithme P&O sous conditions d'ombrage partiel

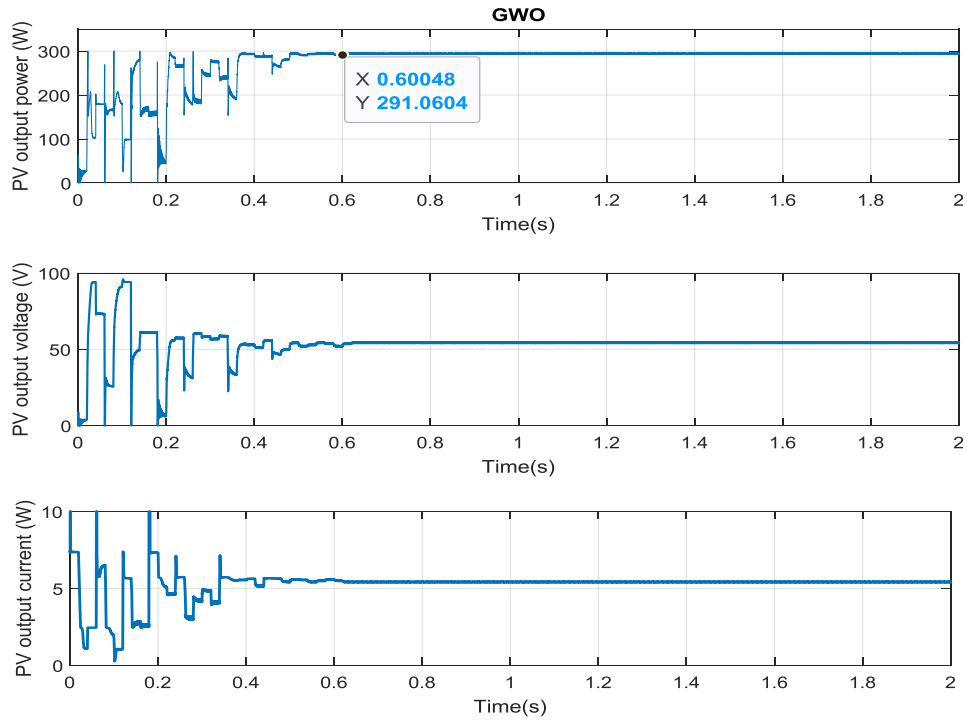


Fig 4.7 Algorithme GWO sous conditions d'ombrage partiel

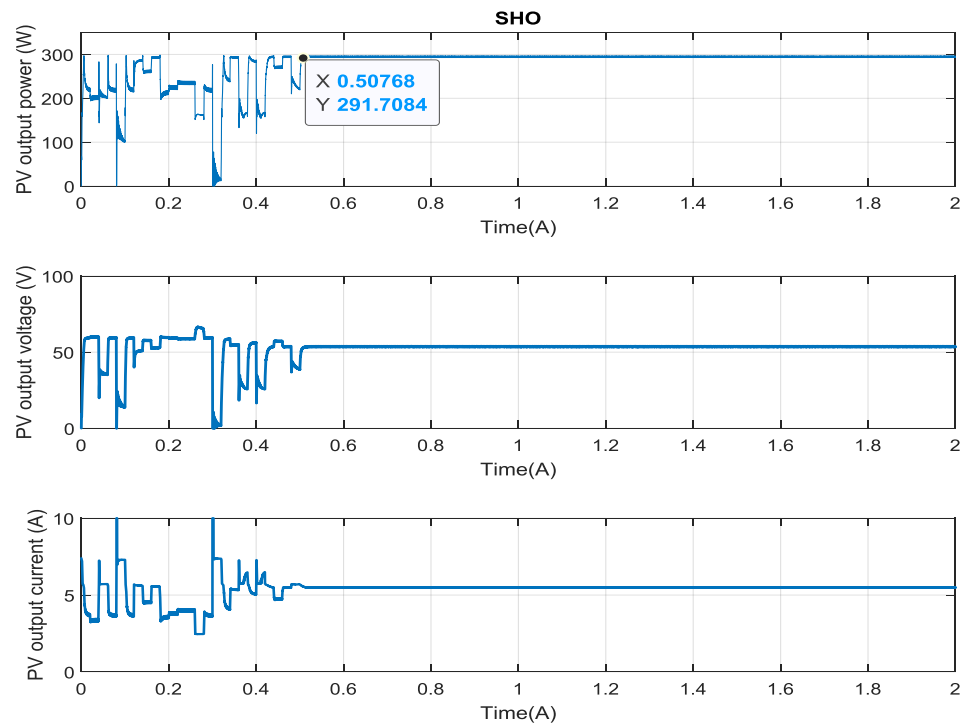


Fig 4.8 Algorithme SHO sous conditions d'ombrage partiel

Dans ce cas de condition d'ombrage partiel, les deux algorithmes SHO et GWO pourraient trouver le GMPP ; L'algorithme SHO est venu à 291,7 W tandis que GWO a atteint 291,06

W. Par conséquent, il est affirmé qu'en atteignant le GMPP (291,78 W), la méthode SHO s'est avérée plus valide que la méthode GWO.

De plus, nous avons remarqué que l'algorithme P&O converge vers un LMPP (201.22 W). Ce résultat montre que les pertes de puissance sont importantes. Dans ce cas, on peut se concentrer uniquement sur la puissance même si le temps de convergence de l'algorithme P&O est de 0,28 s. Pour arriver au GMPP, GWO prend 0,6 s et SHO 0,5 s. En conséquence, l'algorithme SHO s'est avéré plus efficace que l'algorithme GWO.

Le Tableau suivant montre l'efficacité de méthode proposée, avec une puissance PV extraite de (291.7 W) et un taux d'efficacité 99.98 %.

