



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie Electrique  
Electromécanique

Réf. : Entrez la référence du document

---

Présenté et soutenu par :  
DRISSI Abdeldjalil KHERCHOUCHE Samir

Le : lundi 27 juin 2022

Commande MPPT d'un système photovoltaïque par  
l'algorithme d'optimisation Meta-heuristique  
"Artificial Bee Colony" (ABC)

---

Jury :

M.	SALHI Ahmed	MCA	Université de Biskra	Président
M.	ROUINA Abdelhafid	MCA	Université de Biskra	Examineur
Mme.	TKOUTI Nacira	MCB	Université de Biskra	Rapporteur



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Génie électrique  
Electomécanique

Réf. : Entrez la référence du document

---

Commande MPPT d'un système photovoltaïque par l'algorithme  
d'optimisation Meta-heuristique "Artificial Bee Colony" (ABC)

Le : lundi 27 juin 2022

Présenté par :

DRISSI Abdeldjalil  
KHERCHOUCHE Samir

Avis favorable de l'encadreur :

TKOUTI NACIRA

Signature Avis favorable du Président du Jury

Cachet et signature

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail*

*A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection*

*A mon cher frère et mes chères sœurs, source de joie et de bonheur*

*A toute ma famille, source d'espoir et de motivation*

*A tous mes amis et mes enseignants*

*A vous cher lecteur*

# **Remerciements**

*D'abord, nous remercions Dieu, de nous avoir donné la force et la patience pour pouvoir mener ce travail à terme.*

*Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury*

*Monsieur SALHI Ahmed et Monsieur ROUINA ABDELHAFID pour l'honneur que vous avez fait d'accepter de juger et d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.*

*Mes remerciements les plus sincères s'adressent à Mm TKOUTI Nacira Maître de conférence à l'université de Biskra, pour avoir accepté de m'encadrer et auprès de laquelle j'ai trouvé un soutien constant.*

*Toujours prêt à m'écouter, me guider, m'orienter et me motiver par ces conseils. Il n'a pas cessé tout au long de ce travail de me faire profiter de son expérience enrichissante.*

*Qu'il me soit également permis de remercier tout le personnel de la faculté des sciences agronomiques de l'université de Biskra et toutes les personnes ayant collaboré de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

## **ملخص**

هذه المذكرة عبارة عن دراسة نظرية مقارنة نهتم بشيخ الطاقة الأعظمية للالواح الشمسية حيث نسينعمل نركز خوارزمية التحكم التي نعتمد على نظرية الرحل الذي اثبت كفاءتها في عدد النخصصات و كذا من الخنابارات الخاصة بالتحكم العمل منجز بطريقة الP&O و طريقة الرحل  
كلمات مفتاحية :  
نوع نظمة الطاقة الأعظمية الكهروضوئية ، خلية الرحل

## **Résumé:**

Cette mémoire est une étude technique comparative concernant le suivi de le point maximal de la puissance aux panneaux solaires, nous utilisons l'algorithme de contrôle basé sur la théorie des abeilles, qui a prouvé son efficacité dans plusieurs secteur et beaucoup tests de contrôle. On a utulisé la méthode P&O et méthode des colonie d'abeilles artificiel.

## **Mots clés :**

Photovoltaïque, commande MPPT, ABC, P&O.

## **Abstract :**

This memory is a technical and comparition study of controlling the maximum point of power in solar panels, we use the control algorithm based on the theory of bees, which has proven its effectiveness in several sectors and many control tests. We used the P&O method and the artificial bee colony method.

## **Key words :**

PV array, MPPT controler, ABC, P&O

## Sommaire :

### **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES**

<b>I.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
<b>I.2 LES ENERGIES SOLAIRES</b> .....	<b>2</b>
I.2.1 DEFINITION DE L'ENERGIE SOLAIRE.....	2
I.2.2 POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE.....	3
<b>I.3 L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	<b>4</b>
I.3.1 LE TERME « PHOTOVOLTAÏQUE » ET UN BREF HISTORIQUE.....	4
<b>I.4 LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES</b> .....	<b>6</b>
I.4.1 LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	6
I.4.2 L'EFFET PHOTOVOLTAÏQUE DANS LA CELLULE SOLAIRE.....	7
I.4.3 LES TYPES DE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES .....	8
<b>I.5 LES TYPES DE CELLULE SOLAIRE</b> .....	<b>10</b>
I.5.1 CELLULES SOLAIRES MONOCRISTALLINES .....	10
I.5.2 ASSOCIATION DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES .....	13
I.5.2.1 ASSOCIATION SERIE.....	14
I.5.2.2 ASSOCIATION PARALLELE.....	14
I.5.2.3 ASSOCIATION HYBRIDE (SERIE-PARALLELE).....	15
<b>I.6 MODULE PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	<b>16</b>
<b>I.7 ASSOCIATION DE MODULES PHOTOVOLTAÏQUES</b> .....	<b>17</b>
I.7.1 GROUPEMENT EN SERIE.....	17
I.7.2 GROUPEMENT EN PARALLELE.....	18
<b>I.8 LES HACHEURS</b> .....	<b>18</b>
I.8.1 HACHEUR BOOST.....	19
<b>I.9 LES ONDULEURS</b> .....	<b>20</b>
I.9.1 LES ONDULEURS TRIPHASES .....	20
I.9.2 TECHNOLOGIES DES ONDULEURS COUPLES AU RESEAU .....	21
I.9.3 COMMANDE DE L'ONDULEUR.....	21
I.9.4 COMMANDE MLI.....	21
<b>I.10 MODELISATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	<b>22</b>
<b>I.11 GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE</b> .....	<b>23</b>
I.11.1 L'ADAPTATION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE A LA CHARGE .....	23
<b>I.11 AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV</b> .....	<b>24</b>
I 11.1 AVANTAGES.....	24

I.11.2 INCONVENIENTS.....	24
<b>I.12 CONCLUSION</b> .....	<b>25</b>

## **CHAPITRE : II COMMANDE MPPT PAR COLONIE D'ABEILLES ARTIFICIELLES**

### **(ABC)**

<b>II.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>26</b>
<b>II.2 LA COMMANDE DU REGULATEUR MPPT</b> .....	<b>26</b>
II.2.1 TECHNIQUES DE RECHERCHE DE POINT DE PUISSANCE MAXIMAL MPPT .....	27
II.2.2 PRINCIPE DE LA RECHERCHE DU POINT DE PUISSANCE MAXIMAL .....	27
<b>II.3 CLASSIFICATION DES METHODES MPPT LES PLUS FREQUENTES</b> .....	<b>29</b>
II.3.1 LES METHODES CONVENTIONNELLES.....	29
<b>II.4 LA METHODE PERTURB AND OBSERVE (P&amp;O)</b> .....	<b>30</b>
II.4.1 PRINCIPE DES TECHNIQUES “PERTURB AND OBSERVE” (P&O) .....	30
II.4.2 ALGORITHME MPPT DE LA METHODE PERTURBE ET OBSERVE (P&O).....	32
<b>II.5 CLASSIFICATIONS DES PROBLEMES D’OPTIMISATION</b> .....	<b>32</b>
II.5.1 PROBLEME D’OPTIMISATION.....	33
II.5.2 OPTIMISATION DIFFICILE.....	34
<b>II.6 ALGORITHMES D’OPTIMISATION APPROCHEE</b> .....	<b>35</b>
II.6.1 HEURISTIQUES.....	35
II.6.2 METAHEURISTIQUES.....	35
<b>II.7 LA METHODE D’OPTIMISATION PAR COLONIE D’ABEILLES ARTIFICIELLES (ABC)</b> .....	<b>36</b>
II.7.1 ABEILLE DANS LA NATURE .....	36
II.7.2 LA COMMUNICATION CHEZ LES ABEILLES .....	37
II.7.3 PRINCIPE DE L’ALGORITHME ABC.....	38
II.7.4 INITIALISATION DE L’ALGORITHME .....	38
II.7.5 PSEUDO CODES DE L’ALGORITHME ABC.....	41
II.7.6 APPLICATION DE L’ALGORITHME ABC DANS LA COMMANDE MPPT .....	42
II.7.7 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L’ALGORITHME ABC .....	45
II.7.8 AVANTAGES.....	45
B) INCONVENIENTS.....	45
<b>II.8 CONCLUSION</b> .....	<b>46</b>

## **CHAPITRE III : SIMULATION ET INTERPRETATION DES RESULTAT**

<b>III.1 INTRODUCTION</b> .....	<b>47</b>
<b>III.2 SIMULATION DE SYSTEME PV EN FONCTIONNEMENT AUTONOME</b> .....	<b>47</b>

III.2.1	SIMULATION DU MODULE PV (1SOLTECH 1STH-245-WH)-----	47
III.2.2	CARACTERISTIQUE DU PANNEAU PV A ECLAIREMENT ET TEMPERATURE CONSTANTE-----	50
III.2.3	SIMULATION D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE SUR CONDITIONS METEOROLOGIQUES-----	51
<b>III.3</b>	<b>SIMULATION DU GENERATEUR (GPV) A ECLAIREMENT ET TEMPERATURE VARIABLE -----</b>	<b>51</b>
III.3.1	INFLUENCE DE L'ECLAIREMENT SUR GPV -----	52
III.3.2	INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR GPV -----	53
<b>III.4</b>	<b>SIMULATION DU SYSTEME PV AVEC LA METHODE (P&amp;O) -----</b>	<b>54</b>
III.4.1	SIMULATION DE LA COMMANDE MPPT NUMERIQUE (P&O) -----	55
III.4.2	SIMULATION DE LA HACHEUR BOOST.....	55
III.4.3	LES RESULTATS OBTENU.....	56
III.4.4	CAS DE VARIATION DES CONDITIONS CLIMATIQUES-----	57
<b>III.5</b>	<b>CONCLUSION-----</b>	<b>58</b>



## **List des figures :**

FIGURE I-1 IRRADIATION REÇUE SUR UN PLAN HORIZONTAL SUR LE TERRITOIRE ALGERIEN.....	4
FIGURE I-2 : PRESENTATION SCHEMATIQUE D'UNE CELLULE SOLAIRE .....	7
FIGURE I-3:COUPE TRANSVERSALE D'UNE CELLULE PV .....	7
FIGURE I-4: SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOMES.....	9
FIGURE I-5: SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU ELECTRIQUE.....	10
FIGURE I-6: CELLULES SOLAIRES MONOCRISTALLINES .....	11
FIGURE I-7: CELLULES SOLAIRES POLYCRISTALLINES .....	12
FIGURE I-8:CELLULES SOLAIRES AMORPHES.....	12
FIGURE I-9: LES CELLULES MULTI-JONCTIONS .....	13
FIGURE I-10: PRINCIPE DE LA CELLULE A MULTI-JONCTION.....	13
FIGURE I-11: CARACTERISTIQUE I-V D'UN ENSEMBLE DE CELLULES ASSOCIEES EN SERIE $N_s$ .....	14
FIGURE I-12: CARACTERISTIQUE I-V D'UN ENSEMBLE DE CELLULES ASSOCIEES EN PARALLELE $N_p$ .....	15
FIGURE I-13: CARACTERISTIQUES GLOBALES D'UNE INSTALLATION PV (SERIE/PARALLELE).....	16
FIGURE I-14: SCHEMA D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	16
FIGURE I-15: MODULE PHOTOVOLTAÏQUE .....	17
FIGURE I-16: CARACTERISTIQUES DU GROUPEMENT SERIE DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES .....	18
FIGURE I-17: CARACTERISTIQUES DU GROUPEMENT PARALLELE DES MODULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	18
FIGURE I-18: SYMBOLE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC.....	19
FIGURE I-19: SCHEMA ELECTRIQUE D'UN HACHEUR BOOST .....	20
FIGURE I-20: STRUCTURE D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASE .....	20
FIGURE I-21: PRINCIPE DE LA COMMANDE MLI .....	22
FIGURE II-22 : SCHEMA ELECTRIQUE EQUIVALENT D'UN GENERATEUR PV.....	23
FIGURE II-23: CHAINE ELEMENTAIRE DE CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE .....	28
FIGURE II-24: FLUCTUATION DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE .....	29
FIGURE II-25:POINTS DE FONCTIONNEMENT D'UN GPV EN FONCTION DE LA CHARGE .....	30
FIGURE II-26:CARACTERISTIQUE P(V) D'UN PANNEAU SOLAIRE.....	31
FIGURE II-27:ALGORITHME MPPT PERTURBATION AND OBSERVATION (P&O).....	32
FIGURE II-28: CLASSIFICATION DES PROBLEMES D'OPTIMISATION .....	33
FIGURE II-29 : CLASSIFICATION DES METHODES D'OPTIMISATION.....	34
FIGURE II-30 : ILLUSTRATION D'UNE ABEILLE EN «WAGGLE DANCE». ....	38
FIGURE II-31: ORGANIGRAMME DE LA METHODE ABC AVEC UN CONTROLE DIRECT DU SYSTEM PV.....	44
FIGURE III-32: MODELE MATLAB/SIMULINK D'UN SYSTEME PV AUTONOME .....	47
FIGURE III-33 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET ELECTRIQUES DU GENERATEUR PV .....	48
FIGURE III-34 : MODELE D'UN GENERATEUR PV .....	49

FIGURE III-35 : SIMULATION DU GPV AUTONOME.....	49
FIGURE III-36: CARACTERISTIQUE (COURANT-TENSION) DU PANNEAU PV. ....	50
FIGURE III-37: CARACTERISTIQUE (PUISSANCE-TENSION) DU PANNEAU PV. ....	50
FIGURE III-38: CARACTERISTIQUE (COURANT-TENSION) DU GPV .....	51
FIGURE III-39: CARACTERISTIQUE (PUISSANCE-TENSION) DU GPV. ....	51
FIGURE III-40: LE BLOC PV ARRAY .....	52
FIGURE III-41: INFLUENCE DE VARIATION DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE (I-V) .....	53
FIGURE III-42: INFLUENCE DE VARIATION DE L'ECLAIREMENT SUR LA CARACTERISTIQUE (P-V) .....	53
FIGURE III-43: : INFLUENCE DE VARIATION DE TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE (P-V) .....	54
FIGURE III-44: INFLUENCE DE VARIATION DE TEMPERATURE SUR LA CARACTERISTIQUE (I-V).....	54
FIGURE III-45 : MODELE DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	55
FIGURE III-46 : L'ILLUSTRE L'ARCHITECTURE ADOPTEE DU CONTROLEUR MPPT.....	55
FIGURE III-47 : MODELE MATLAB/SIMULINK D'UN HACHEUR BOOST .....	56
FIGURE III-48: LES COURBE DE PUISSANCE PAR OPTIMISATION P&O ET ABC .....	57
FIGURE III-49: LE CHANGEMENT DE L'ECLAIREMENT .....	58
FIGURE III-50 : LES RESULTATS OBTENUS DU P&O ET ABC A TRAVERS LA VARIATION DE DDDL'ECLAIREMENT .....	58

## **LIST DES TABLEAUX :**

TABLEAU I-1: POTENTIEL SOLAIRE EN ALGERIE.....	3
TABLEAU I-2: EVENEMENTS NOTABLES DANS L'HISTOIRE DU PHOTOVOLTAÏQUES.....	5
TABLEAU II-3 : PSEUDO CODE DE L'ALGORITHME ABC.....	41
TABLEAU III-4: CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET ELECTRIQUES DU GENERATEUR PV.....	48

*I. CHAPITRE I :*  
**Généralités sur les systèmes  
photovoltaïques**

# Introduction Générale

Dans le monde la consommation durant le siècle dernier a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre. En effet, la grande préoccupation du monde actuel est d'atténuer cette pollution par l'adaptation des sources d'énergie classiques à des critères très sévères et par l'utilisation des énergies renouvelables [21].

La caractéristique I-V du générateur photovoltaïque (GPV) dépend des facteurs climatiques (ensoleillement et température) ainsi que du vieillissement du système lui-même. On introduit un étage d'adaptation entre le GPV et la charge afin d'extraire en continu le maximum de puissance que le GPV peut générer.

Pour que le système PV fonctionne au point de puissance maximale MPP, une commande adéquate est exigée. Plusieurs techniques de poursuite du point de la puissance maximale (MPPT) ont été proposées dans la littérature, telles que la méthode de perturbation et observations et la méthode de l'incrémentation de conductance. De nombreuses études ont porté sur l'évaluation de l'impact des différents défauts sur la caractéristique statique  $P(v)$ . On va voir l'optimisation de MPPT d'un système photovoltaïques par l'algorithme d'optimisation Meta-heuristique "Artificial Bee Colony" (ABC).

Dans le premier chapitre on a défini et identifier les différentes structures qui contribuent à la production d'énergie solaire et ses bons et mauvais composants et aspects, principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques avec la charge.

Le deuxième chapitre présente la commande de l'MPPT par la méthode P&O et l'algorithme de optimisation colonie d'abeilles artificielles (ABC) et on a parlé généralement sur les problème d'optimisation et ces difficultés les algorithmes heuristiques et les métaheuristiques en effet, on était détailler l'algorithme (ABC) et définir sa structure ces paramètres concernant l'application sur le système photovoltaïque

Le troisième chapitre on a présenté la simulation d'un générateur photovoltaïque et voir ces caractéristiques de (P-V) et (V-I) de cet dernier et l'effet sur système photovoltaïque avec hacheur boost commandé avec MPPT par l'algorithme (ABC) et la méthode perturbe et observe (P&O).

## I.1 Introduction

Actuellement, la production de l'énergie domestique et dans l'industrie est basée, en grande partie, sur une ressource limitée: le pétrole et le gaz . Les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation. Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important [1].

## I.2 Les énergies solaires

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau[2]

Bien que notre pays soit excédentaire en production électrique aujourd'hui, l'avenir n'est donc pas prometteur sur les ressources en énergies fossiles dont les réserves ne cessent de diminuer et dont les prix fluctuent énormément en fonction de la conjoncture. La préparation de l'avenir dans les domaines de production énergétique doit se prévoir dès aujourd'hui, pour pouvoir faire face progressivement aux changements énergétiques inévitables. Chaque innovation et chaque avancée en matière de recherche n'aura de retombées que dans une dizaine d'année au mieux, le temps d'effectuer les tests nécessaires et d'envisager la mise en production sans risque pour l'utilisateur autant pour sa propre santé que pour ses installations électriques.

### I.2.1 Définition de l'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ [8400] fois la consommation énergétique. Cela

correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés:

- **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon[3]. Dans le cadre de ce chapitre nous nous intéressons de donner une vision générale sur le système photovoltaïque.

## I.2.2 Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m<sup>2</sup> est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m<sup>2</sup>/an au Nord et 2263 kWh/m<sup>2</sup>/an au sud du pays. Le tableau (I-1) résume le potentiel solaire en Algérie[4].

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

Tableau I-1: Potentiel solaire en algerié [5]

Une évaluation par satellite, effectuée par l'agence spatiale allemande, a montrée que l'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. Il est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque[4].