	P&O	GWO	SHO
Puissance extraite (W)	220.22	291.1	291.7
Temps de convergence (s)	0.28	0.6	0.51
Efficacité du MPPT (%)	69	99.6	99.98

Tableau 4.4 Performances dynamiques pour les techniques MPPT pour les conditions d' ombrage

4-5 Performance sous changement rapide de l'irradiance solaire :

Dans ces conditions, les trois modules du réseau simulé sont utilisés dans les conditions standard ($T= 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G= 1000\text{ W/m}^2$). A 01 s, nous avons appliqué une variation rapide à l'irradiance solaire (les irradiances des deuxième et troisième modules sont diminuées à 800 et 400 W/m^2 (Figure 4.2, scénario 2, ($800\text{W/m}^2\text{-}400\text{W/m}^2$), respectivement, tandis que l'irradiance du premier module reste 1000 W/m^2) pour tester et examiner les performances et la précision de l'algorithme SHO, par rapport à l'algorithme GWO, lorsque l'irradiance solaire change rapidement. Dans ce cas, à l'instant (01 s) nous avons une nouvelle courbe qui implique un MPP global (333,41 W et deux MPP locaux (187,94 W et 269,94 W). Dans les figures figure 4.9 et figure 4.10, les trajectoires du panneau solaire pour les algorithmes GWO et SHO sont affichées.

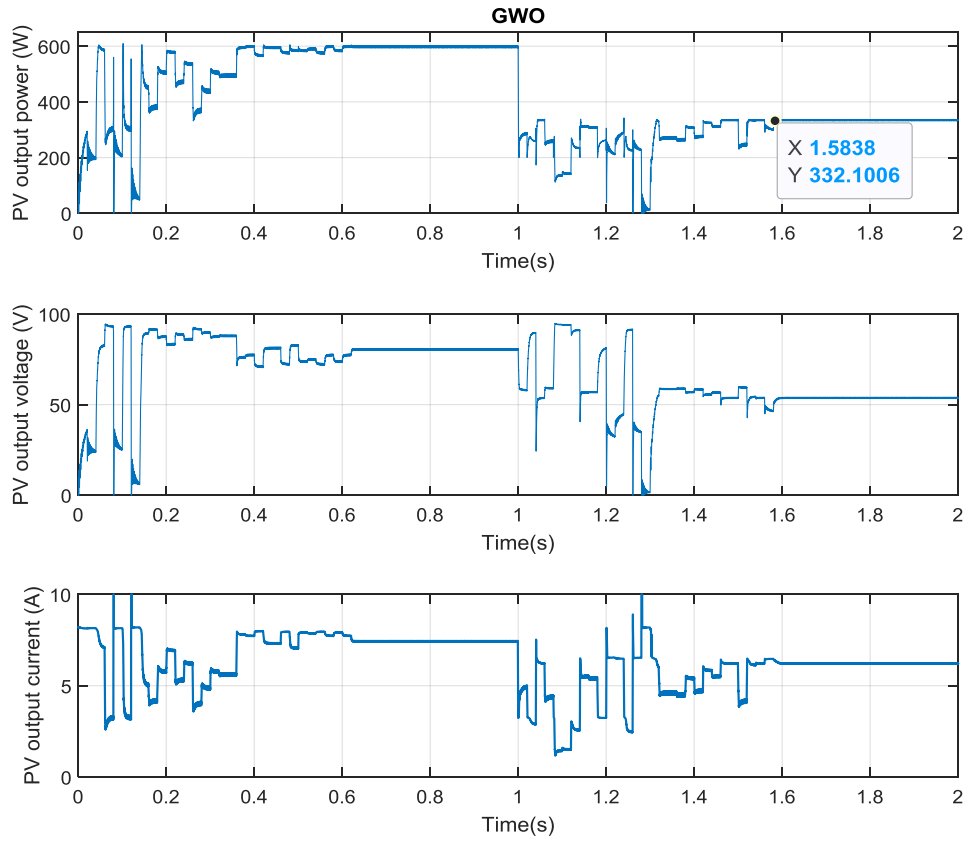


Fig 4.9 Algorithme GWO sous changement rapide d'irradiation

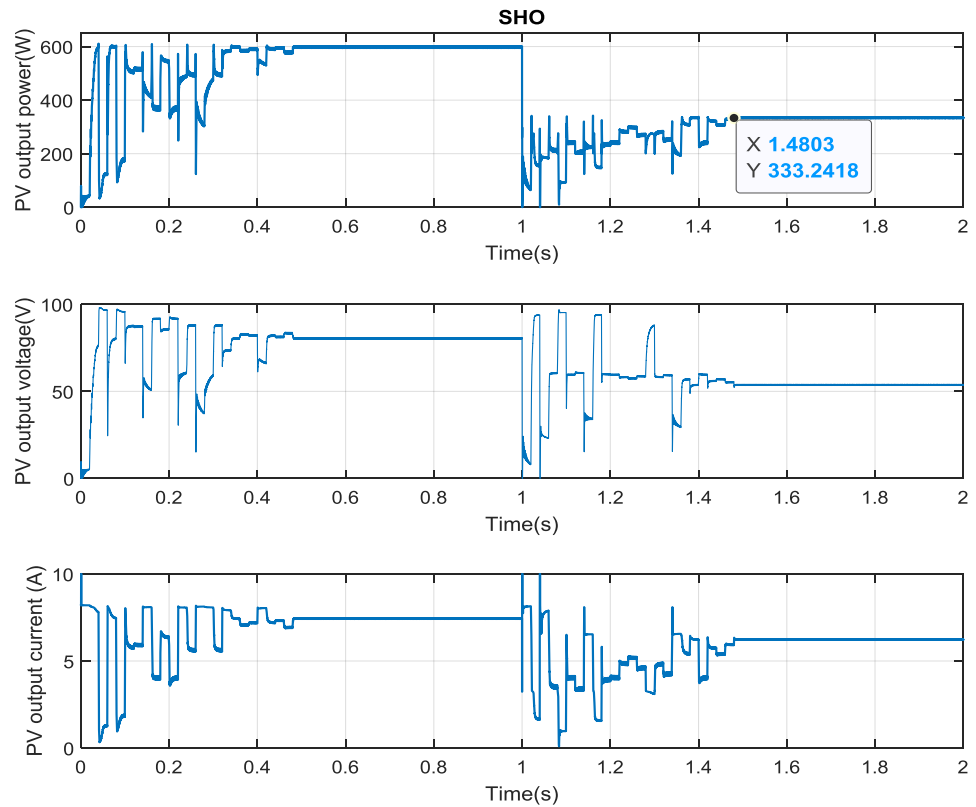


Fig 4.10 Algorithme SHO sous changement rapide d'irradiation

Comme il est apparaît sur les figures figure 4.9 et figure 4.10, après avoir appliqué un changement rapide de l'éclairement solaire, l'algorithme SHO présenté a absolument détecté le GMPP (333,24 W) et a convergé avec une vitesse appropriée, tandis que GWO a atteint (332,1 W). Le temps de convergence a augmenté d'environ 0,48 s après un changement rapide de l'ensoleillement, en comparaison avec l'algorithme GWO qui atteignait 0,58 s.

Comme le montre dans le tableau suivant (Tableau 4.5), la méthode SHO a montré une efficacité meilleure avec une puissance PV extraite de 333.25 W et un taux d'efficacité 99.9 %.

	GWO	SHO
Puissance extraite (W)	332	333.25
Temps de convergence (s)	0.58	0.48
Efficacité du MPPT (%)	99.6	99.9

Tableau 4.5 Performances dynamiques pour les techniques MPPT pour les

Changement rapide d' irradiation

4-6 Variation de charge 100Ω à 50Ω avec éclairement constante

Dans ce test, nous vérifions le comportement du système avec une variation de charge ; nous la changeons de 100Ω à 50Ω à l'instante $t=1s$ en gardant l'éclairement constant sur les trois panneaux (1000 W/ m²). Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures suivantes figure 4.11 et figure 4.12.