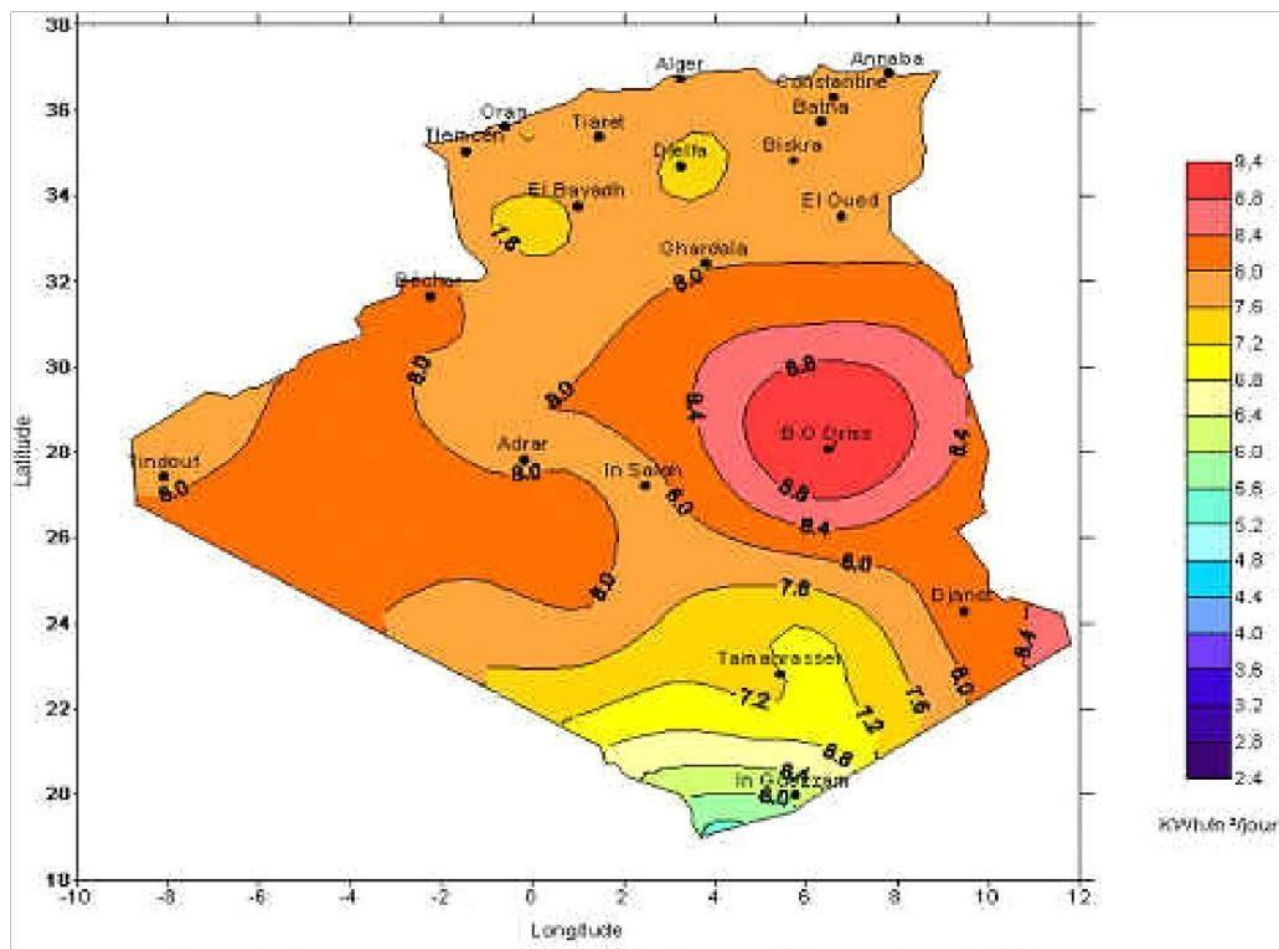


Figure I-1 Irradiation reçue sur un plan horizontal sur le territoire Algérien [5].

### I.3 L'énergie photovoltaïque

#### I.3.1 Le terme « photovoltaïque » et un bref historique :

Le terme « photovoltaïque » vient du grec « phos, photo » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. Une cellule photovoltaïque est donc une machine à produire de l'électricité sans mouvement circulaire, sans vapeur d'eau sous pression, sans turbine, sans refroidissement (sauf dans le cas des systèmes à concentration). Dès qu'elle est éclairée par de la lumière, elle se met à fonctionner. Le Tableau I-2 résume les événements importants de l'histoire du photovoltaïque[6]

1839	Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque
1883	Fritts réalise des cellules solaires de grande surface à base de Se



1954	Des rendements de 6% sont obtenus : Si (Bell Lab, USA) and Cu <sub>2</sub> S/CdS (Air Force, USA)
1955	Hoffman électroniques (USA) propose des cellules Si à 2 % de rendement à \$1500/W
1958	Kearns et Calvin ont démontré l'effet photovoltaïque d'une cellule à base de MgPh
1970	Première cellule solaire à hétérostructures GaAs élaborée par Alferov, Andree et al. en URSS
1973	Première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université Delaware, USA ; à base de Cu <sub>2</sub> S
1980	La première cellule à base de Cu <sub>2</sub> S/CdS délivrant un rendement > 10%
1982	Première unité de production de 1 MW (Californie, USA) avec des cellules Arco Si
1985	Les cellules à base de Si donnent un rendement > 20% sous le rayonnement solaire
1994	Des rendements > 30 % avec des cellules à concentration multijonctions à base de GaInP/GaAs (NREL, USA)
1996	Les cellules solaires hybrides à colorants atteignent un rendement de 11% (EPFL, Switzerland)
1998	Cellules couches minces Cu(InGa)Se <sub>2</sub> atteignent un rendement de 19% (NREL, US)
2002	Le photovoltaïque installé mondial cumulatif atteint 2000 MW
2007	Cellules solaires organiques en structure tandem avec un rendement de 6,5 % (UCSB, USA)
2008	Un rendement homologué de 5,9% sur une surface active de 2 cm <sup>2</sup> obtenu par Heliatek, BASF et l'Institut de photovoltaïque appliquée (IAPP) de l'Université technique de Dresde (Allemagne)
2009	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 6,1 % à base de PCDTBT et PC70BM (UCSB, USA)
	Cellule polymère simple jonction avec un rendement de 7,4 % à base de PBDTTT-CF et PC70BM (Solarmer Energy Inc., University of California, University of Chicago, USA)

Tableau I-2: Evénements notables dans l'histoire du photovoltaïques [6]

## I.4 Les systèmes photovoltaïques

### I.4.1 Les cellules photovoltaïques

Les cellules solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque ». La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne [7].

Car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète, et la plupart des applications sont en plein air. Mais certains préfèrent l'expression énergie lumière, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (ampoules, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule solaire.[8]

Dans la figure (I-2) un échantillon schématisé d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident. [9]

La jonction p-n de ces deux matériaux fonctionne comme une diode. Lorsque cette diode est exposée à des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à celle de l'énergie du matériaux à appeler l'énergie de bande gap ( $E_g$ ), le nombre d'électrons libres du semiconducteur de type-p et celui de trous du semi-conducteur de type-n augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à  $E_g$ , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.[7]

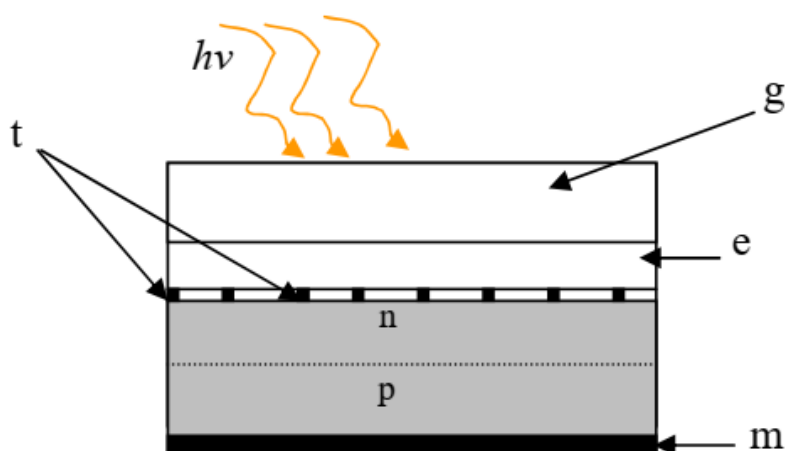


Figure I-2 : Présentation schématique d'une cellule solaire[7].

Dans une cellule PV, une large fraction de ces électrons et trous atteignent la jonction PN, et un champ électrique est créé. En conséquence, un courant électrique peut être établi en connectant les matériaux de type-n et type-p à un circuit extérieur. La direction de ce courant est l'opposé de celle de la cellule lorsqu'elle fonctionne en tant que diode, autrement dit, quand la diode est illuminée, un courant positif  $I$  traverse de n vers p.[7]

#### I.4.2 L'effet photovoltaïque dans la cellule solaire :

Le fonctionnement de la cellule PV est basé sur un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque. L'illustre la coupe d'une cellule PV sur la figure (I-3).

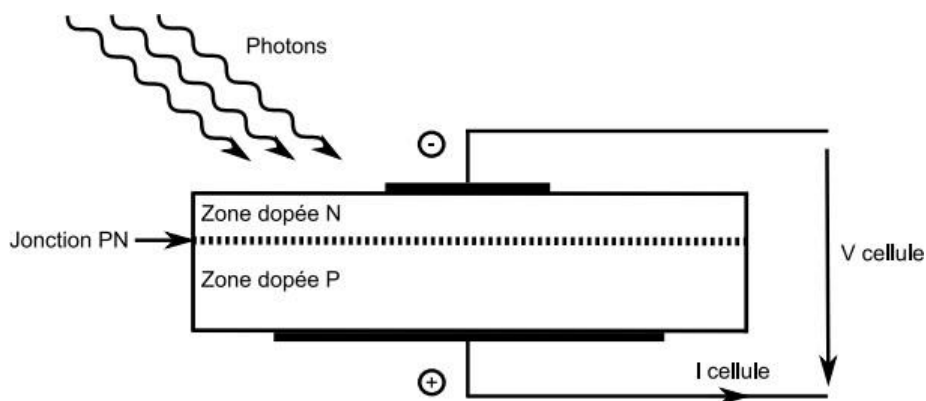


Figure I-3: Coupe transversale d'une cellule PV

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre.

Un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction PN a été formée[10].

### **I.4.3 Les Types de systèmes photovoltaïques :**

Il y a deux types dans les systèmes photovoltaïques :

#### **I.4.3.1 Systèmes photovoltaïque autonomes :**

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique.[11]

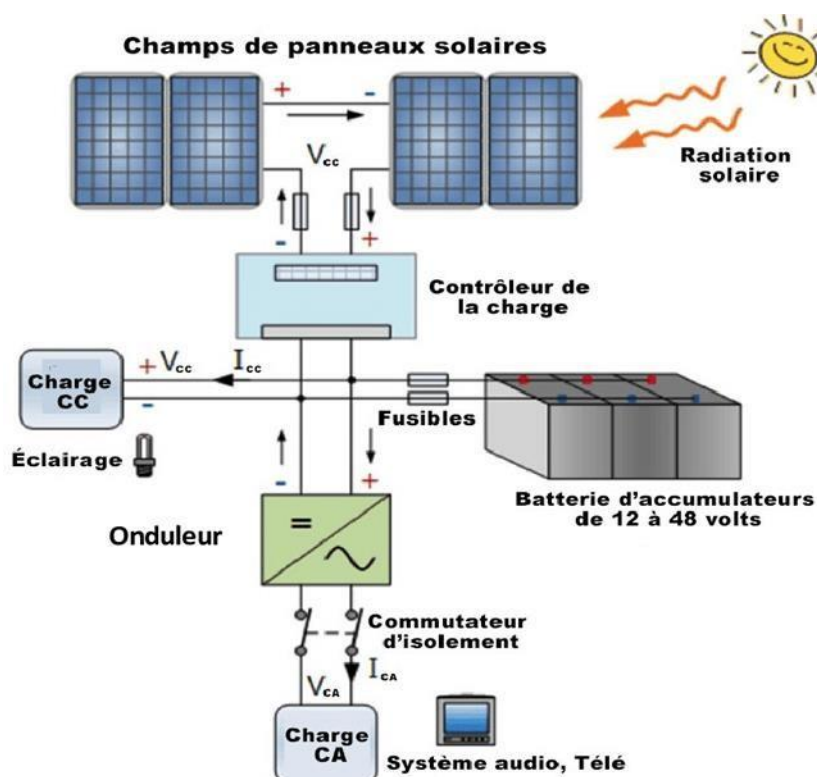


Figure I-4: Systèmes photovoltaïque autonomes[12]

### I.4.3.2 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Etant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil.[11]

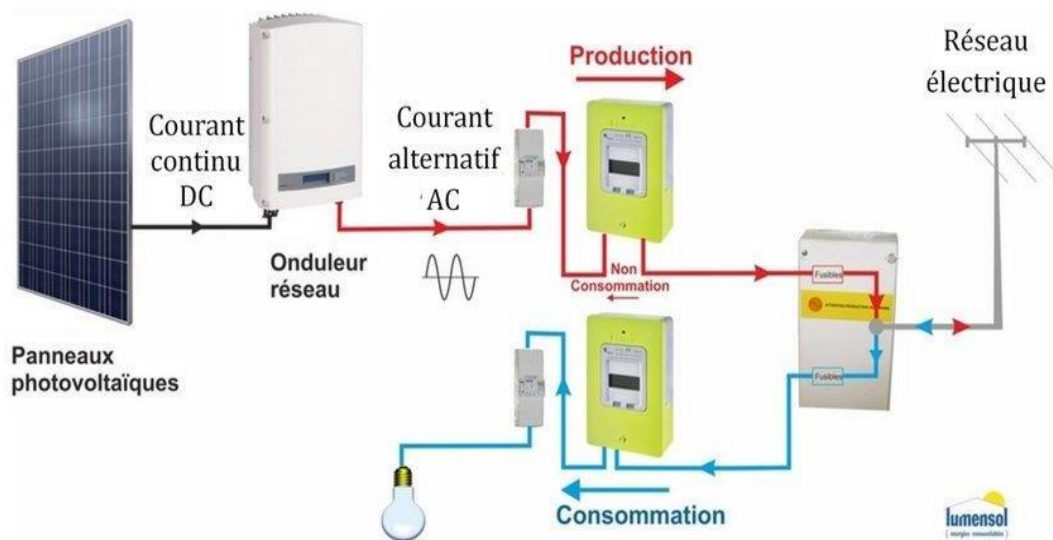


Figure I-5: Système photovoltaïque connecté au réseau électrique [12]

## I.5 Les types de cellule solaire

### I.5.1 Cellules solaires monocristallines :

Des blocs de silicium sont formés à partir de fonte de silicium ultra-pure. Dans un monocristal, le réseau cristallin complet est agencé de manière uniforme. Le bloc de silicium est découpé en rondelles de 200 à 300 mm d'épaisseur, appelées galettes (en anglais wafers). Pour permettre un usage optimal de la surface du module solaire, les cellules rondes sont découpées en éléments carrés. D'habitude, les cellules présentent une longueur d'arrêtée 152 mm La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion.

Possédant un rendement variant entre 15 et 18 %, les cellules monocristallines fabriquées industriellement sont les cellules ayant actuellement le rendement le plus élevé. Cependant, leur fabrication requiert plus d'énergie et de temps que celle des cellules polycristallines.

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

- Une durée d'amortissement de l'investissement en énergie élevée (jusqu'à 7 ans).[13]



Figure I-6: Cellules solaires monocristallines [14]

### I.5.2 Cellules solaires polycristallines :

Le matériau de base est du silicium ultra-pur qui est porté à fusion. Mais pour la fabrication de cellules solaires polycristallines, on ne cultive pas de monocristaux, mais la fonte de silicium est refroidie de façon contrôlée dans un moule carré.

Pendant le refroidissement, les cristaux s'orientent de manière irrégulière et forment la surface miroitante typique pour les cellules solaires polycristallines. Les blocs de silicium carrés sont découpés en galettes de 200 à 300 mm d'épaisseur. La fabrication est conclue par le dopage, l'application des surfaces de contact et de la couche anti réflexion. La couche anti-réflexion offre à la cellule solaire sa surface bleue typique, car le bleu réfléchit le moins de lumière et en absorbe la plus grosse quantité. Les cellules solaires polycristallines présentent un rendement entre 13 et 16 %.

Les cellules polycristallines sont caractérisées par :

- Coût de production moins élevée.
- Nécessite moins d'énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.[13]

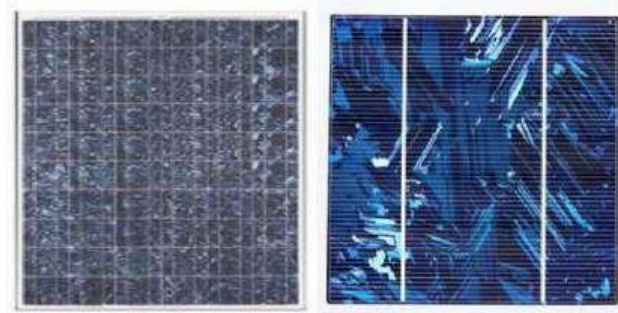


Figure I-7: Cellules solaires polycristallines [14]

### I.5.3 Cellules solaires amorphes :

Le terme amorphe vient du grec (a : sans, morphe : forme) et signifie qui n'a pas de forme. En physique, on appelle amorphes les éléments dont les atomes présentent des formes irrégulières. Si les atomes ont une structure ordonnée, on les appelle des cristaux.

Pour la fabrication de cellules solaires amorphes, on applique le silicium sur un matériau support, comme par exemple le verre. L'épaisseur du silicium s'élève alors à environ 0,5 à 2W/m. Ainsi, non seulement la quantité de silicium requise est-elle assez faible, mais le découpage fastidieux des blocs de silicium n'est-il pas nécessaire. Le degré de rendement des cellules solaires amorphes se situe seulement à 6-8 % [13]



Figure I-8: Cellules solaires amorphes [14]

### I.5.4 Les cellules multi-jonctions à haut rendement :

Aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques inorganiques sont constituées d'une simple jonction PN. Dans cette jonction, seuls les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la bande interdite du matériau (notée  $E_g$  en eV) sont capables de créer des paires électron-trou. En



d'autres termes, la réponse photovoltaïque d'une cellule simple jonction est limitée à l'énergie du photon. Seule la proportion du spectre solaire dont l'énergie des photons est supérieure au gap d'absorption du matériau est utile, l'énergie des photons plus faible n'est donc pas utilisable.