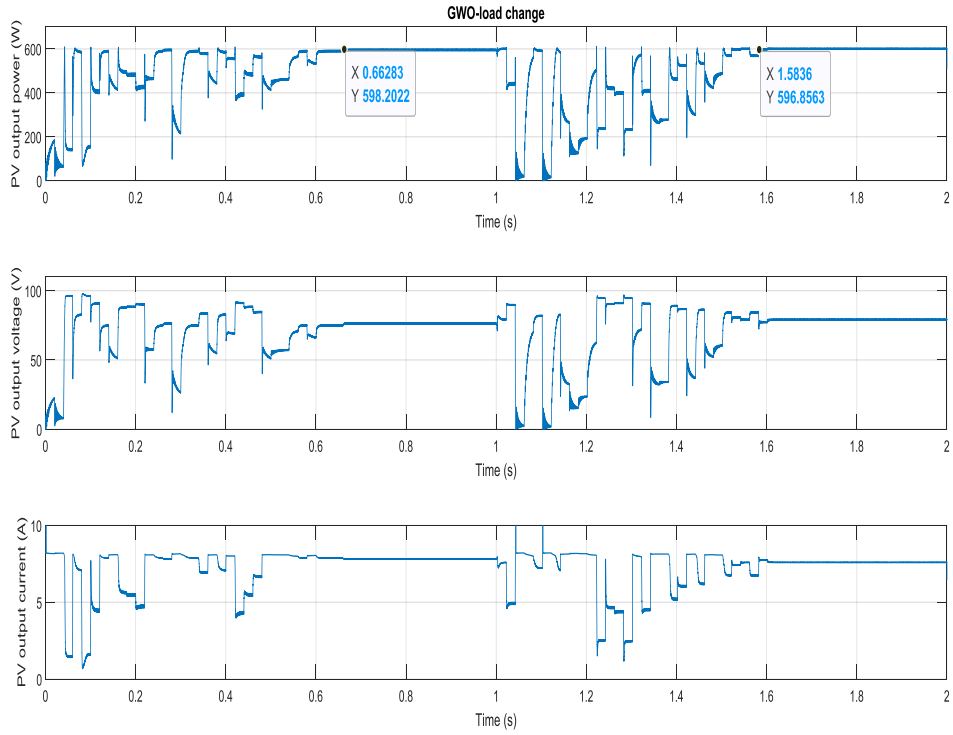


Fig 4.11 Algorithme GWO sous changement de la charge

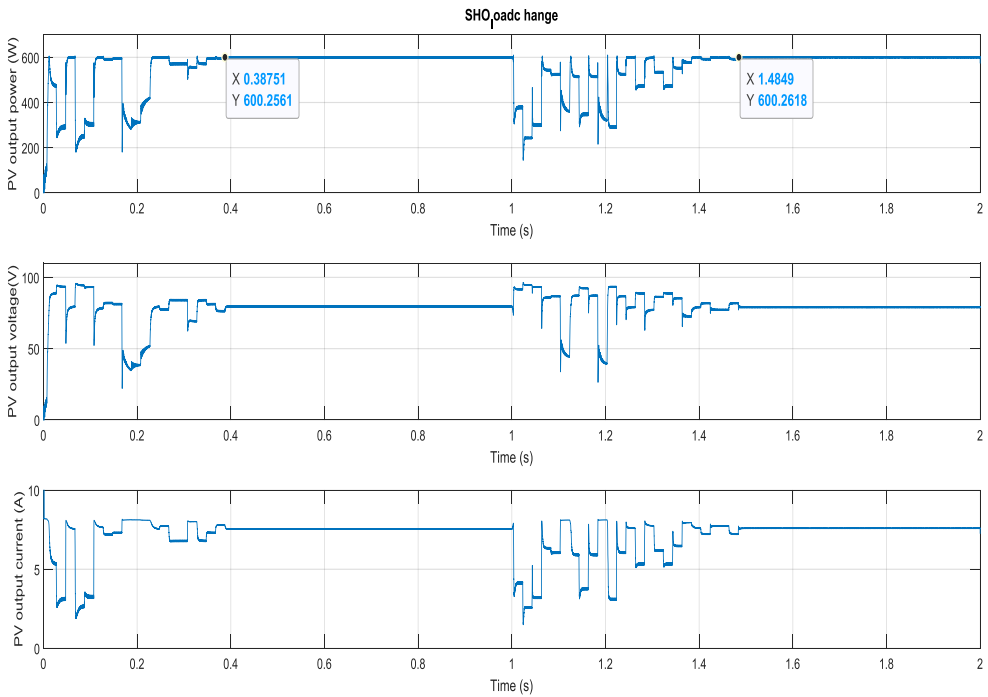


Fig 4.12 Algorithme SHO sous changement de la charge

Comme il est montré dans figure précédentes, et sous ces conditions de changement de charge, il est bien clair que la variation de la charge provoque une nouvelle recherche et la puissance revient à sa valeur maximale pour les deux algorithmes. Il est apparait aussi que l'algorithme SHO a rapproché à la valeur de la puissance maximale avant et après le changement de la charge (600.25W et 600.26 respectivement), alors que l'algorithme GWO prenait 598.2 et 596.8 respectivement.

D'après les figures précédentes, nous constatons aussi que, la SHO a pris environ 0.39 et 1.48 s, avant et après le changement de la charge respectivement; alors que la GWO a pris environ 0.66 et 1.58 s, avant et après le changement de la charge respectivement; par conséquent, l'algorithme SHO a convergé plus rapidement le l'algorithme GWO.

4-7 Variation de la température avec éclairage constante

Dans ce cas, on fait varier la température de 25c° à 35c° sur les trois modules come le montre la figure suivante (figure 4.13) tout en maintenant le niveau d'éclairage constant sur les trois panneaux (1000W/m²) ; et ça pour tester et examiner les performances et la précision de l'algorithme SHO, par rapport à l'algorithme GWO, lorsque la température change.

Dans ce cas, à l'instant (01 s) nous avons une nouvelle courbe qui implique un PPM (579.81 W) (figure 4.13).

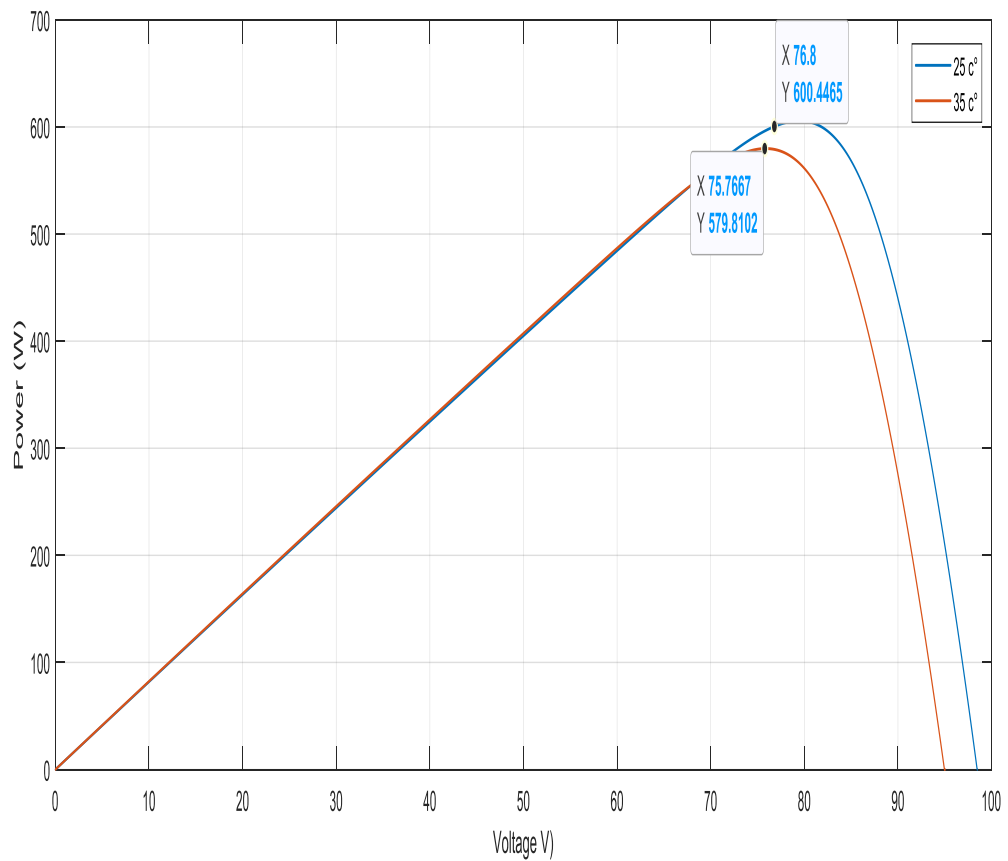


Fig 4.13 Influence de la température sur $P=f(V)$.

Les figures suivantes (figure 4.14 et figure 4.15) montrent la puissance, tension et courant des deux algorithmes GWO et SHO respectivement.

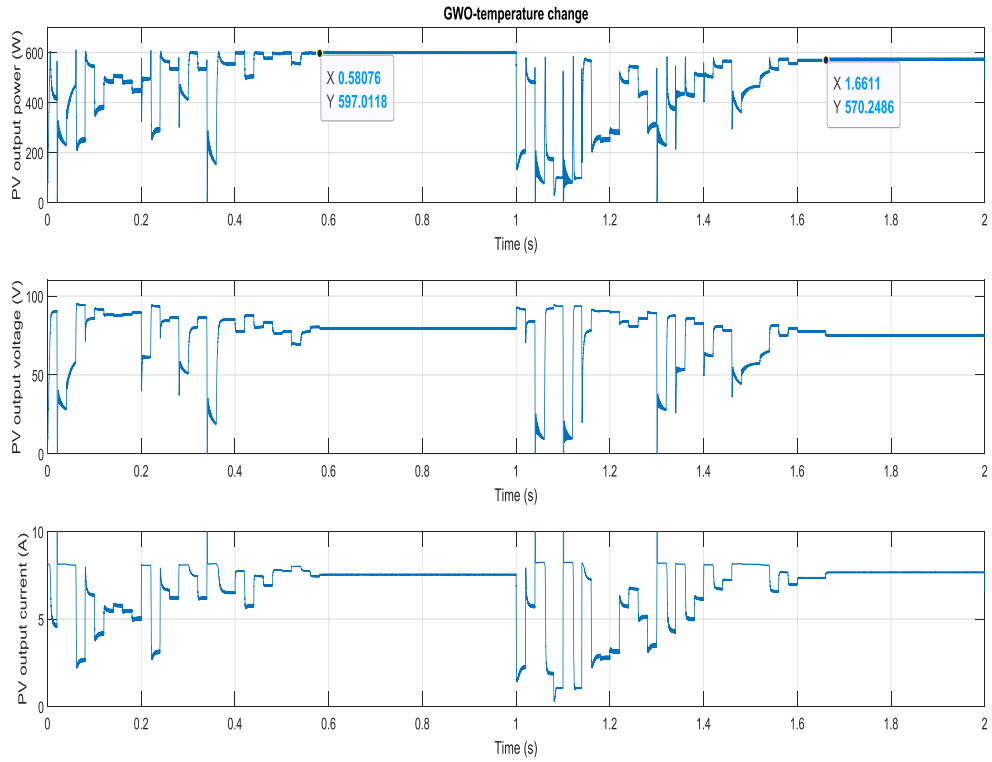


Fig 4.14 Algorithme GWO sous changement de la température

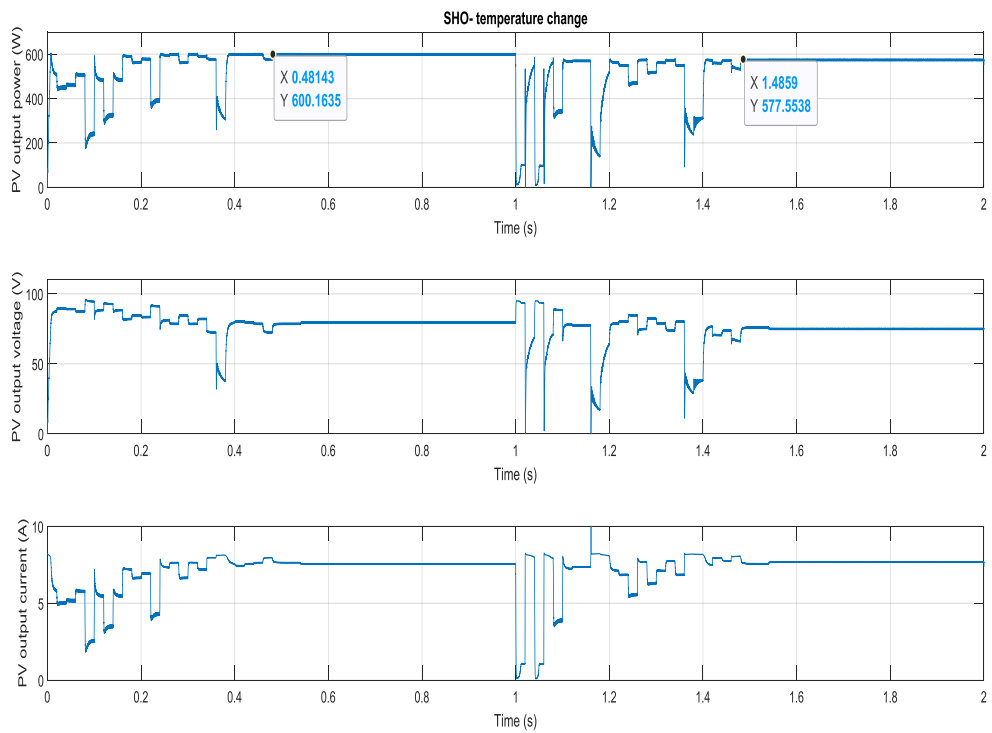


Fig 4.15 Algorithme SHO sous changement de la température

D'après les résultats obtenus, on constate que l'algorithme SHO a convergé vers le GPPM (579.8W, 1.48s), malgré la variation de la température, et prend une puissance (577.66W), alors que l'algorithme GWO a atteint (570.24W, 1.66s). Donc, l'algorithme SHO a des résultats meilleurs que l'algorithme GWO.

4-9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de simulation de la commande de GPV par trois algorithmes P&O, GWO et SHO en considérant plusieurs scénarios d'ombrage et changement de charge et de température. Les résultats obtenues révèlent la capacité de SHO, dans la condition de fonctionnement standards, d'ombrage partiel, de changement de charge et de température, l'algorithme P&O ne parvient pas toujours à se stabiliser au point de puissance maximal alors que les algorithmes SHO et GWO convergent toujours au GMPP pour les tous les cas étudiés.

Conclusion générale

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse a pour objectif principal le développement d'une nouvelle structure de commande basée sur la SHO appliquée à un système photovoltaïque autonome. Ce système est composé principalement d'un générateur PV, d'un étage d'adaptation qui est le convertisseur DC-DC de type Boost et d'une charge résistive. Les différentes études dans ce domaine ont montré la nécessité d'installer un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge pour augmenter le rendement et minimiser les pertes de transfère d'énergie. La puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que grâce à des lois de commande appropriées agissant directement sur le rapport cyclique.

Pour parvenir à cet objectif, nous avons proposé et développé une technique pour la recherche du point de puissance maximale permettant de tirer le maximum d'énergie de la source PV quelles que soient les variations des conditions climatiques (ensoleillement et température) et de la charge. Pour commencer nous avons présenté le principe de la conversion photovoltaïque, la modélisation, les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque PV ainsi que les différents types de systèmes PV. Une étude détaillée du principe de conversion d'énergie entre le GPV et la charge a montré la nécessité d'insérer un étage d'adaptation afin d'optimiser le transfert de puissance.