D'autre part, même si l'énergie des photons est suffisante, la probabilité de rencontrer un électron est faible. Ainsi, la plupart des photons traversent le matériau sans avoir transféré leur énergie. Une première réponse pour limiter les pertes est connue de longue date du point de vue technologique, il suffit d'utiliser des systèmes à plusieurs niveaux, en empilant des jonctions possédant des gaps décroissants, Figure (I-9). Ainsi il est possible d'exploiter le spectre solaire dans sa quasi-totalité avec des rendements de conversion très importants.[13]



Figure I-9: Les cellules multi-jonctions [15]

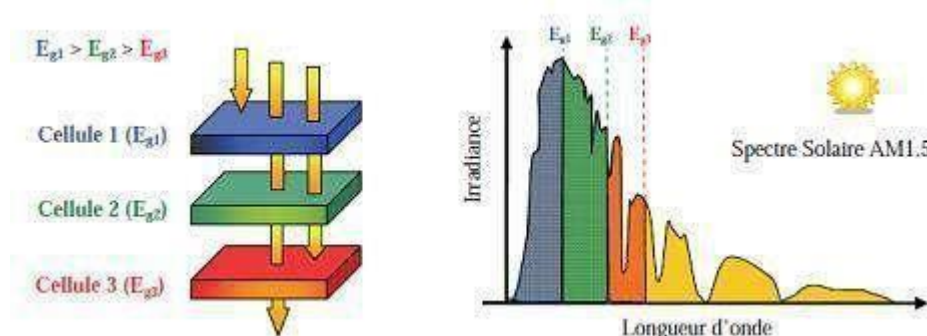


Figure I-10: Principe de la cellule à multi-jonction [13]

Il existe d'autres types de technologies photovoltaïques actuellement commercialisées ou encore à l'étude[13]

## I.5.2 Association des cellules photovoltaïques : [16]

Dans les conditions d'ensoleillement standard ( $1000 \text{ W/m}^2$  ;  $25^\circ\text{C}$  ; AM 1,5), une cellule solaire PV ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une

tension de 0,5 à 1,5 Volts selon les technologies une cellule solaire PV ne produit qu'une très faible puissance électrique. Pour générer plus de puissance, les cellules solaires sont généralement assemblées en série, puis encapsulées sous verre pour former un module PV. Les modules sont connectés en série et/ou en parallèle pour former un panneau. Lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site, on obtient un champ photovoltaïque.[17]

**I.5.2.1 Association série :**

Dans un groupement en série de **ns** cellules d'un panneau ou module PV, les cellules sont traversées par un même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules, l'équation (I-1) et (I-2) résume les caractéristiques électriques d'une association série de **ns** cellules et on obtient la courbe I-V ces-dessous :

$$V_{co} = ns.V_{co} \dots\dots\dots (I-1)$$

$$I_{cc} = I_{cc}ns \dots\dots\dots (I-2)$$

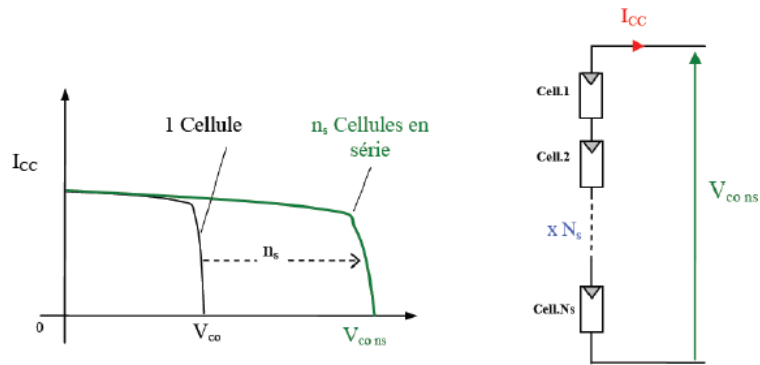


Figure I-11: Caractéristique I-V d'un ensemble de cellules associées en série ns. [12]

**I.5.2.2 Association parallèle :**

Lorsque en réalise Une association parallèle de **np** cellules il est possible d'accroître le courant de sortie du générateur PV. Dans ce groupement de cellules identiques connectées en parallèle, en aura la même tension dans chaque cellule, l'équation (I-3) et (I-4) résume les caractéristiques électriques d'une association en parallèle de **np** cellules et en obtient La courbe I-V ces-dessous :

$$I_{cc} = n_p * I_{cc} \dots \dots \dots (I-3)$$

$$V_{oc} = V_{ocn_p} \dots \dots \dots (I-4)$$

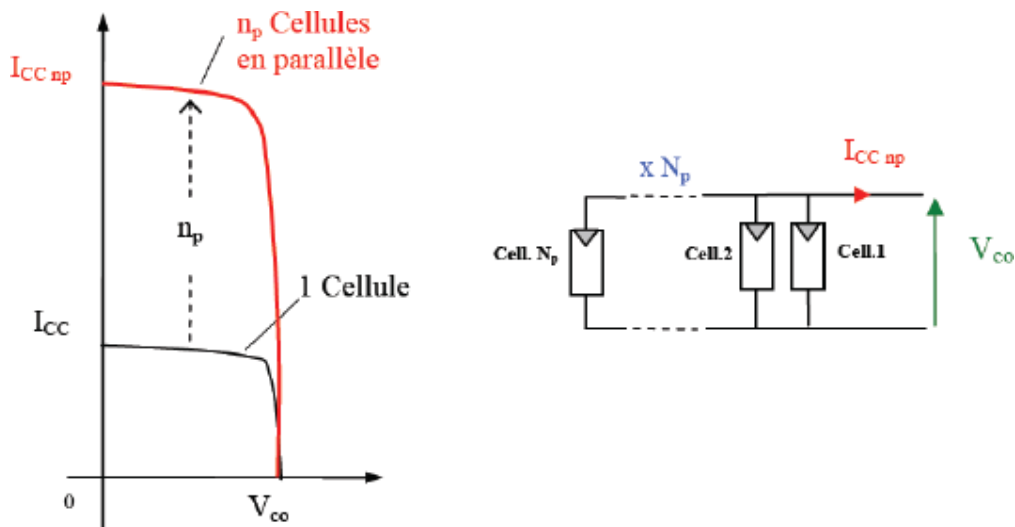


Figure I-12: Caractéristique I-V d'un ensemble de cellules associées en parallèle  $n_p$  [12]

**I.5.2.3 Association hybride (série-parallèle) :**

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des  $n_s \times n_p$  sont donnés par les relations suivantes :

$$I_{cc} = n_p \times I_{cc} \dots \dots \dots (I-5)$$

$$V_{oc} = n_s \times V_{oc} \dots \dots \dots (I-6)$$

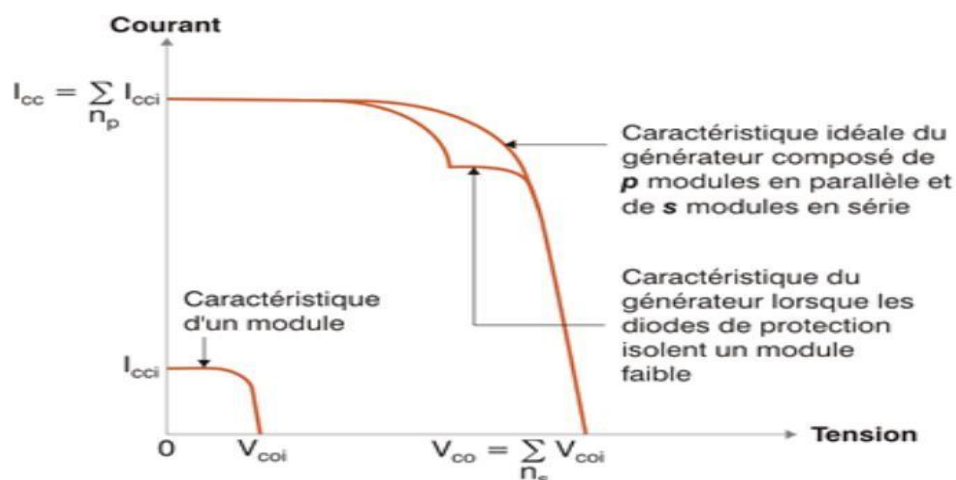


Figure I-13: Caractéristiques globales d’une installation PV (série/parallèle) [12]

### I.6 Module photovoltaïque

Au sein d’un module PV les cellules interconnectées sont rassemblées en bloc de x cellules et un module PV est constitué de la mise en série de a blocs et de b blocs en parallèle.

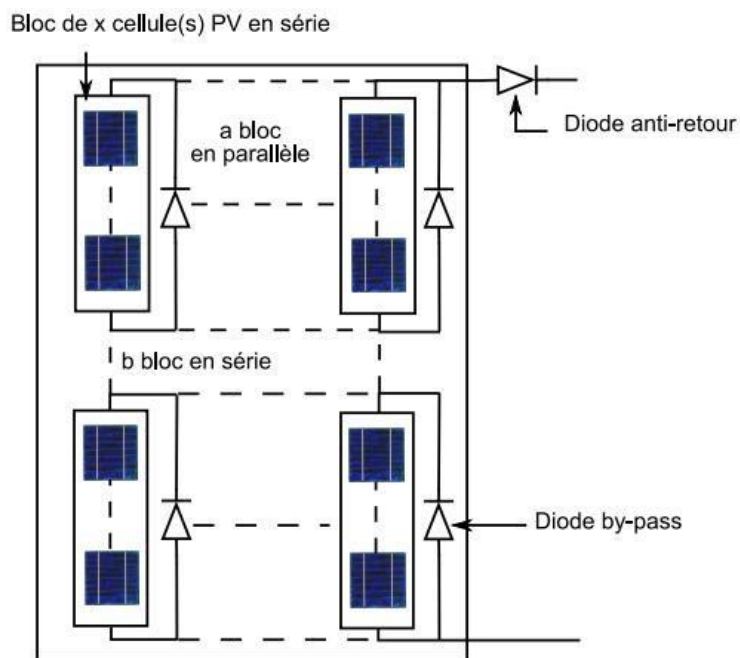


Figure I-14: Schéma d’un module photovoltaïque [22]

La conception d'un module PV repose encore aujourd'hui sur des raisons historiques. A l'origine, l'énergie solaire était réservée aux applications en sites isolés. La tension de fonctionnement de ces installations était donc imposée par la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie. Ces systèmes fonctionnant avec des batteries au plomb, leurs tensions étaient de 12V, 24V ou 48V. Cette raison historique explique que la quasi-totalité des modules existants aujourd'hui aient encore une tension de sortie de 12 ou 24V.

Les modules étant conçus pour pouvoir fonctionner sur ces systèmes, ils ne sont en réalité qu'une mise en série de cellules pour obtenir la tension désirée, 36 cellules pour 12V ( $b=2$ ) et 72 cellules pour 24V ( $b=4$ ). Aujourd'hui, très peu d'études remettent ou ont remis en cause cette conception historique qui se retrouve non optimisée pour le fonctionnement connecté au réseau.

La conception d'un module photovoltaïque impose de s'assurer que les composants de ce dernier ne risquent pas d'être détruit au cours d'un fonctionnement dans les quadrants 2 et 4. Dans ces zones les cellules PV fonctionnent en récepteurs et des risques de destruction existent. Pour se protéger de ces risques deux types de protection sont mis en place dans les installations photovoltaïques : la diode by-pass et la sécurité contrecourant.[22]



Figure I-15: Module photovoltaïque [3]

## I.7 Association de modules photovoltaïques : [23]

### I.7.1 Groupement en série :

Dans un groupement de  $n_s$  modules en série tous sont traversés par un même courant, la Figure ci-dessous montre la caractéristique résultante ( $I_{sc}$ ,  $V_{sco}$ ) d'un tel groupement dans des conditions idéales, obtenue pour  $n_s$  module identiques ( $I_{cc}$ ,  $V_{co}$ ) en sommant les caractéristiques élémentaires à courant constant :  $V_{sco} = n_s * V_{co}$ .

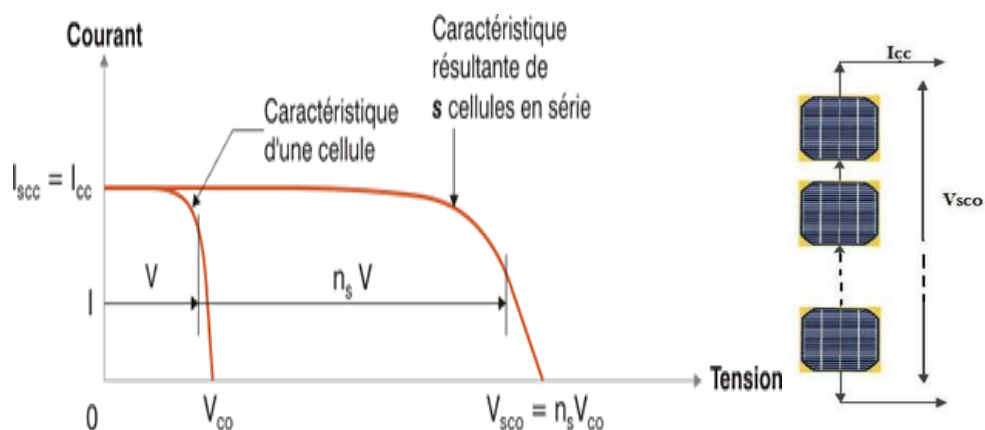


Figure I-16: Caractéristiques du groupement série des modules photovoltaïques

### I.7.2 Groupement en parallèle :

Dans un groupement en parallèle figure (I-21), les modules étant soumis à la même tension, les intensités s'additionnent : la caractéristique résultante est obtenue par addition de courants à tension donnée.

$I_{pcc} = n_p I_{cc}$  : le courant de court-circuit

$V_{pco} = V_{co}$  : la tension de circuit ouvert

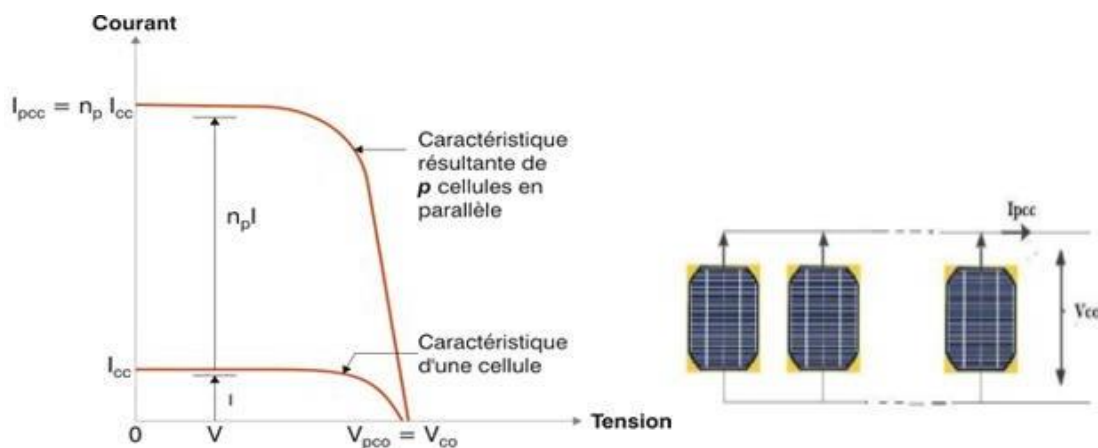


Figure I-17: Caractéristiques du groupement parallèle des modules photovoltaïques

### I.8 Les Hacheurs :

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans

des batteries, ou pour alimenter une charge continue. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a des bons rendements dans les hacheurs. Les hacheurs sont des convertisseurs continu qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation[18]

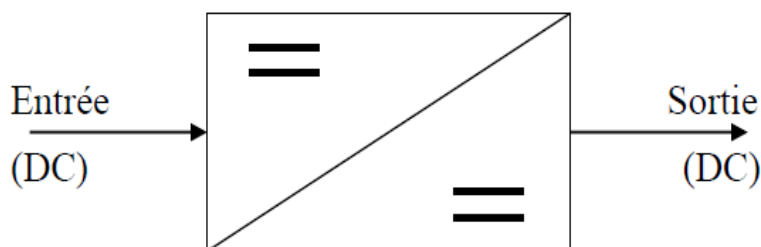


Figure I-18: Symbole d'un convertisseur DC-DC

Cela conduit à L'étude des convertisseurs DC-DC les plus simples qui puissent être. Dans ce cadre, on distingue deux familles de convertisseurs statiques (ou hacheurs).

- hacheur abaisseur (ou Buck).
- hacheur élévateur (ou boost).

### I.8.1 Hacheur Boost :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Connu aussi sous le nom de « booste » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la Figure (I-19). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sorti supérieure.

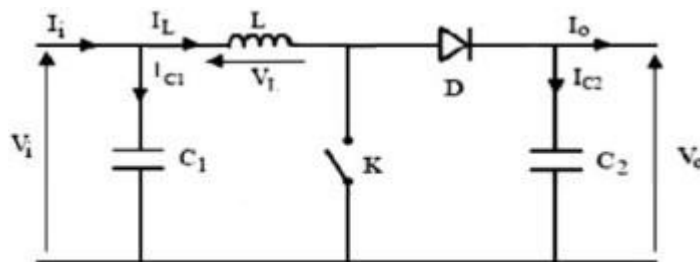


Figure I-19: Schéma électrique d'un hacheur boost

## I.9 Les onduleurs :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande[19].

### I.9.1 les onduleurs triphasés :

Le schéma simplifié d'un onduleur triphasé à deux niveaux est montré dans la figure (I-20).

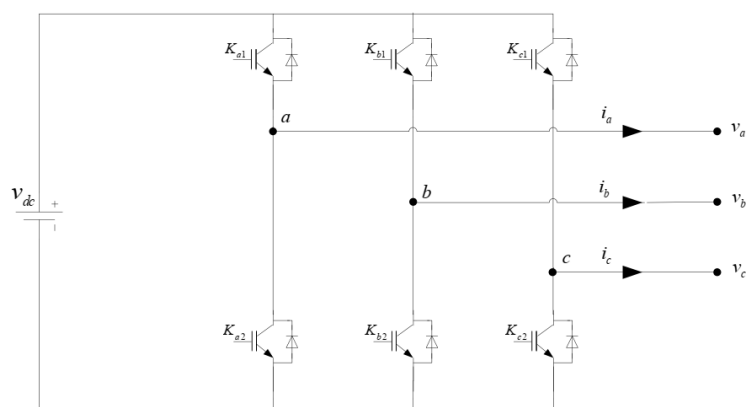


Figure I-20: Structure d'un onduleur de tension triphasé

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.



L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique.

Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau.[20]

## **I.9.2 Technologies des onduleurs couplés au réseau :**

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau.

L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique.

Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [20].

## **I.9.3 Commande de l'onduleur : [21]**

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension créée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commande peuvent être utilisées:

- Commande par hystérésis.
- Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

## **I.9.4 Commande MLI :**

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion (MLI) ou Pulse Width Modulation (PWM) permet d'éliminer les premiers rangs d'harmoniques de courant afin d'améliorer le facteur de puissance. Cependant, cette technique ne résout pas totalement le problème des harmoniques de courant.