Par la suite, nous avons présenté et expliqué le principe de la technique de recherche du point de puissance maximale, ainsi que les techniques MPPT classiques et modernes les plus utilisées.

Les résultats de simulation obtenus sous l'environnement Matlab/Simulink par les techniques classiques, sous des conditions climatiques standards, ont conduit à des performances comparables. Cependant dans le cas de variation de l'éclairement, les techniques d'intelligence sont plus efficaces que la technique P&O. En ce qui concerne les commandes modernes, les résultats obtenus montrent d'une part, que la commande SHO est plus stable que la commande GWO.

Cet algorithme est validé, sous l'environnement Matlab/Simulink, par la simulation du fonctionnement du système avec des variations des conditions climatiques. Les résultats de simulation obtenus ont permis de valider l'approche proposée et ont mis en évidence la

robustesse de cette technique et sa capacité à éliminer les pertes de puissance par rapport les deux algorithmes PO et GWO.

Les résultats obtenus dans le cadre des travaux de thèse sont très encourageants et nous motivent pour continuer dans ce même axe de recherche.

En perspectives, nous nous proposons à court terme d'étendre le principe de la technique MPPT proposée à d'autres topologies de convertisseurs et de transposer la nouvelle MPPT développée au système.

A long terme, nous envisageons de combiner la SHO et les autres algorithmes pour avoir des meilleurs résultats

Bibliographie

- 1 H.ATTOUI, " Contribution à la synthèse de nouvelles stratégies de commande des systèmes d'énergie renouvelable". Thèse de Doctorat Sciences. UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF 1 algerie. 2017.
- 2 N.Aouchiche, " Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque.", Thèse présentée et soutenue à Belfort, le 28 Janvier 2020.
- 3 "KC200GT high photovoltaic module datasheet," kyocera 2011.
- 4 H.Yatimi and E. Aroudam, "Assessment and control of a photovoltaic energy storage system based on the robust sliding mode MPPT controller," Solar Energy, vol. 139, pp. 557–568, Dec. 2016, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.10.038>.
- 5 A. Ghelam, M. Boudiaf, and Y. Derouiche, "Correction of the Photovoltaic System Control by the Addition of a Voltage Regulator in the Electrical Conversion Chain," Majlesi Journal of Electrical Engineering, vol. 14, no. 3, pp. 45–52, Sep. 2020, <https://doi.org/10.29252/mjee.14.3.5>.
- 6 D. Nugraha, A. Lian, and K. Suwarno, "A Novel MPPT Method Based on Cuckoo Search Algorithm and Golden Section Search Algorithm for Partially Shaded PV System, " CANADIAN JOURNAL OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING, VOL. 42, NO. 3, SUMMER 2019 pages 173-1 <https://doi.org/10.1109/CJECE.2019.2914723>.
- 7 Kriti Jain, Manju Gupta, Aashish Kumar Bohre , " Implementation and Comparative Analysis of P&O and INC MPPT Method for PV System",978-1-5386-4996-1/18 2018 IEEE
- 8
- 9 KUMI EN. Technical and economic analysis of a 1mw grid-connected solar. Thesis Submitted to the School of Graduate Studies, KNUST. 2012.
- 10 Aouchiche N. Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art. Rev Des Energies Renouvelables, Vol 21, N°2, 247 - 265, 2018.

- 11 Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global Market Outlook For Solar Power / 2019 - 2023: Power FS. Mobilising Investments in Emerging Markets. Sol Power Eur 2019 2019.
- 12 Beauvais A, Chevillard N, Paredes MG, Heisz M, Rossi R, Schmela M. Global market outlook for solar power / 2018 - 2022: Connecting african and european developers and investors. Olar Power Eur 2018 2018.
- 13 Aouchiche N, Ait Cheikh MS, Becherif M, A EM, Hadjarab A. Fuzzy Logic Approach Based Mppt for the Dynamic Performance Improvement for PV Systems. Solar Power Europe; 2019. <https://doi.org/10.1109/ICEE-B.2017.8191986>.
- 14 Laagoubi T, Benchagra M. Fuzzy Logic Control of Grid Connected PV Systems 2017. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2017.8477326>
- 15 H. Rezka, A. Fathy and A. Abdelaziz, , “A comparison of different global MPPT techniques based on meta-heuristic algorithms for photovoltaic system subjected to partial shading conditions, ” Renewable and Sustainable Energy Reviews 74 (2017) 377–386 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.051>
- 16 Nations U. Protocole de Kyoto à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques 1998;61647:1–23.
- 17 Wang H, Xu F. Flexible global carbon pricing study: A new method to establish the international cooperation on reducing carbon emission. 10th Int Power Energy Conf IPEC 2012 2012:300–4. <https://doi.org/10.1109/ASSCC.2012.6523282>
- 18 Frack PF, Mercado PE, Sarriegui G, De Doncker RW. Renewable energy supply of refugee camps to decrease fuel consumption and CO2 emissions 2015;00:6 pp.<https://doi.org/10.1109/PEDG.2015.7223091>
- 19 Ziane A, Necaibia A, Mostfaoui M, Bouraiou A, Sahouane N, Dabou R. A Fuzzy Logic MPPT For Three-Phase Grid- Connected PV Inverter. 2018 Twent Int Middle East Power Syst Conf 2018:383–8. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2018.8635211>.
- 20 Anouar H M, Provashish R. A Modified Incremental Conductance Based Photovoltaic MPPT Charge Controller 2019. <https://doi.org/10.1109/ECACE.2019.8679308>.
- 21 Soufi Y, Bechouat M, Kahla S. Fuzzy-PSO controller design for maximum power point tracking in photovoltaic system. Int J Hydrogen Energy 2016:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.07.212>.