La modulation MLI est fortement inspirée des techniques utilisées dans la transmission de l'information.

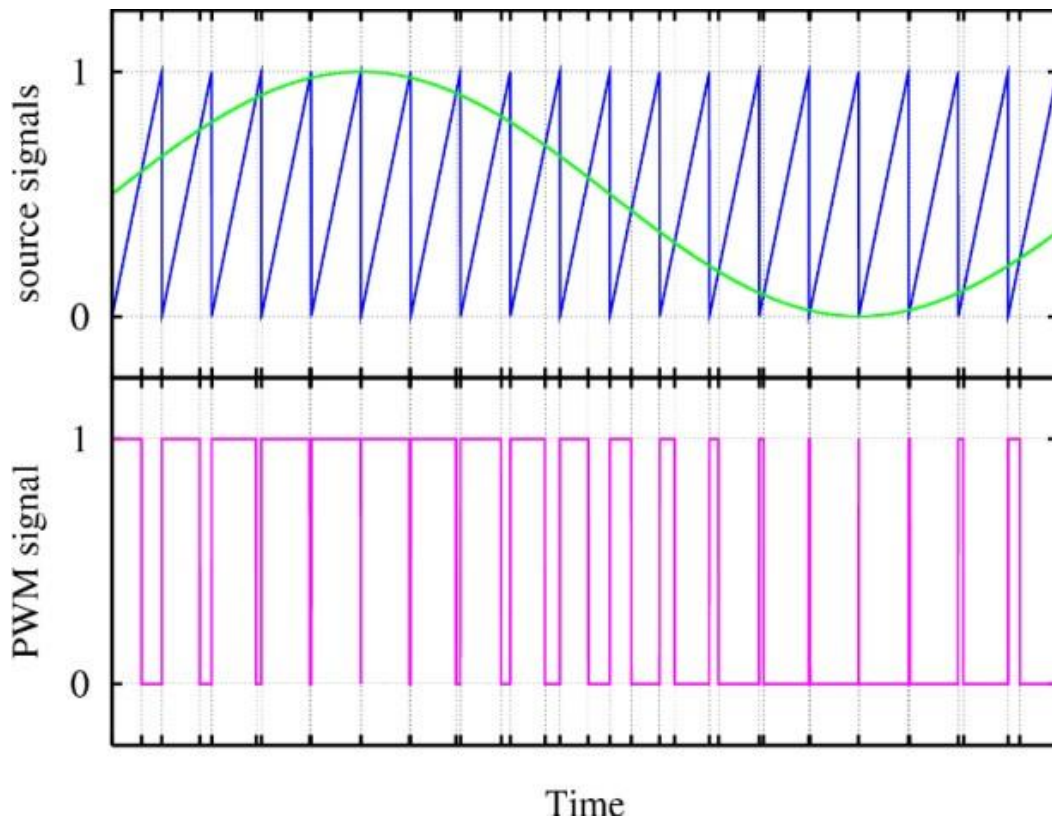


Figure I-21: Principe de la Commande MLI

**I.10 Modélisation d’un générateur photovoltaïque :**

Le générateur est un ensemble des modules PV sont habituellement branchés en série-parallel pour augmenter la tension et l’intensité du courant à la sortie du générateur. Ces derniers sont interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.

L’expression du courant total d’un GPV peut s’exprimer par [27] :

$$I_{pvG} = N_p \cdot [I_{ph} - I_s \exp\left(\frac{V_{pvG} + R_s \cdot I_{pvG}}{N_s}\right) - \frac{V_{pvG} + R_s \cdot I_{pvG}}{R_{sh}}] \dots\dots\dots (I-6)$$

Et le schéma de modèle d’un GPV donné par la figure (I-22) :

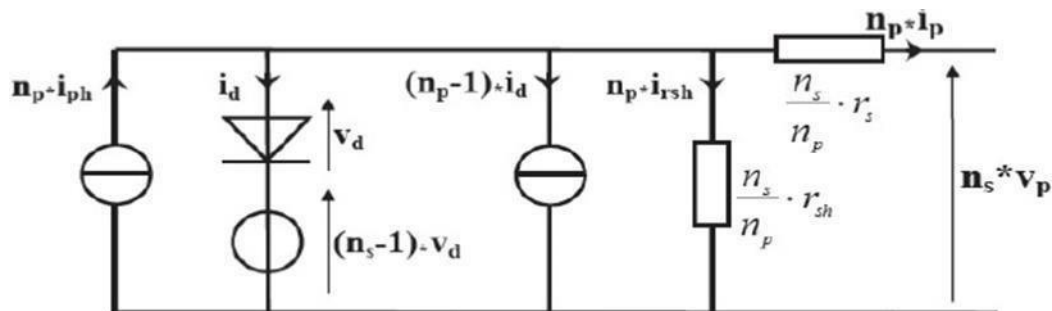


Figure II-22 : Schéma électrique équivalent d'un générateur PV

## I.11 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installations :

- non autonomes ou « grid connected » i.e. rattachées au réseau de distribution électrique.

Dans Les systèmes reliés au réseaux, les consommateurs standard de puissance AC sont connectés au générateur via un onduleur (convertisseur DC/AC ) parfois bidirectionnel (redresseur/onduleur).

Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau publique et les demandes de puissance qui existent la capacité de production du générateur sont attachées sur le réseau.

- Autonomes ou « stand-alone », qui sont le propose de cette étude, ces installations isolées ne sont pas connectées au réseau, mais elles doivent assurer la couverture de la demande de la charge en tout temps. La puissance à la sortie du générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de charge, aussi l'autonomie du système est-elle assurée par un système de stockage d'énergie. En général ces installations comprennent quatre éléments.[7]

### I.11.1 L'adaptation d'un générateur photovoltaïque à la charge :

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En fait, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie[24].

## I.11 Avantages et inconvénients d'une installation PV : [25]

### I11.1 Avantages

- d'abord, une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

- ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milli-Watt au Méga-Watt.

- le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

### I11.2 Inconvénients

- la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.

- le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

- tributaire des conditions météorologiques.

- lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

- le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

## **I.12 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et d'un panneau photovoltaïque, ainsi que les caractéristiques du générateur PV, Nous avons également étudié, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques, ce qu'il est nécessaire d'utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et de la constitution d'un système photovoltaïque connecté au réseau, Ce qui permet d'introduire à la modélisation et l'analyse de notre système.

***II. Chapitre : II***  
***Commande MPPT par***  
***colonie d'abeilles artificielles***  
***(ABC)***

## **II.1 Introduction :**

L'énergie photovoltaïque est une source intéressante, elle est renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée sur une large plage d'applications il faut assurer les meilleures conditions atmosphériques (ensoleillement et température). La puissance maximale du GPV correspond à un seul point de fonctionnement appelé point de puissance maximale (PPM). Ce point dépend principalement de l'ensoleillement, de la température et des variations de la charge à alimenter. Cependant en cas d'ombrage ou un changement au niveau de la charge, la puissance de sortie du système diminue de manière significative.[16]

Pour que le GPV fournisse sa puissance maximale et fonctionne à un rendement élevé la technologie de l'électronique de puissance offre une meilleure solution qui consiste à adapter le système PV avec les conditions extérieures pour avoir toujours un point de fonctionnement optimal. Pour cela nous utilisons la commande MPPT qui vise à extraire la puissance maximale que le GPV peut fournir quel que soit les conditions atmosphériques, et quel que soit la valeur de la charge à alimenter. Il existe plusieurs méthodes MPPT qui sont capables de faire cette opération, et elles diffèrent selon la complexité, l'efficacité et la vitesse de convergence[16].

Dans ce chapitre, nous allons discuter le principe de la commande MPPT, les différents éléments d'une commande MPPT, aussi nous allons présenter quelles méthodes MPPT conventionnelles telles que la méthode de perturbation et observation (P&O). Ensuite nous allons discuter la méthode MPPT basée sur l'algorithme ABC qui est le but de ce travail. Cette méthode est une technique moderne qui a prouvé leur performance en ce qui concerne la recherche du PPM [16].

## **II.2 La commande du régulateur MPPT :**

Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30%: pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [12].

Les cellules PV utilisent pour fournir de l'énergie dans le but d'obtenir la puissance maximale du panneau.

Un serveur MPPT est utilisé pour la commande du hacheur. Cette technique a été développée depuis 1968 et il a eu un rôle essentiel pour le fonctionnement du panneau.

Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique  $D$  automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau, ainsi quels que soient les conditions météorologiques  $T$  et  $G$ , la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum ( $V_{mpp}$ ,  $I_{mpp}$ ) [12].

### **II.2.1 Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT :**

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques.

la charge peut être alimentée à partir d'un panneau PV en utilisant MPPT, avec un contrôleur spécifique, pour suivre la puissance maximale générée par le panneau.

Ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches Aussi plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées [26].

- Méthode de perturbation et observation (PO).
- Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- Méthode de logique floue (FL).
- Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).

on va parler sur la méthode perturbation et observation (PO) (ABC) dans ce chapitre.

### **II.2.2 Principe de la recherche du point de puissance maximal :**

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques (sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont n'été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement). Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance [27].



Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (P<sub>MAX</sub>) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge. La figure (II-23) représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT [28].

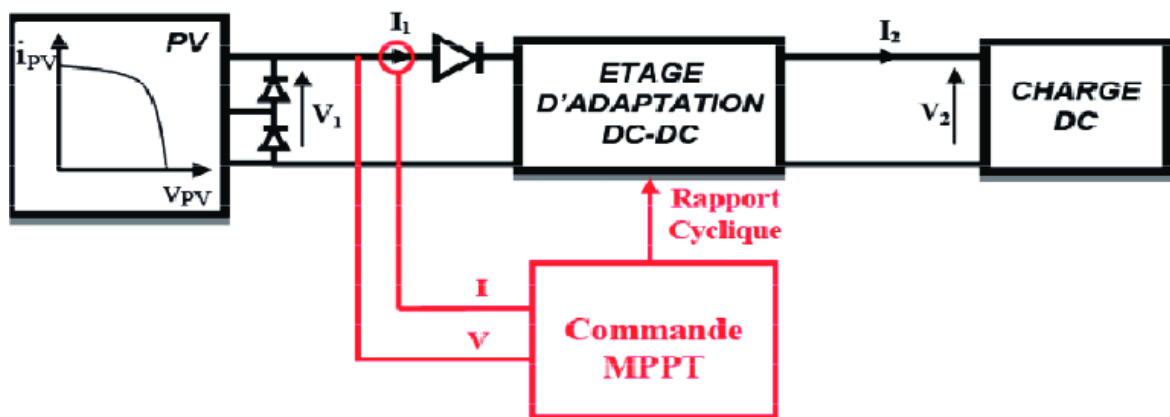


Figure II-23: chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque[12]

La technique de contrôle généralement utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de l'étage d'adaptation de telle manière à amener le générateur PV à sa puissance maximale qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment [28].

La technique de contrôle généralement utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de l'étage d'adaptation de telle manière à amener le générateur PV à sa puissance maximale qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment [27].

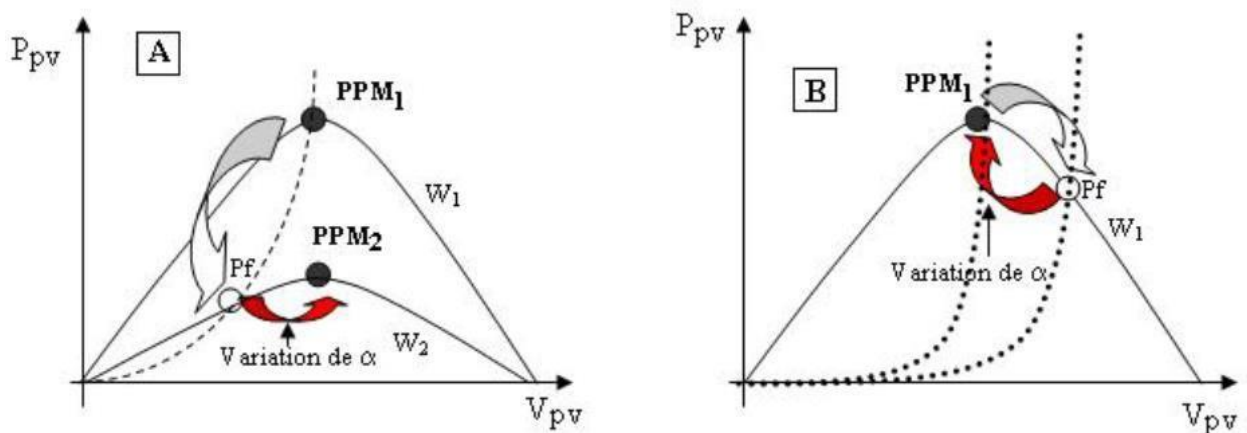


Figure II-24: Fluctuation du point de puissance maximale.[27]

### II.3 Classification des méthodes MPPT les plus fréquentes :

Diverses publications sur les commandes assurant un fonctionnement de type commande MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce genre, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque [29].

Les méthodes MPPT ont connu une amélioration rapide. À cause de ça, certains chercheurs ont mis une autre classification des méthodes MPPT en fonction de leur modernité. Les méthodes MPPT peuvent être classées en deux catégories basées sur la modernité, les méthodes conventionnelles et les méthodes avancées [30].

#### II.3.1 Les méthodes conventionnelles

Il existe très nombreux méthodes de poursuite du point de puissance maximale, mais les trois suivantes sont les plus utilisées : [31]

- La méthode de perturbation et observation (P&O).
- La méthode de l'incrément de conductance (INC).
- La méthode de la tension constante(CV).

La puissance fournie par un GPV dépend de l'éclairement, la température et la charge alimenter. Le GPV aura un seul point de fonctionnement optimal MPP défini par une tension et un courant donnés pour chacune des différents types de charges connectées avec un éclairement et température fixe. [16].

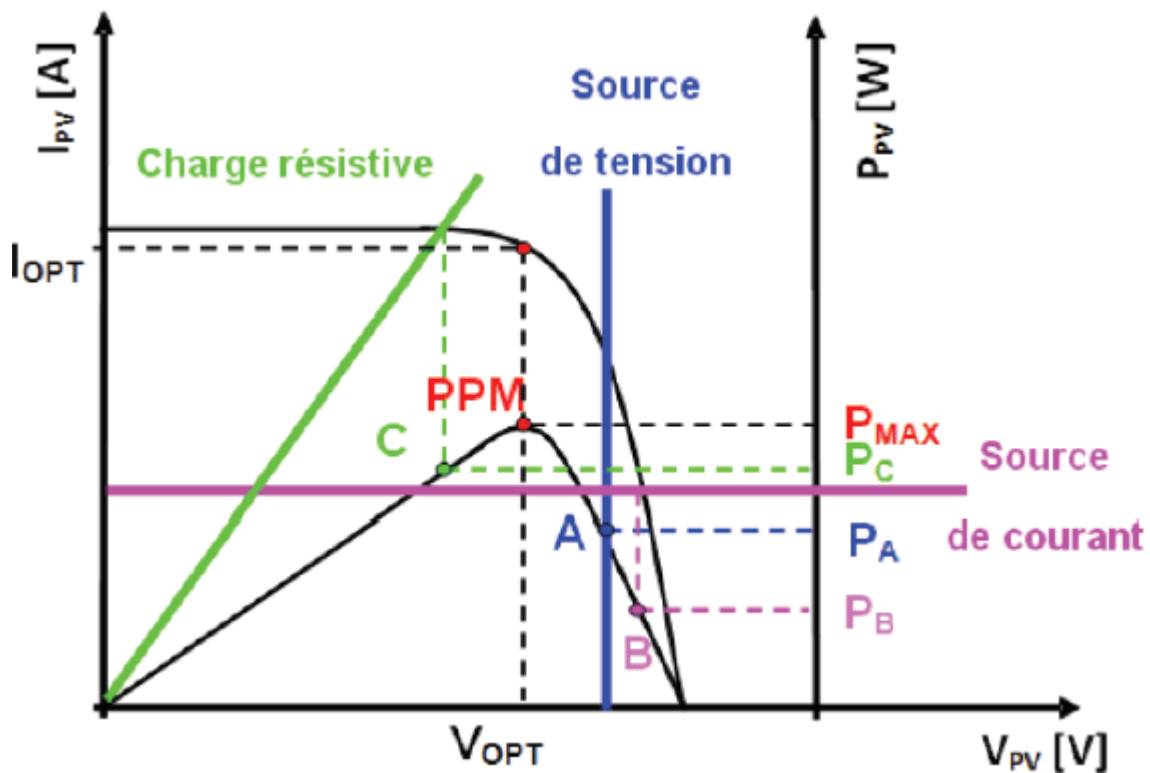


Figure II-25:Points de fonctionnement d'un GPV en fonction de la charge[12]

## II.4 La méthode Perturb and Observe (P&O) :

### II.4.1 Principe des techniques "Perturb and Observe" (P&O) :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{PV}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{PV}$  qui en résulte ainsi, comme l'illustre la (figure II-26), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension  $V_{PV}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{PV}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM.

Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. à partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{PV}(V_{PV})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PPV augmente, la direction de perturbation est maintenue .

Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure (II-26) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type (P&O), où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension [32].

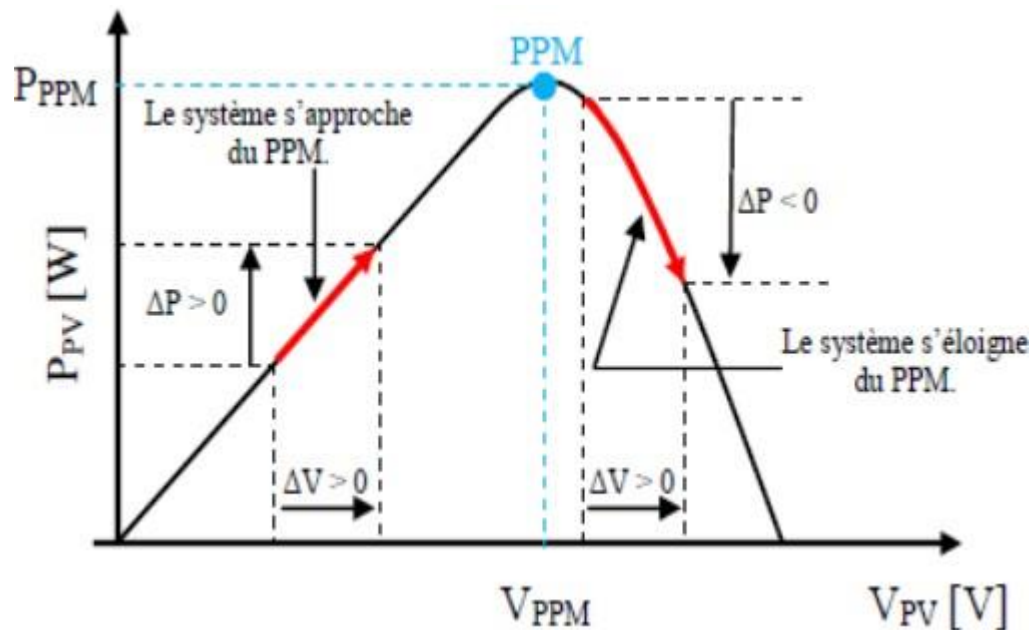


Figure II-26:Caractéristique P(V) d'un panneau solaire

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour Déterminer la puissance du GPV à chaque instant [32].

II.4.2 Algorithme MPPT de la méthode Perturbe et Observe (P&O) :

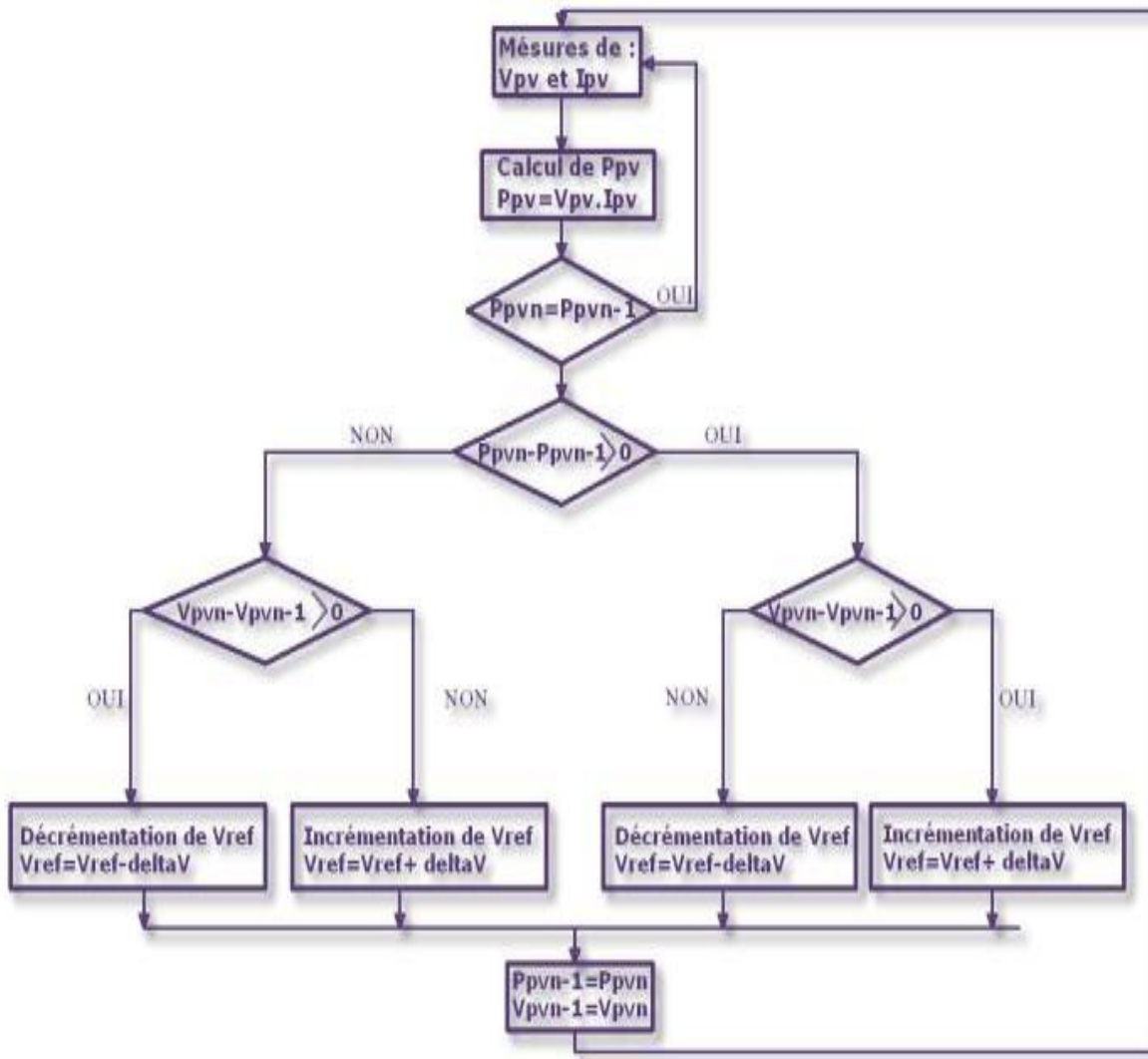


Figure II-27: Algorithme MPPT perturbation and observation (P&O)[32]

II.5 Classifications des problèmes d'optimisation :

On trouve plusieurs méthodes de classification devisées selon des facteurs bien précise. Le schéma ci-dessous présente une représentation globale de classifications problèmes d'optimisation : [23]

Figure II-28: Classification des problèmes d'optimisation [23]

### **II.5.1 Problème d'optimisation :**

Les problèmes d'optimisation occupent une place de plus en plus importante dans les processus décisionnels. Ces problèmes se divisent en deux grandes approches. L'une de ces approches est dite déterministe et sur laquelle les algorithmes de recherche utilisent toujours le même acheminement pour arriver à la solution souhaitée. L'autre approche est l'approche aléatoire ou non déterministe et sur laquelle l'algorithme ne suivra pas obligatoirement le même acheminement pour aller vers la solution finale et peut même proposer différentes solutions et cela suivant des conditions initiales proposés. C'est vers cette approche qu'on va s'orienter et plus particulièrement vers un type bien précis des algorithmes de recherche aléatoires évolutionnaires à populations de solution. Il en existe plusieurs comme le montre la figure (II-28).

Parmi ces algorithmes, nous nous intéresserons particulièrement à l'algorithme des colonies d'abeilles artificielles (ABC) mais utiliserons aussi la méthode (P&O) [28].

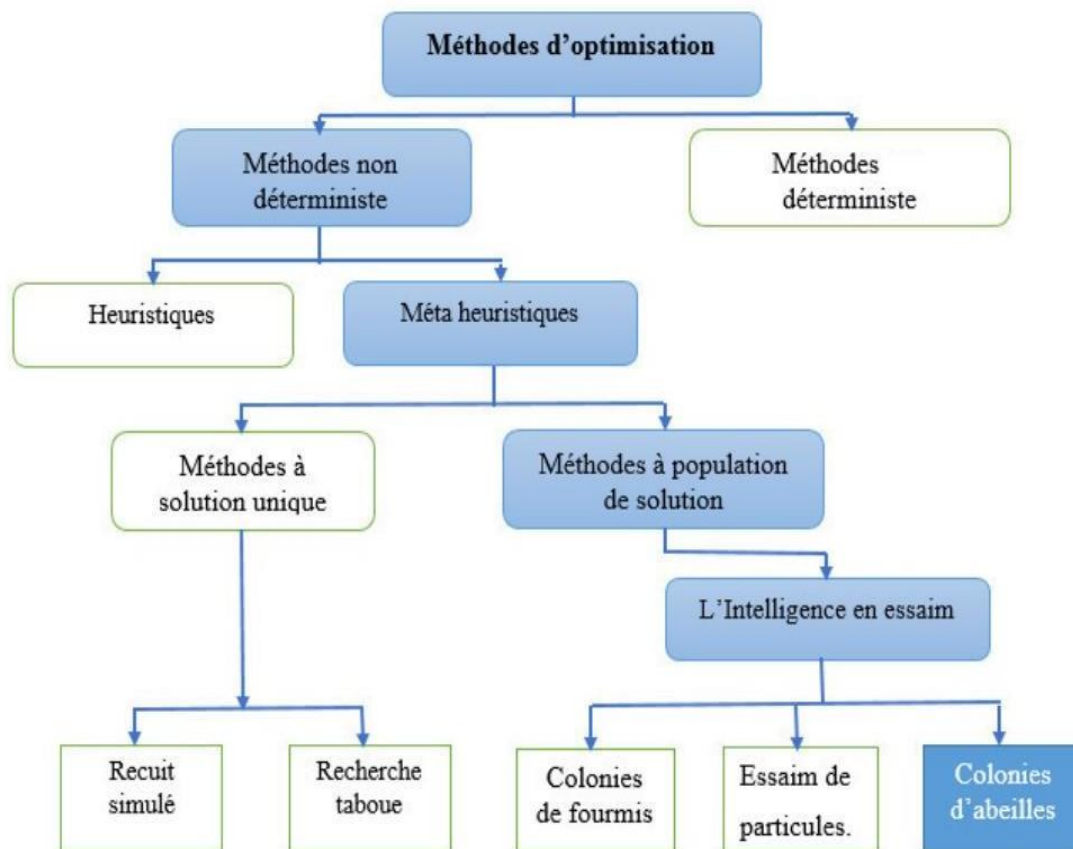


Figure II-29 : Classification des méthodes d'optimisation [27]

### II.5.2 Optimisation difficile :

Les méthodes de résolution exacte ne sont pas adaptées à toutes les problématiques, et donc certains problèmes sont trop complexes à résoudre par ces méthodes. Parmi ces problématiques, nous pouvons citer l'existence de discontinuités, l'absence de convexité stricte, la non-dérivabilité, la présence de bruit ou encore la fonction objectif peut ne pas être définie précisément (e.g. quand c'est un coût). En outre, les méthodes de résolution exacte peuvent avoir un temps de résolution trop long. Dans ce cas, le problème d'optimisation est dit difficile, car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre en un temps raisonnable. Il est alors nécessaire d'avoir recours à des heuristiques de résolution dites méthodes approchées, qui fournissent un résultat sans garantie de l'optimalité.

L'optimisation difficile peut se diviser en deux types de problèmes : les problèmes à variables discrètes et les problèmes à variables continues :

Un problème d'optimisation à variables discrètes consiste à trouver, dans un ensemble discret, une solution réalisable. Le problème majeur réside ici dans le fait que le nombre de solutions

réalisables est généralement très élevé, donc il est très difficile de trouver la meilleure solution dans un temps « raisonnable ». Les problèmes à variables discrètes rassemble les problèmes de type NP-complets, tels que le problème du voyageur de commerce. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation stochastiques, tels que les métaheuristiques, permettant de trouver une solution approchée en un temps raisonnable est donc courante.

Dans le deuxième type, les variables du problème d'optimisation sont continues. C'est le cas par exemple des problèmes d'identification, où l'on cherche à minimiser l'erreur entre le modèle d'un système et des observations expérimentales.

Ce type de problèmes est moins formalisé que le précédent, mais un certain nombre de difficultés sont bien connues, comme l'existence de nombreuses variables présentant des corrélations non identifiées, la présence de bruit ou plus généralement une fonction objectif accessible par simulation uniquement.

En effet, la grande majorité des métaheuristiques existantes ont été créées pour résoudre des problèmes à variables discrètes [33].

### **II.6 Algorithmes d'optimisation approchée :**

#### **II.6.1 Heuristiques :**

Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement (en un temps polynomial) une solution approchée et réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation difficile. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné. Il y a une multitude d'heuristiques qui ont déjà été proposées dans la littérature. [34], [35]

Nous pouvons citer des heuristiques très simples telles que les algorithmes gloutons ou les approches par amélioration itérative. Le principe des méthodes gloutonnes est de faire une succession de choix optimaux localement, jusqu'à ce que l'on ne puisse plus améliorer la solution, et ce, sans retour en arrière possible. Le fonctionnement d'une heuristique gloutonne est similaire à celui d'un algorithme glouton exact. La différence réside dans le fait que nous n'imposons plus que la solution obtenue soit optimale, nous obtenons donc un algorithme d'approximation. [36]

#### **II.6.2 Métaheuristiques :**

Des heuristiques plus poussées, adaptables à un grand nombre de problèmes différents, sans changements majeurs dans l'algorithme, ont été mises au point et ont donné naissance à une nouvelle famille d'algorithmes d'optimisation stochastiques : les méta-heuristiques. Le terme méta-heuristique a été inventé par Fred Glover en 1986, lors de la conception de la recherche tabou [37].



Les métaheuristiques forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels nous ne connaissons pas de méthodes classiques plus efficaces. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, d'où le qualificatif méta. Leur capacité à optimiser un problème à partir d'un nombre minimal d'informations est contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée [29].

Cependant, du point de vue de la recherche opérationnelle, ce constat n'est pas forcément un désavantage, puisque l'on préfère toujours une approximation de l'optimum global trouvée rapidement à une valeur exacte trouvée dans un temps rédhibitoire. Il existe un grand nombre de métaheuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale [29].

La plupart des méta-heuristiques utilisent des processus aléatoires comme moyens de récolter de l'information et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. Les métaheuristiques peuvent être considérées comme des algorithmes stochastiques itératifs, où elles manipulent une ou plusieurs solutions à la recherche de l'optimum. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement en l'atteinte du temps d'exécution imparti ou en une précision demandée. Ces méthodes tirent leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant des dégradations de la fonction objectif au cours du traitement, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche [29].

### **II.7 La méthode d'optimisation par colonie d'abeilles artificielles (ABC)[26]**

#### **II.7.1 Abeille dans la nature :**

Les abeilles sont des insectes volants vivent en colonies, ce sont des insectes sociaux que l'on trouve partout dans le monde, ils sont connus pour produire et stocker du miel, ainsi que pour construire des nids d'une taille impressionnante à l'aide de cire sécrétée. Les abeilles ont besoin de deux types de nourriture, le nectar et le jus sucré qui s'accumule à l'intérieur de fleurs.

Il existe trois types d'individus dans une colonie d'abeilles, à savoir la reine des abeilles, les faux-bourçons et les abeilles ouvrières.

**La reine :** dans une colonie d'abeilles il y a une seule reine qui dirige toute la ruche et se nourrit de gelée royale, c'est une femelle fertile qui passe son temps à pondre les œufs qui donneront naissance à la prochaine génération d'abeilles de la ruche.

**Les ouvrières :** Ce sont des abeilles femelles stériles qui travaillent sans relâche. Les ouvrières peuvent exercer plusieurs fonctions différentes tout au long de leur vie, et parmi ses fonctions est de produire de la gelée royale pour nourrir la reine et les jeunes larves, défendre la ruche, construire les rayons et aussi de prendre soin de la reine et des faux-bourçons. Elles sont la plus petite des castes d'abeilles, mais elles sont les plus nombreuses.

**Les faux-bourçons :** Ce sont les abeilles mâles et ils sont les futurs pères de la colonie d'abeilles, la seule fonction d'un faux-bourçon est de féconder une jeune reine des abeilles. Ils vivent dans des chambres appelées cellules drones et ils se nourrissent directement des alvéoles

de la ruche ou mendient de la nourriture auprès des abeilles ouvrières. Ces abeilles mâles sont plus grandes que les abeilles ouvrières et ils possèdent de grands yeux au sommet de leur tête.

## **II.7.2 La communication chez les abeilles :**

Comme la plupart des animaux intelligents, les abeilles communiquent entre elles. Les abeilles ont besoin de méthodes de communication exceptionnelles pour assurer la sécurité et le bon fonctionnement de la colonie.

Les butineuses communiquent leurs trouvailles florales afin de recruter d'autres ouvrières de la ruche pour butiner dans la même zone. Les facteurs qui déterminent le succès du recrutement ne sont pas complètement connus mais incluent probablement des évaluations de la qualité du nectar et/ou du pollen apporté à la ruche. Les abeilles communiquent entre elles de deux manières : la communication par le langage de la danse et la communication chimique au moyen de phéromone et/ou odeur qui transmettent des informations importantes aux membres de l'abeille colonie.

Les abeilles sont bien connues pour utiliser la danse frétilante (Waggle dance), elles essaient de trouver le plus de pollen et de nectar dans le moindre de temps possible. Cette danse frétilante comprend des informations sur la distance et le vecteur de direction de la ruche ou de

l'essaim à la ressource.

La danse des éclaireuses combine des éléments divers tels que la position du soleil, de la ruche ou de l'endroit à butiner, mais également la distance de ces éléments les uns par rapport aux autres et la qualité estimée des fleurs.

La figure II-30 illustre schématiquement le phénomène de «Waggle dance» d'une abeille :

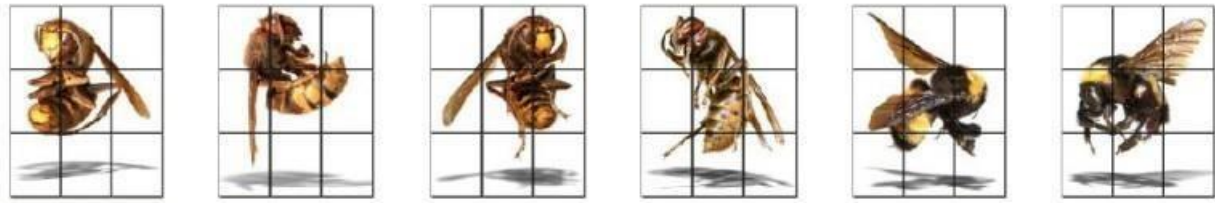


Figure II-30 : Illustration d'une abeille en «Waggle dance».

### II.7.3 Principe de l'algorithme ABC :

Dans cet algorithme, une solution candidate au problème d'optimisation est représentée par une source de nourriture. Chaque source de nourriture possède une quantité de nectar qui caractérise sa qualité (fitness).

Les abeilles de la colonie de l'ABC sont classées en trois groupes : les abeilles employées « Employed bees », les abeilles spectatrices « Onlooker bees » et les abeilles exploratrices « Scout bees ».

Les abeilles employées exploitent les sources de nourriture autour des sources dans leur mémoire afin de trouver une meilleure source de nourriture que celle déjà visitée. Les abeilles spectateurs attendent les informations des abeilles employées pour sélectionnent les positions des sources de nourriture de meilleure qualité en utilisant ces informations. Finalement, les abeilles exploratrices partent aléatoirement sans expérience pour trouver de nouvelles sources de nourriture.

### II.7.4 Initialisation de l'algorithme :

L'algorithme génère une population initiale de SN individus distribuée aléatoirement, où SN désigne la taille de l'essaim,  $X_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,D}\}$  est la source de nourriture 'i' dans la population et D est la dimension du problème d'optimisation.

$$x_{ij} = x_{min}^j + \text{rand} [0,1] (x_{max}^j - x_{min}^j), i \in \{1, \dots, SN\}, j \in \{1, \dots, D\} \quad (\text{II.7})$$

**II.7.4.1 Phase ouvrières :**

Afin de générer une nouvelle solution (source de nourriture), l'algorithme ABC utilise l'expression suivante :

$$v_{ij} = x_{ij} + \Phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (\text{II.8})$$

Où  $\Phi_{ij}$  est un nombre aléatoire appartenant à l'intervalle [-1, 1],  $v_{ij}$  est une nouvelle position d'une source de nourriture potentielle au voisinage de  $x_{ij}$  qu'est l'ancienne source de nourriture,  $k \in \{1, 2, \dots, SN\}$ , ( $k \neq i$ ) et  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$  sont choisis aléatoirement.