-
- 22 Hammons TJ. Europe: transmission system developments, interconnections, electricity exchanges, deregulation, and implementing technology in power generation with respect to the Kyoto protocol. 39th Int. Univ. Power Eng. Conf. 2004. UPEC 2004, IEEE; 2005, p. 1251–7. <https://doi.org/10.1109/PES.2004.1373048>.
- 23 A. Djalab, M. Rezaoui, L. Mazouz, , A. Teta and N. Sabri, , “Robust Method for Diagnosis and Detection of Faults in Photovoltaic Systems Using Artificial Neural Networks, ” *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*, <https://doi.org/10.3311/PPee.14828>
- 24 S.saad, “Enhancement of Solar Cell Modeling with MPPT Command Practice with an Electronic Edge Filter, ” *Engineering, Technology & Applied Science Research* Vol. 11, No. 4, 2021, 7501-7507 <https://doi.org/10.48084/etasr.1374>
- 25 Hamrouni N, Jraidi M, Dhouib A, Cherif A. Design of a command scheme for grid connected PV systems using classical controllers. *Electr Power Syst Res* 2017;143:503–12. <https://doi.org/10.1016/j.epr.2016.10.064>.
- 26 Lakshmi M, Hemamalini S. Decoupled control of grid connected photovoltaic system using fractional order controller. *Ain Shams Eng J* 2016. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2016.06.002>
- 27 Farhat M, Hussein M, Atallah AM. Enhancement Performance of a Three Phase Grid Connected Photovoltaic System Based on PI-Genetic Algorithm (PI-GA) Controller. 19th Int. Middle East Power Syst. Conf. (MEPCON)., IEEE; 2017, p. 19–21. <https://doi.org/10.1109/mepcon.2017.8301177>.
- 28 Dhar S, Dash PK. Sustainable Energy , Grids and Networks Adaptive backstepping sliding mode control of a grid interactive PV-VSC system with LCL filter. *Sustain Energy, Grids Networks* 2016;6:109–24. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2016.03.001>.
- 29 C. Cédric, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque". Thèse préparée au Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS. Université TOULOUSE III, 2008.*****
- 30 L. Peng, L. Yaoyu, and E. John, “Sequential ESC-Based Global MPPT Control for Photovoltaic Array With Variable Shading, ” ,IEEE TRANSACTIONS ON

- SUSTAINABLE ENERGY, VOL. 2, NO. 3, JULY 2011 IEEE pages 348-3
<https://doi.org/10.1109/TSTE.2011.2141692>.
- 31 S. Krishnamurthy, S. Dixit, R. Ram and N,," EL-PSO based MPPT for Solar PV under Partial Shaded Condition" P. Gavhane,. Rajasekar, Energy Procedia 117 (2017) 1047–1053<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.05.227>
- 32 Farhan Mahmoud,« Improving the Photovoltaic Model in Power Factory »Electric Power Systems Second Level, Stockholm, Sweden, Master Thesis, 2012.
- 33 S. Latreche, A. E. Badoud, and M. Khemliche, "Implementation of MPPT Algorithm and Supervision of Shading on Photovoltaic Module," Engineering, Technology & Applied Science Research, vol. 8, no. 6, pp. 3541–3544, Dec. 2018, <https://doi.org/10.48084/etasr.2354>.
- 34 Khalid Hamooda Matter, «A Thesis Submitted to the Faculty of Engineering in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering»The Islamic University of Gaza, Palestine, Master Thesis, June. 27, 2014.
- 35 Polycarp Ifeanyi Muoka,« Control of Power Electronic Interfaces for Photovoltaic Power Systems for Maximum Power Extraction» University of Tasmania Australia, Doctorat Thesis, 4 November, 2014
- 36 Sindhu Krishna Yarlagadda,« A MAXIMUM POWER POINT TRACKING TECHNIQUE FOR SINGLE-PHASE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS WITH REDUCED DCLINK CAPACITOR» the Faculty of the Department of Electrical and Computer Engineering University of Houston, Thesis Master of Science in Electrical Engineering, December 2012.
- 37 37 S B Pandya, H R. Jariwala ,," Renewable Energy Resources Integrated Multi-Objective Optimal Power Flow using Non-Dominated Sort Grey Wolf Optimizer," Journal of Green Engineering (JGE) Volume-10, Issue-1, January 2020.
- 38 38 M Hebchi, A Kouzou, A Choucha ,," Improved Perturb and Observe Algorithm for Maximum Power Point Tracking in a Photovoltaic System," ELECTROTEHNICĂ, ELECTRONICĂ, AUTOMATICĂ (EEA), 66 (2018), nr. 4.
- 39 David Sanz Morales,« Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications» Aalto University school of science and Technology, Master Thesis, 14/12/2010.

- 40 T.Esram, P L. Chapman,” Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”,IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 22, NO. 2, JUNE 2007
- 41 BELKAID ABDELHAKIM,« Conception et implémentation d’une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome» UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1,Thèse de Doctorat, 19/10/2015.*****
- 42 Altin N, Ozdemir S. Three-phase three-level grid interactive inverter with fuzzy logic based maximum power point tracking controller. *Energy Convers Manag* 2013;69:17–26.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.012>.
- 43 Tsang KM, Chan WL. Model based rapid maximum power point tracking for photovoltaic systems. *Energy Convers Manag* 2013;70:83–9.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.018>
- 44 Sakthigokulrajan C, Ravi K. Combined role of derived array configurations and MPSO based MPPT in improving the energy yield under partial shading conditions. *J Build Eng* 2017;9:125–34. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.12.006>.
- 45 Shi J, Zhang W, Zhang Y, Xue F, Yang T. MPPT for PV systems based on a dormant PSO algorithm. *Electr Power Syst Res* 2015;123:100–7.
<https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.02.001>.
- 46 Lyden S, Haque ME. Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;52:1504– 18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.172>.
- 47 Jangir P, Rajya R, Prasaran V, Limited N, Bhesdadiya R, Ladumor D, et al. A Multi-Objective Grey
- 48 Wolf Optimization Algorithm for Economic / Environmental dispatch 2016.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21536.79364>.
- 49 Mohamed AA, El-gaafary AAM, Mohamed YS, Hemeida AM. Multi-Objective Modified Grey Wolf Optimizer for Optimal Power Flow. 18th Int. Middle East Power Syst. Conf., 2016. <https://doi.org/10.1109/MEPCON.2016.7837016>.
- 50 Mirjalili S, Saremi S, Mirjalili SM, Coelho LDS. Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm for multi-criterion optimization. *Expert Syst Appl* 2016;47:106–19. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.10.039>.