**II.7.4.2 Phase spectatrice :**

Dans cette phase abeilles employées partagent des informations sur la nouvelle source de nourriture  $x_i$  avec les abeilles spectatrices à l'aide de la danse frétilante (Waggle dance). La valeur de probabilité  $P_i$  pour les solutions  $x_i$  est calculée en utilisant son fitness comme suit :

$$P_i = \frac{\overline{fit}_i}{\sum_{i=1}^{SN} \overline{fit}_i} \dots\dots\dots(\text{II-9})$$

Il existe d'autres méthodes pour calculer la probabilité  $P_i$ , et l'une de ces méthodes que l'on trouve souvent dans la littérature est la suivante :

$$P_i = \frac{\overline{fit}_i}{\sum_{i=1}^{SN} \overline{fit}_i} + 0.1 \dots\dots\dots(\text{II-10})$$

Où  $fit_i$  est le fitness de la solution  $x_i$ , et La quantité de nectar associée à la source  $x_i$  est calculée en utilisant l'expression suivante :

$$fit(x_i) = \begin{cases} \frac{1}{f(x_i)+1} & , \quad f(x_i) \geq 0 \\ 1 + |f(x_i)| & , \quad f(x_i) < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(\text{II-11})$$

Où  $f(x_i)$  est la valeur de la fonction objective de la solution associée  $x_i$ .

Si la nouvelle solution  $v_{ij}$  est meilleure que l'ancienne solution  $x_i$  alors  $v_{ij}$  remplace  $x_i$

dans la population, sinon  $x_i$  est conservé dans la mémoire et son compteur d'abandon est incrémenté par 1. Notant bien que si la nouvelle solution  $v_{ij}$  est à l'extérieur de l'espace de recherche on doit la réinitialiser pour qu'elle soit à l'intérieur de l'espace de recherche.

#### **II.7.4.3 Phase exploratrice :**

Si le nombre de cycles de recherche atteint une certaine limite mais ne trouve pas de meilleure solution autour d'une source de nourriture, alors cette source est abandonnée, et l'abeille exploratrice génère alors sa nouvelle source aléatoirement suivant l'équation (II.7).

Et la dernière étape est de voir si l'algorithme remplit les cratères d'arrêt, si c'est le cas, retenir la meilleure solution, sinon l'algorithme passe à l'itération suivante.

### II.7.5 Pseudo codes de l'algorithme ABC :

Le tableau I-3 suivant est le pseudo code de l'algorithme ABC, et la première étape est l'initialisation de l'algorithme en générant une population initiale, et le nombre d'abeilles dans l'essaim dépend de la nature du problème d'optimisation.

1. Générer la population initiale  $X_i, i=1\dots, SN$  par l'équation (II.7)
2. Évaluer la population initiale par l'équation (II. 11)
3. Cycle = 1
4. Répéter
5. Pour chaque abeille Employed {
  - Produire une nouvelle solution  $v_i$  par l'équation (II.8)
  - Calculer la valeur de la fonction d'adéquation  $fit_i$  par l'équation (II.10)
  - Appliquer la sélection gourmande
6. Calculer la probabilité  $P_i$  associée à la solution  $x_i$  par l'équation (II.9)
7. Pour chaque abeille Onlooker {
  - Sélectionner une solution  $x_i$  en fonction de  $P_i$
  - Produire une nouvelle solution  $v_i$
  - Calculer la valeur de la fonction d'adéquation  $fit_i$
  - Appliquer la sélection gourmande }
8. S'il y'a une solution abandonnée
  - Alors remplacer la avec une nouvelle solution qui sera produite aléatoirement par l'équation (II.7)
9. Mémoriser la meilleure solution trouvée
10.  $cycle=cycle+1$
11. Jusqu'à  $cycle = cycle_{max}$

Tableau II-3 : Pseudo code de l'algorithme ABC.

### II.7.6 Application de l'algorithme ABC dans la commande MPPT

Dans l'application de l'algorithme ABC pour la commande MPPT, chaque solution candidate est définie comme la valeur du rapport cyclique  $d$  du convertisseur DC/DC, donc le problème d'optimisation a un seul paramètre à optimiser ( $D=1$ ) [23]. L'équation (II-7) et (II.8) devient :

$$d_i = d_{min} + \text{rand} [0,1] (d_{max} - d_{min}), i \in \{1, \dots, SN\}, j \in \{1, \dots, D\} \quad (\text{II-12})$$

$$\text{new\_}d_i = d_i + \phi_{ij}(d_i - d_k) \quad (\text{II-13})$$

Le fitness de chaque solution (Rapport cyclique) est choisi comme la puissance générée  $P_{PV}$  [23], et l'équation (II.14) devient

$$P_i = \frac{P_{PV_i}}{\sum_{i=1}^{SN} P_{PV_i}}$$

Pour évaluer les rapports cycliques, le contrôleur numérique sort successivement le signal PWM en fonction de la valeur de  $d_i$ , puis la tension PV  $V_{pvi}$  et le courant  $I_{pvi}$  peuvent être mesurés et la puissance correspondante ( $P_{pvi}$ ) de chaque rapport cyclique  $d_i$  peut être calculé. Il convient de noter que pour acquérir des échantillons corrects, l'intervalle de temps entre deux évaluations successives du cycle de service ( $T_s$ ) doit être supérieur au temps d'établissement du convertisseur de puissance.

La procédure de l'application de la méthode proposée peut être divisée en 4 phases :

- Phase des abeilles ouvrières
- Phase des abeilles spectatrices
- Phase des abeilles exploratrices

L'environnement de travail réel du système PV change constamment en raison aux conditions météorologiques variables et, par conséquent, le MPP mondial est toujours en changeant. Cela nécessite que l'algorithme MPPT ait la capacité de rechercher un MPP mondial pour les nouvelles conditions météorologiques. A cet effet, le processus de recherche doit redémarrer avec une réinitialisation totale chaque fois que les conditions météorologiques sont modifiées. Ici, nous utilisons la stratégie suivante pour détecter ces changements.

$$\frac{[P_{pv.nov} - P_{pv.enc}]}{P_{pv.enc}} \geq \Delta_{pv} \quad (\%) \dots\dots\dots (II-15)$$



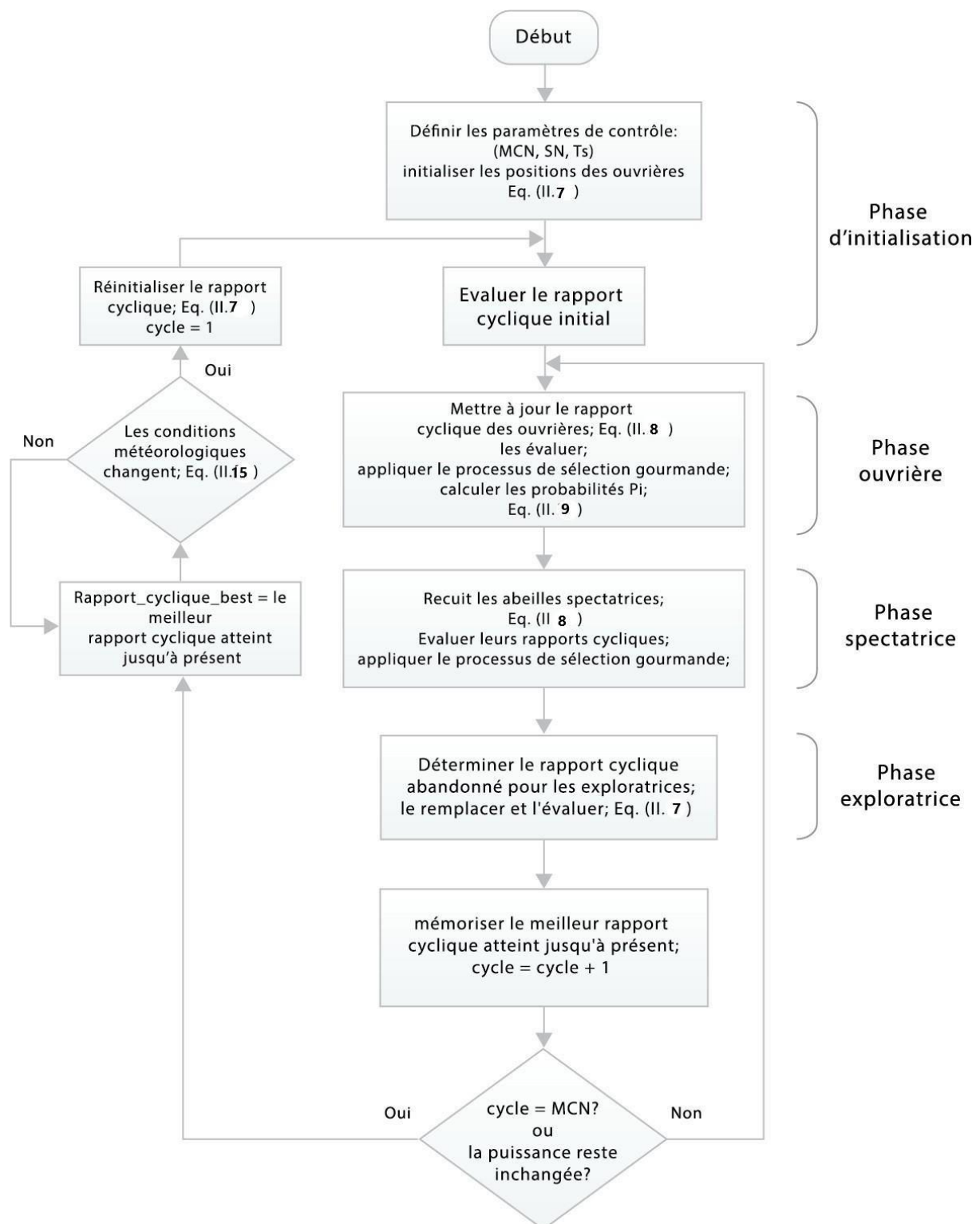


Figure II-31: Organigramme de la méthode ABC avec un contrôle direct du system PV.

### **II.7.7 Avantages et inconvénients de l'algorithme ABC**

#### **II.7.8 Avantages**

- Utilise moins de paramètres de contrôle
- Converge rapidement vers la solution
- Peut être appliqué pour résoudre de nombreux problèmes d'optimisation
- Flexible et robuste
- peut être utilisé pour résoudre des problèmes d'optimisation numérique unimodale et multimodale
- Il a des performances supérieures avec les problèmes d'optimisations sans contraintes, et aussi peut être utilisé efficacement pour résoudre des problèmes d'optimisation sous contraintes
- Capable de résoudre des problèmes d'optimisation complexes

#### **b) Inconvénients**

- C'est un algorithme relativement complexe
- Espace de recherche limité par la solution initiale
- Tomber facilement prématurément dans les optima locaux et le taux de convergence lent à un stade ultérieur
- Ne pas explorer suffisamment l'espace de recherche, ce qui a pour conséquence de
- converger vers un optimum local

## **II.8 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept d'optimisation. Tout d'abord, nous avons donné la définition d'un problème d'optimisation et les étapes d'un processus d'optimisation. Puis nous avons présenté une famille de méthodes de résolution de problèmes d'optimisation : les heuristiques, métaheuristiques et plus particulièrement les méthodes basées sur la population. Enfin, les algorithmes (optimisation perturbe et observe et colonie d'abeilles artificielles) sont décrits en détail.

En utilisant le logiciel MATLAB, nous avons codé et testé la méthode P&O et ABC en considérant l'optimisation de deux fonctions mathématiques possédants plusieurs maxima.

***III. Chapitre III : Simulation et  
interprétation des résultat***

### III.1 Introduction

Dans ce chapitre nous avons utilisé MATLAB/SIMULINK comme un environnement de la simulation à tous les équipements représentant le système photovoltaïque connecté au réseau électrique tel que le générateur PV.

Afin de maximiser l'efficacité du système d'énergie renouvelable, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée.

Dans ce contexte, on va faire étude comparative entre la méthode (ABC) et (P&O) nous proposons un système de commande MPPT standard avec les deux méthodes (ABC) et (P&O) pour comparer lesquels possèdent l'efficacité de la transformation d'énergie PV.

### III.2 Simulation de système PV en fonctionnement autonome :

Dans cette partie de simulation le générateur PV et hacheur booste a utilisé aussi comme une commande MPPT et Charge R ( $R = 45 \Omega$ ) :

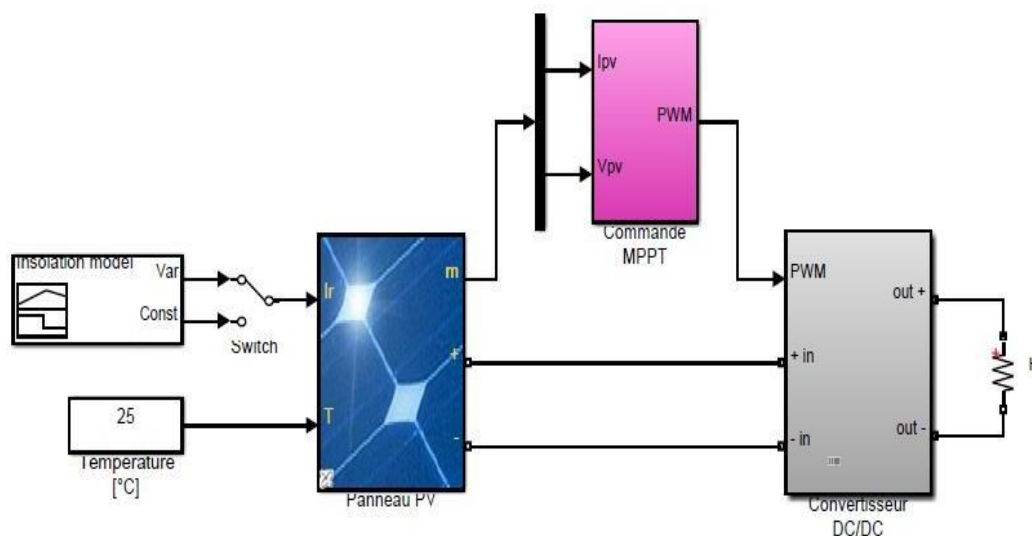


Figure III-32: Modèle Matlab/Simulink d'un système PV autonome

#### III.2.1 Simulation du module PV (1Soltech 1STH-245-WH) :

Le module photovoltaïque (1Soltech 1STH-245-WH) est choisi pour la simulation. Il contient (60) cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximum nominale de 244.62 W. Les caractéristiques physiques et électriques de ce panneau photovoltaïque sont données par le tableau (III-5) et la figure (III-33) suivant :

Le module PV «1Soltech 1STH-245-WH»	
Puissance maximale (Pmax)	244.62Wc
Tension à Pmax (Vmpp)	30.2 V
Courant à Pmax (Imp)	8.1 A
Tension à circuit ouvert (Voc)	37.2 V
Courant de court-circuit (Icc)	8.62 A
nombre de cellule solaire NS	60

Tableau III-4: Caractéristiques physiques et électriques du générateur PV

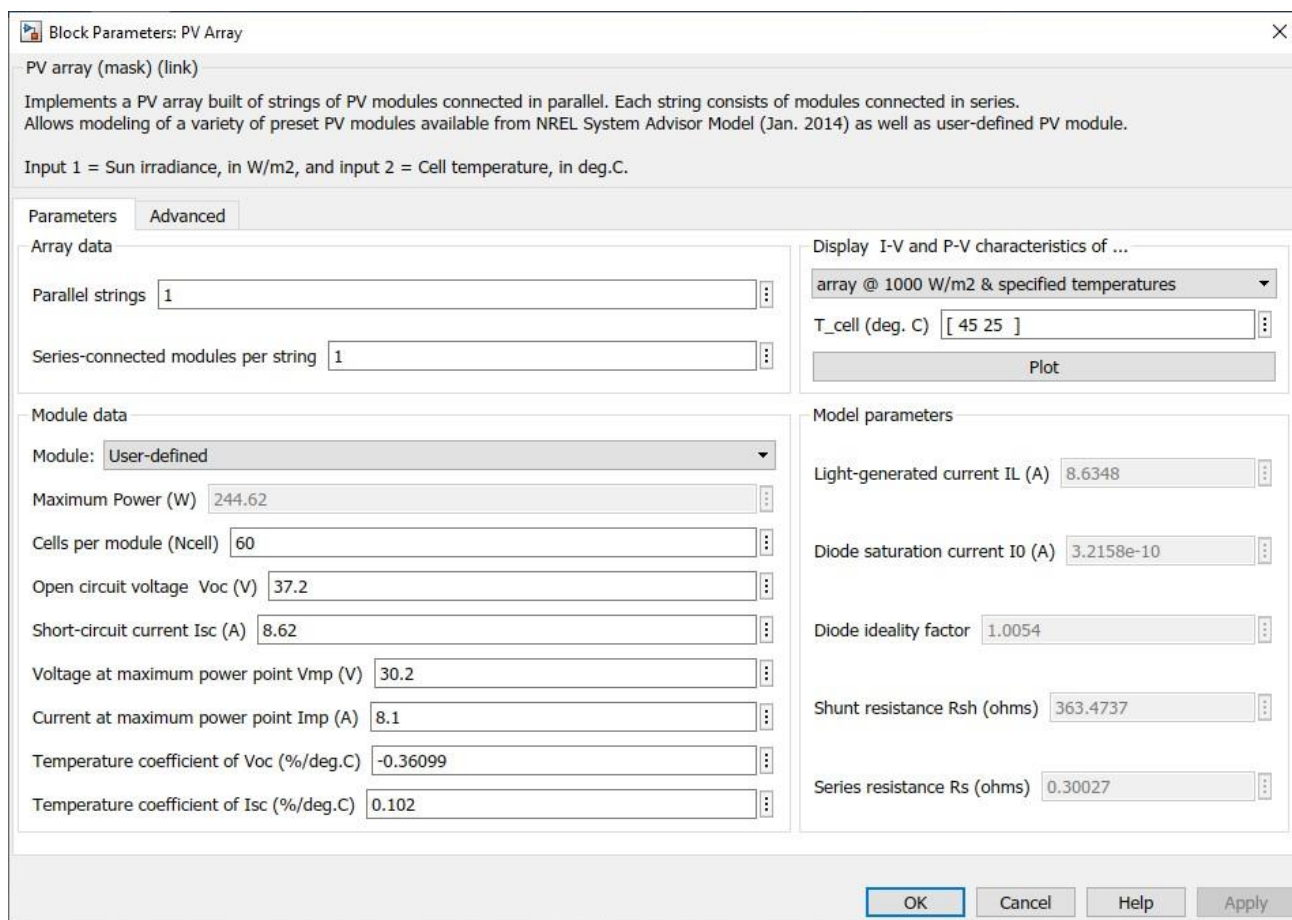


Figure III-33 : Caractéristiques physiques et électriques du générateur PV



Figure III-34 : Modèle d'un générateur PV

Le schéma de la simulation du GPV dans l'environnement Matlab-Simulink est représenté par la figure (III-35) :

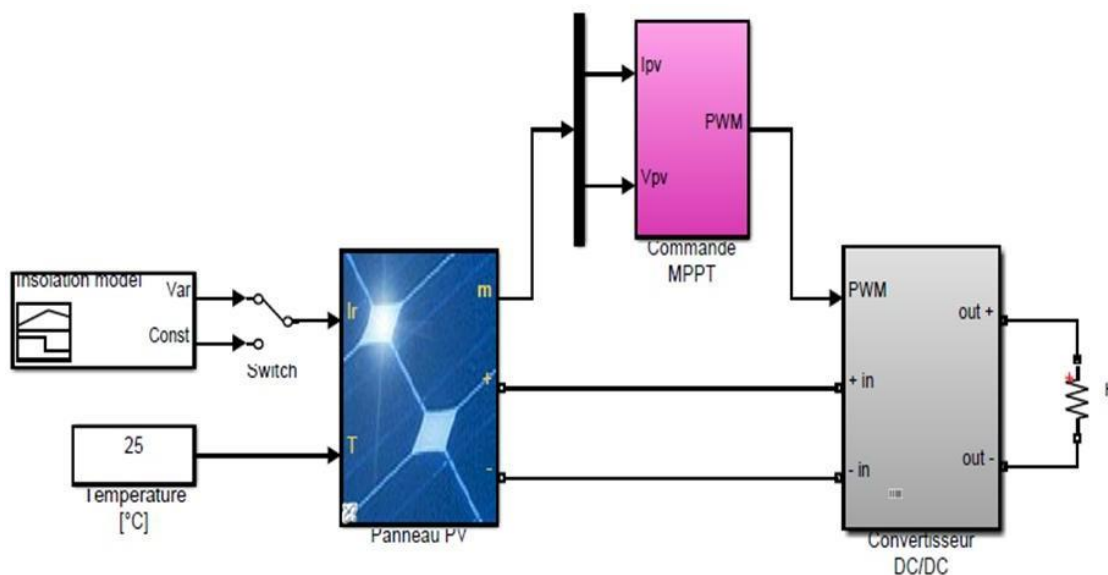


Figure III-35 : simulation du GPV autonome

### III.2.2 Caractéristique du panneau PV à éclairement et température constante :

Une première manière d'étudier la cohérence du modèle développé tout au long de ce chapitre est d'étudier l'allure des caractéristiques courant-tension et puissance-tension obtenues. C'est ce que nous permet de faire les figures suivantes. Pour l'analyse du fonctionnement du panneau PV choisi, en se basant sur le Modèle étudié, une série de simulation ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes, tel que :

- La première courbe présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$ .
- La deuxième courbe présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et de température  $T = 25^\circ\text{C}$ .

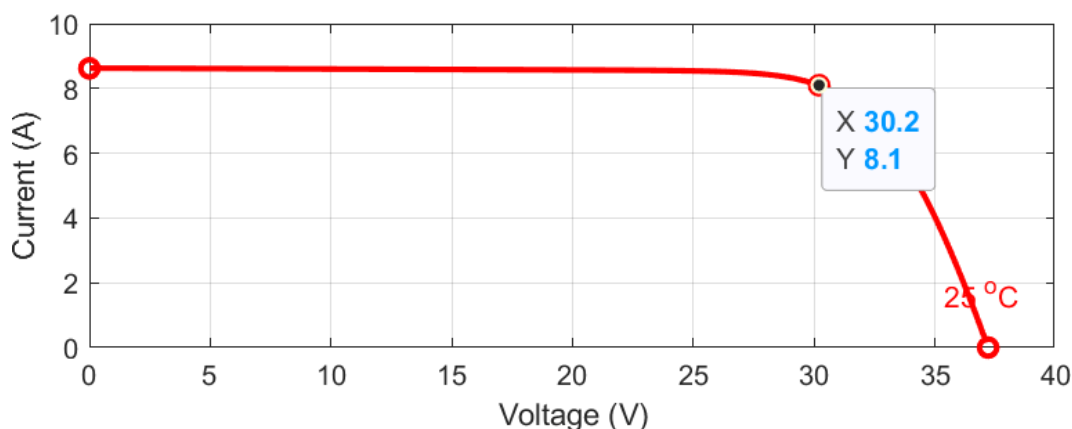


Figure III-36: Caractéristique (courant-tension) du panneau PV.

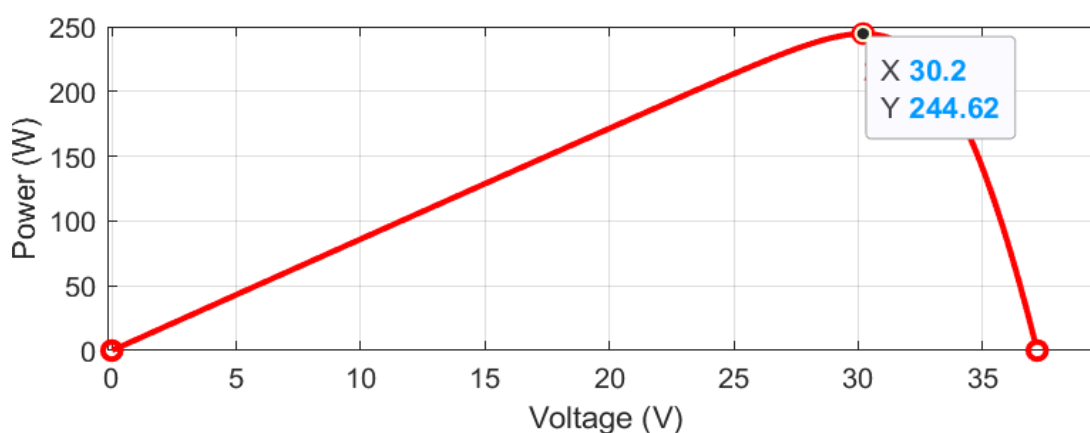


Figure III-37: Caractéristique (puissance-tension) du panneau PV.

Pour confronter un peu plus notre modèle à la réalité, il est nécessaire d'étudier comment certains paramètres, tels que le rayonnement reçu, ou la température de jonction vont influencer la caractéristique courant-tension.



### III.2.3 Simulation d'un panneau photovoltaïque sur conditions météorologiques :

On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance  $P \approx 244.62\text{W}$ , et  $I \approx 8.1\text{A}$ ,  $V \approx 30.2\text{V}$ .

Caractéristique du générateur PV à éclairement et température constante :

Dans ce cas la caractéristique ( $I_{pv}=f(V_{pv})$ ) et ( $P_{pv}=f(V_{pv})$ ) du générateur PV quise compose de 4 module parallèle ( $N_p=4$ ) et 10 modules série ( $N_s=10$ ) sous les conditions standards ( $E=1000\text{W/m}^2$  et  $T=25^\circ\text{C}$ ) donné par les figures (III.38) et (III.39) :

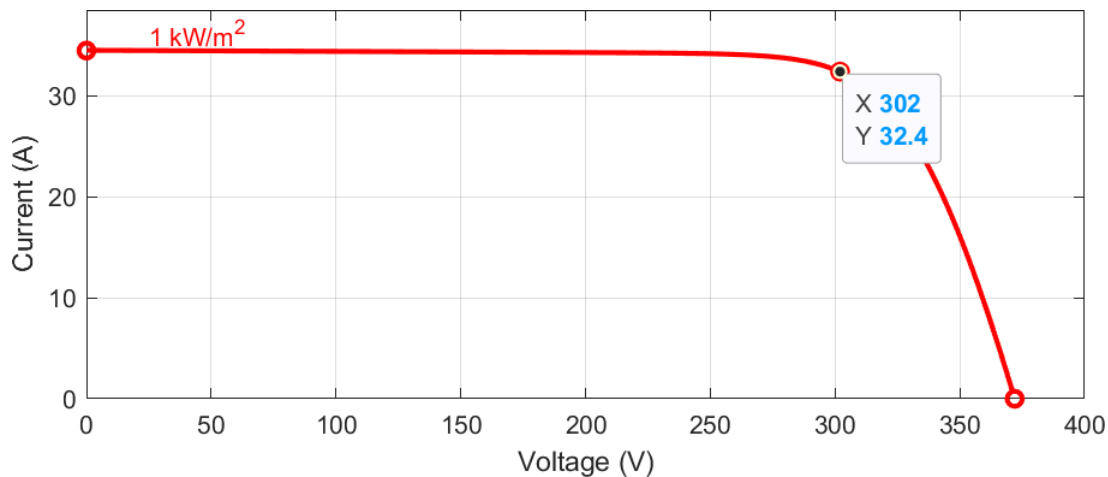


Figure III-38: Caractéristique (courant-tension) du GPV

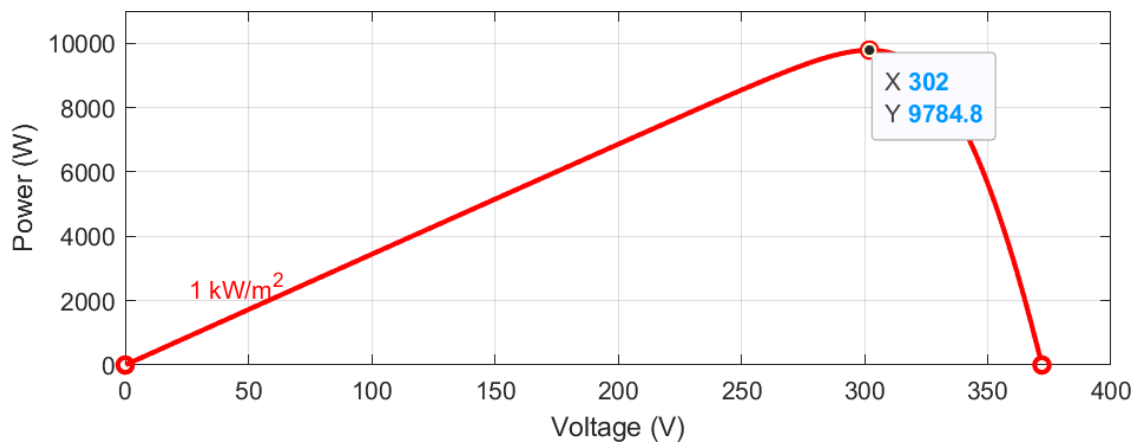


Figure III-39: Caractéristique (puissance-tension) du GPV.

### III.3 Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable :

Afin de constater l'influence des conditions externes de l'éclairement et de la température ( $E, T$ ) sur la caractéristique ( $I-V$ ) ( $P-V$ ) nous avons utilisé le bloc PV ARRAY qui

trouve dans le matlab directement (le coté de plotage de caractéristique (I-V) et (P-V)) (le titre était écrit en anglais « Display I-V and P-V characteristics of ... » Et nous avons adopté la méthode suivante :

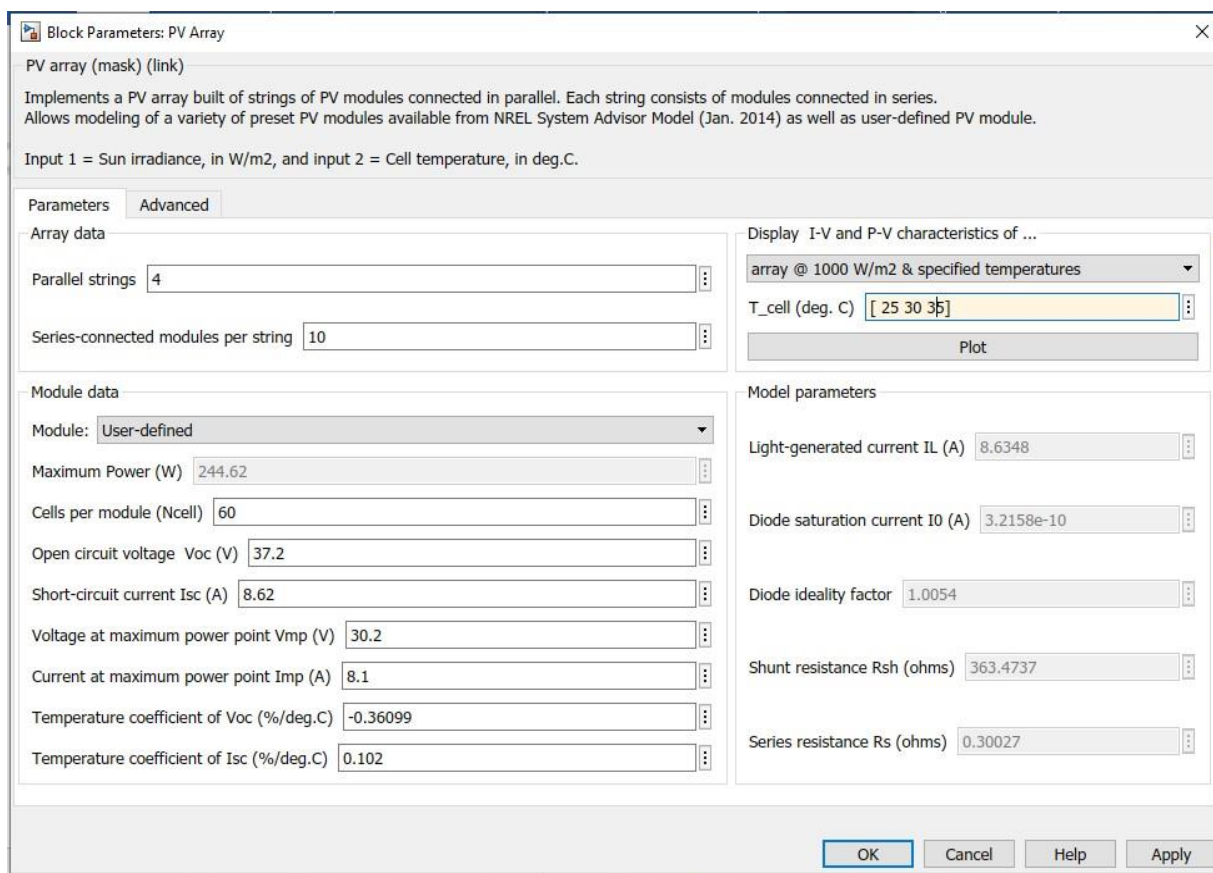


Figure III-40: le bloc PV ARRAY.

### III.3.1 Influence de l'éclairement sur GPV :

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, On fixe la température ambiante ( $T=25^{\circ}$ ) et on fait varier l'éclairement dans une gamme suffisante après on va cliquer sur « **plot** ».

En faisant varier l'éclairement ( $E$ ) entre 800 et 1000 avec un pas de 100, la caractéristique ( $P=f(V)$ ) est donnée par la figure (III-42) et la caractéristique ( $I=f(V)$ ) est donnée par la figure(III-41) :

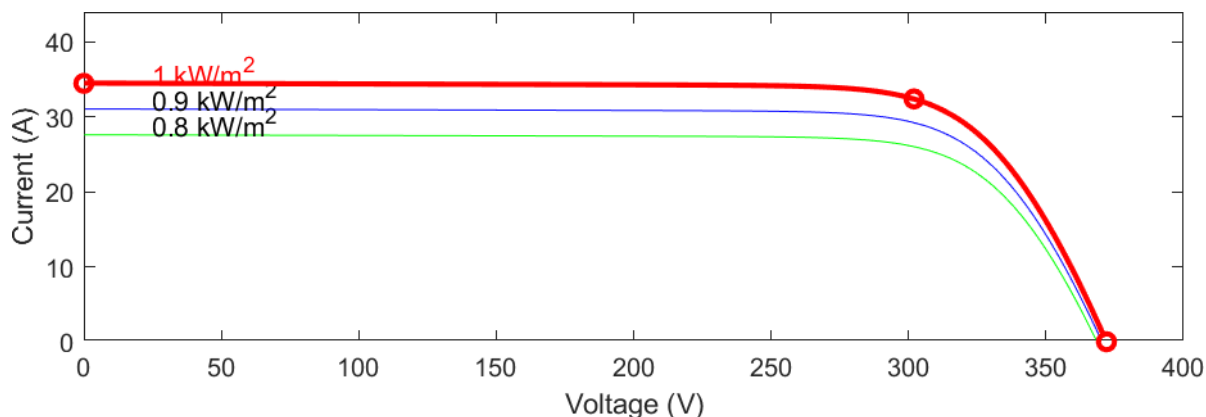


Figure III-41: Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (I-V)

D'après la Figure (III-41) (On remarque une diminution du courant de court-circuit par rapport l'éclairement (E) et une faible diminution de tension de circuit ouvert.

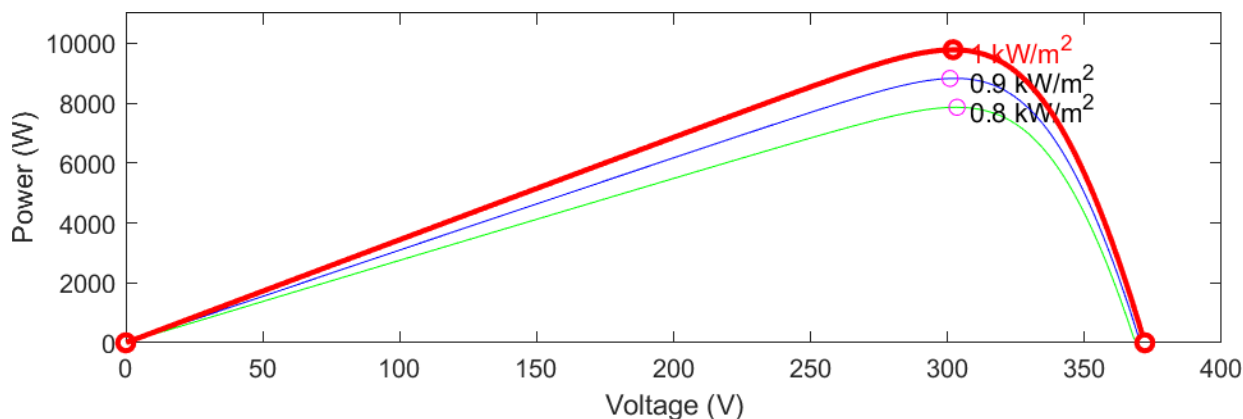


Figure III-42: Influence de variation de l'éclairement sur la caractéristique (P-V)

On remarque sur la figure (III-42) que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension de circuit ouvert de GPV.

### III.3.2 Influence de la température sur GPV :

Pour un éclairement constant ( $E=1000 \text{ w/m}^2$ ), on varie la température afin de voir l'influence de celui-ci par rapport aux caractéristiques de générateur PV après on va cliquer sur « **plot** ».

En faisant varier la température ambiante (T) entre ( $25\text{c}^\circ$  et  $35\text{c}^\circ$ ) avec pas de  $5\text{c}^\circ$ .