-
- 51 Mirjalili S, Mirjalili SM, Lewis A. Grey Wolf Optimizer. *Adv Eng Softw* 2014;69:46–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- 52 M. Valan Rajkumar, M. Mahakumar, M. Manojkumar, M. Hemaraj, and E. Kumaravel, "A New DC-DC Converter Topology with Grey Wolf MPPT Algorithm for Photovoltaic System," *International Journal of Emerging Technologies in Engineering Research*, vol. 5, no. 4, pp. 54–59, Apr. 2017.
- 53 S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey Wolf Optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46–61, Mar. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>.
- 54 S. Mohanty, B. Subudhi, and P. K. Ray, "A New MPPT Design Using Grey Wolf Optimization Technique for Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 181–188, Jan. 2016, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2482120>.
- 55 G. Dhiman and A. Kaur, "Spotted Hyena Optimizer for Solving Engineering Design Problems," in *2017 International Conference on Machine Learning and Data Science (MLDS)*, Noida, 2017, pp. 114–119. <https://doi.org/10.1109/MLDS.2017.5>
- 56 G. Dhiman and V. Kumar, "Spotted hyena optimizer: A novel bio-inspired based metaheuristic technique for engineering applications," *Advances in Engineering Software*, vol. 114, pp. 48–70, Dec. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2017.05.014>
- 57 G. Dhiman and V. Kumar, "Spotted Hyena Optimizer for Solving Complex and Non-linear Constrained Engineering Problems," Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2019. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0761-4_81
- 58 S. hota, M. Sahu, and J. Malla, "A Standalone PV System with a Hybrid P&O MPPT Optimization Technique " *Engineering, Technology & Applied Science Research* Vol. 7, No. 6, 2017, 2109-2112 <https://doi.org/10.48084/etasr.4304>
- 59 R. Aghaie and M. Farshad, " Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Systems Based on Moth-Flame Optimization Considering Partial Shading Conditions," *joape* Vol. 7, No. 2, Oct. 2019, Pages: 176-18 <https://doi.org/10.22098/joape.2019.5360.1401>
- 60 J Shi, F Xue, Z Jian Qin, W Zhang, L T Ling, T Yang, " Improved Global Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic System via Cuckoo Search under Partial Shaded Conditions," *Journal of Power Electronics*, Vol. 16, No. 1, pp. 287-296, January 2016.

- 61 N. Aouchiche, M.S. Aitcheikh, M. Becherif, M.A. Ebrahim, " AI-based global MPPT for partial shaded grid connected PV plant via MFO approach," *Solar Energy* 171 (2018) 593–603.
- 62 R Abdul-Nabe, R Abdul –Nabi, S Al-waisawy, " A Grey Wolf Optimization Based MPPT Algorithm for Energy Harvesting PV System," *Journal of Green Engineering (JGE)* Volume-10, Issue-2, February 2020.
- 63 *J. Javidan*, " Energy Management Strategy of Stand-alone Photovoltaic System in Cathodic Protection Pipeline," *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* Vol. 4, No. 2, Dec. 2016, Pages: 143-152

Abstract

Partial shading is a common problem in photovoltaic (PV) systems, known for its difficulty. Numerous attempts have been conducted to mitigate this problem. Some of these efforts deploy metaheuristic optimization with a view to tracking the multiple-peak P–V curve in a partial shading PV system. Hence, this paper proposes a novel metaheuristic algorithm to track the maximum power point of PV systems using the Spotted Hyena Optimization (SHO) algorithm. When evaluated, the SHO algorithm proved to be very fast, robust, and accurate in standard conditions, Partial Shading Conditions (PSCs), and irradiance variations. Also, the results reveal a remarkable improvement in the performance when we compare the SHO algorithm with the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm and the Perturb and Observe (P&O) algorithm.

ملخص

التظليل الجزئي مشكلة شائعة في الأنظمة الكهروضوئية و المعروفة بصعوبتها. تم إجراء العديد من المحاولات للتخفيف من هذه المشكلة. نشرت بعض الجهود والأعمال بهدف تتبع منحنى الطاقة متعدد الذروة في نظام الكهروضوئي في حالة التظليل الجزئي. تقترح هذه الأطروحة خوارزمية جديدة لتتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة للأنظمة الكهروضوئية باستخدام القياسية و المرقطة أنها سريعة جدا وفي الظروف الضباب المرقطة حسب النتائج أثبتت خوارزمية الضباب خوارزمية أداء أحسن ملحوظ عندما قارنا خوارزمية الضباب الإشعاع. أيضا كشفت النتائج عن ظروف التظليل الجزئي و تغيرات المرقطة مع خوارزمية الذئب الرمادية و خوارزمية الاضطراب و الملاحظة.

Résumé

L'ombrage partiel est un problème courant dans les systèmes photovoltaïques (PV), connu pour sa difficulté. De nombreuses tentatives ont été menées pour atténuer ce problème. Certains de ces efforts déploient une optimisation méta-heuristique en vue de suivre la courbe P-V à pics multiples dans un système PV à ombrage partiel. Par conséquent, cette thèse propose un nouvel algorithme méta-heuristique pour suivre le point de puissance maximale des systèmes photovoltaïques à l'aide de l'algorithme Spotted Hyena Optimization (SHO). Une fois évalué, l'algorithme SHO s'est avéré très rapide, robuste et précis dans les conditions standard, les conditions d'ombrage partiel (PSC) et des variations d'éclairement. De plus, les résultats révèlent une amélioration remarquable les performances lorsque l'on compare l'algorithme SHO avec l'algorithme Grey Wolf Optimization (GWO) et l'algorithme Perturb and Observe (P&O).