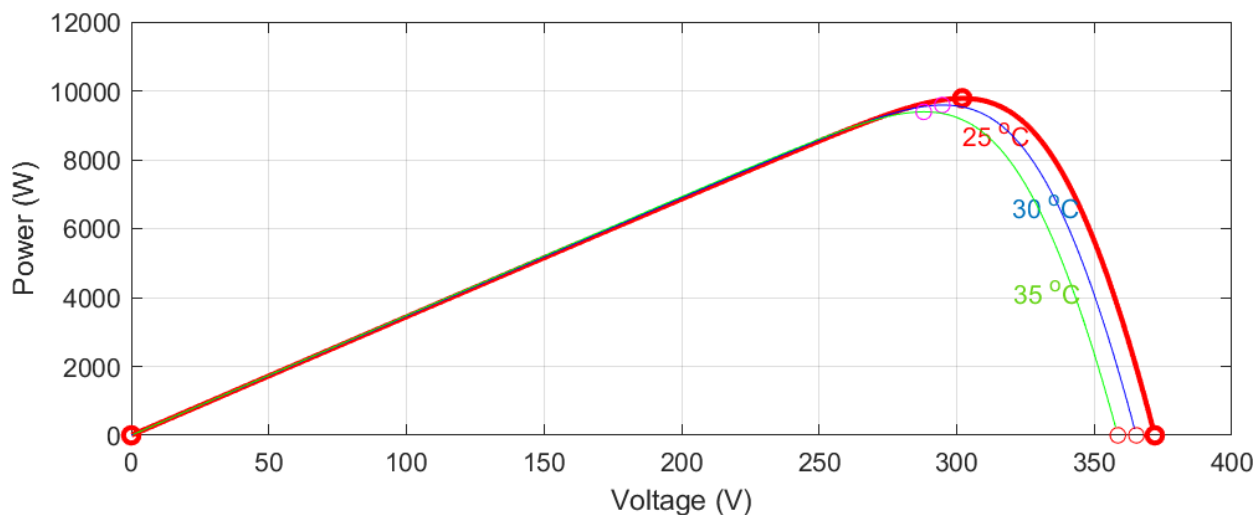


Figure III-43: : Influence de variation de température sur la caractéristique (P-V)

On peut remarquer sur la figure (III-43) que l'augmentation de la température se traduit par une diminution de la puissance maximale disponible.

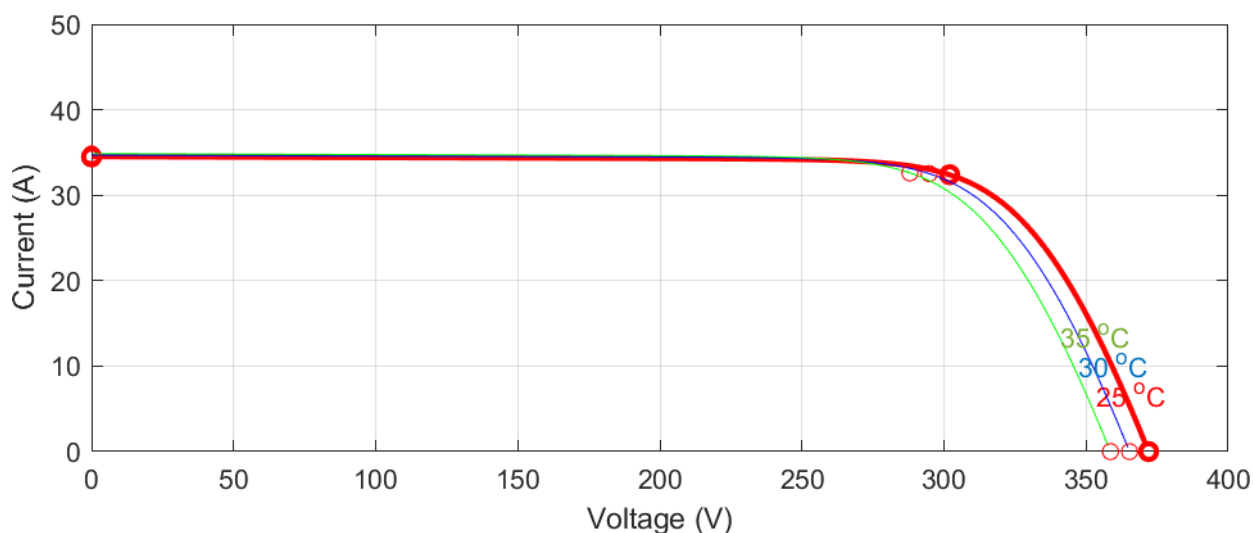


Figure III-44: Influence de variation de température sur la caractéristique (I-V)

D'après la Figure (III-44) L'effet de l'augmentation de température fait diminuer la tension du circuit ouvert de GPV, contrairement au courant de court-circuit qui reste.

### III.4 Simulation du système PV avec la méthode (P&O) :

On a utilisé dans cette simulation un générateur PV et hacheur booste et On a utilisé aussi une commande MPPT et et Charge RL ( $R = 45\Omega$ ). La figure (III-45) ci-dessous représente le schéma de montage pour la simulation du GPV dans l'environnement Matlab-Simulink.

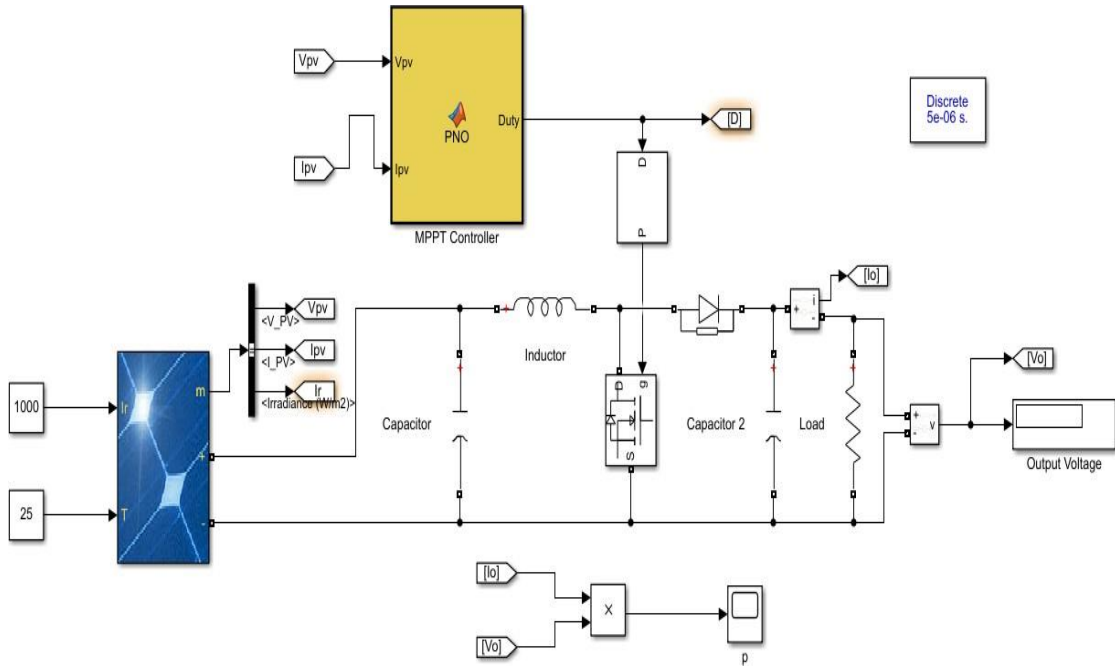


Figure III-45 : Modèle du système photovoltaïque

### III.4.1 Simulation de la commande MPPT numérique (P&O) :

Dans la figure (III-46) on représente l'architecture adoptée du contrôleur MPPT dans l'environnement SIMULINK :

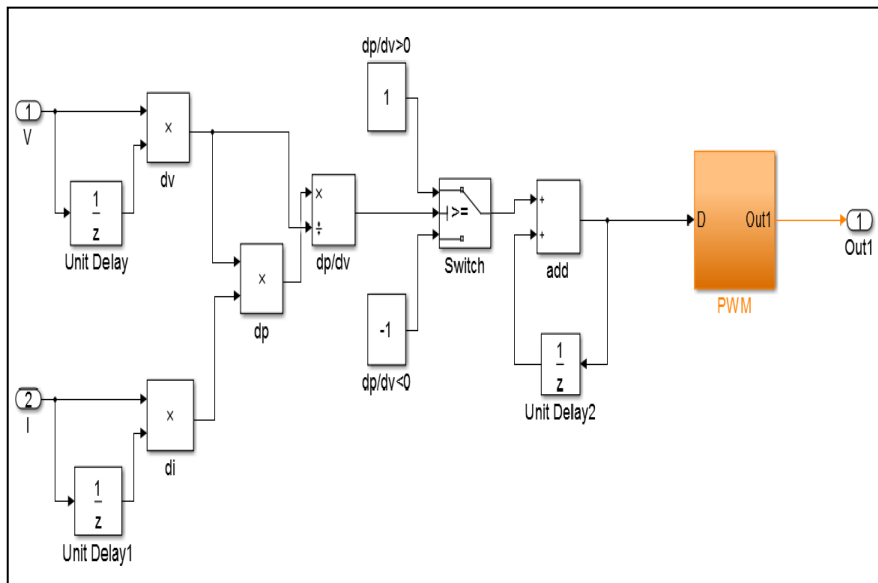


Figure III-46 : l'illustre l'architecture adoptée du contrôleur MPPT

### III.4.2 Simulation de la hacheur Boost :

Parmi les techniques de commande à MPPT du hacheur (Boost) décrites au chapitre II, nous avons choisi la méthode de perturbation & observation. Le schéma de simulation est donné

par la Figure (III.47)

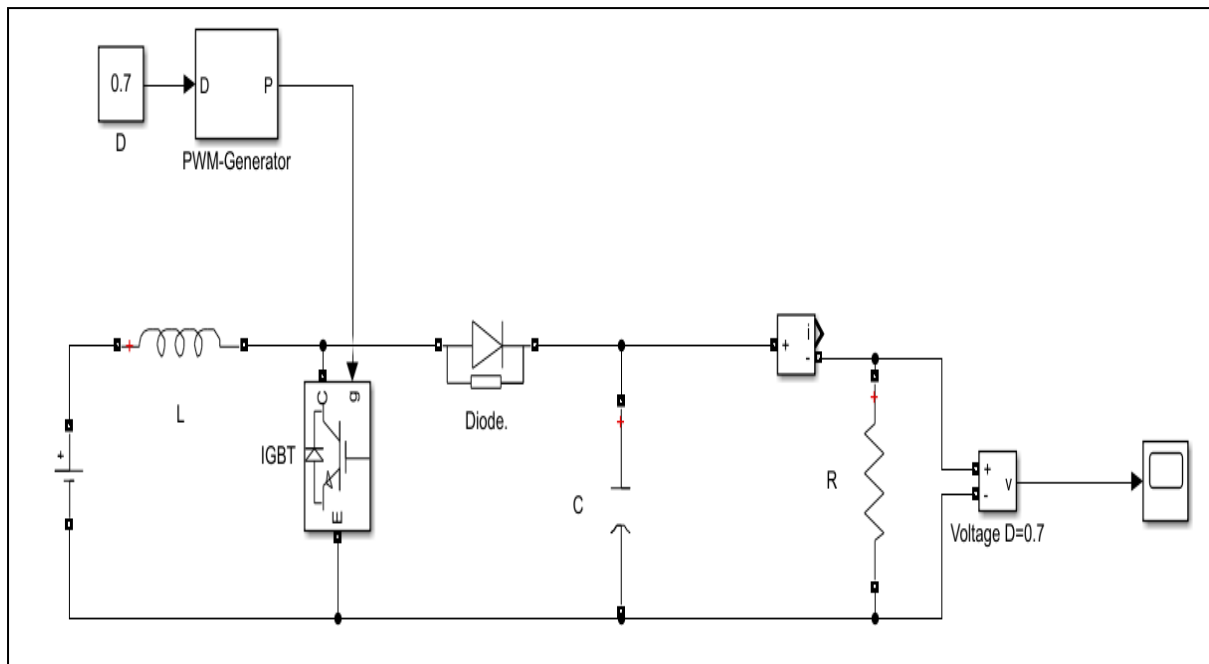


Figure III-47 : Modèle Matlab/Simulink d'un hacheur Boost.

### III.4.3 Les résultats obtenus

Les résultats obtenus de l'application des méthodes P&O et ABC pour trouver le point maximal global de la fonction, sont donnés dans les figures suivantes, la figure (III-49) montre le taux de craquage des deux méthodes sont différents on remarque que la puissance optimisée par la méthode ABC est meilleure que P&O et la dernière a un taux de réponse plus fort que le P&O.

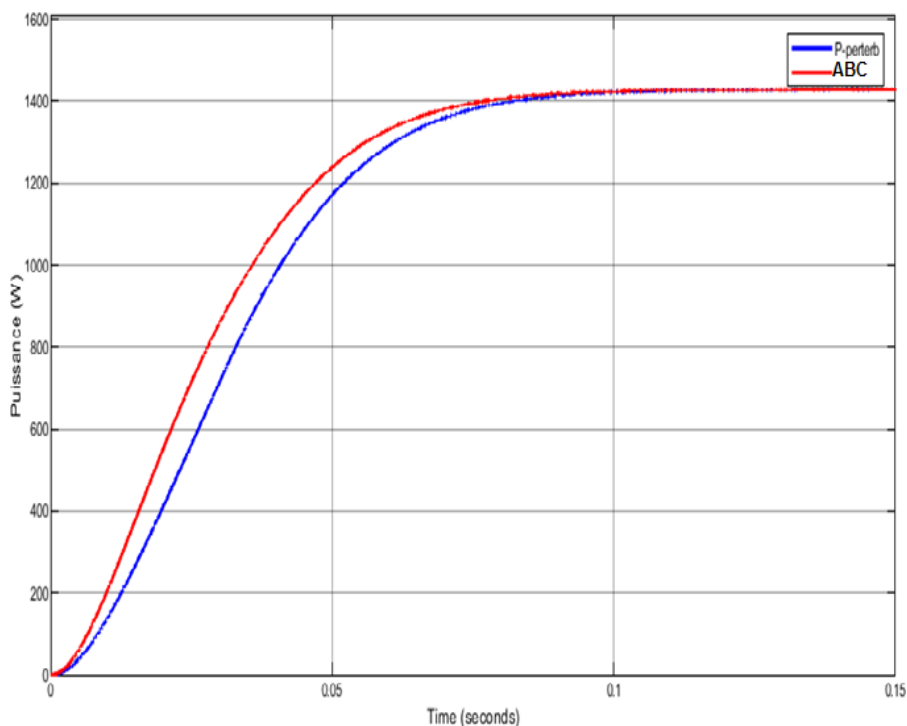


Figure III-48: les courbe de puissance par optimisation P&O et ABC

La Figure (III-48) montre le résultat de la simulation pour (1000kw / m<sup>2</sup>, 25 ° C). À partir de la cette figure, on peut remarquer que la puissance extraite à l'aide de l'algorithme ABC-MPPT présente des oscillations réduites autour du point maximum par rapport à l'algorithme P&O-MPPT. De plus, le temps de convergence de la méthode ABC est très rapide par rapport aux méthodes P&O-MPPT, qui prouve l'exactitude du ABC-MPPT proposée.

#### III.4.4 Cas de variation des conditions climatiques :

Pour une variation rapide de l'éclairement à une température constante de 25°C, on remarque que la méthode ABC converge plus rapide par rapport à celle P&O.

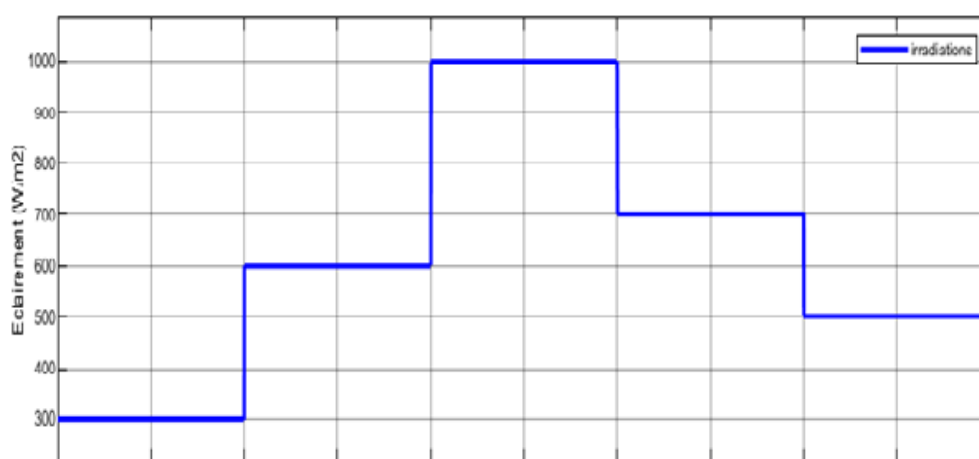


Figure III-49: le changement de l'éclairement

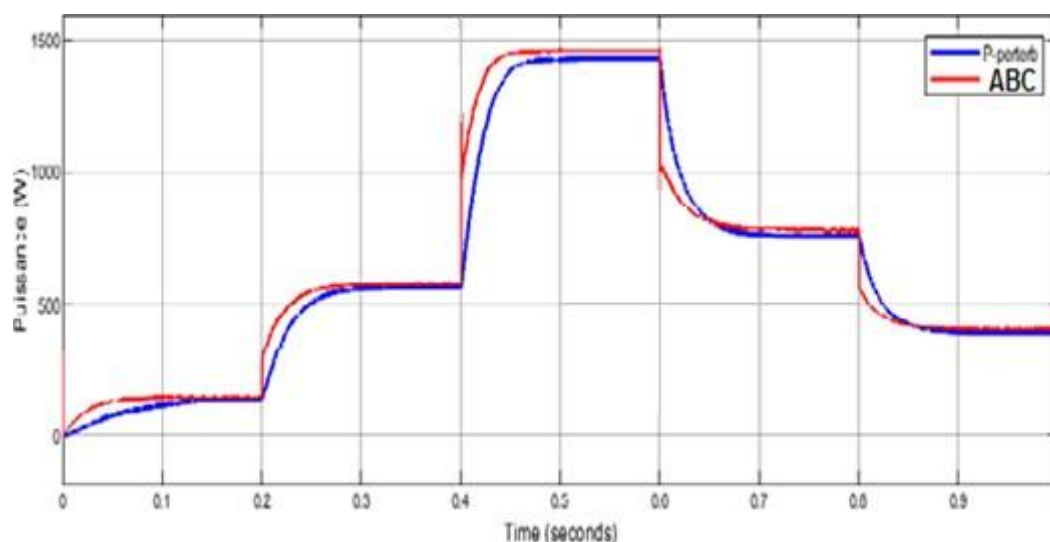


Figure III-50 : Les résultats obtenus du P&amp;O et ABC à travers la variation de l'éclairement

### III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, On a simulé les étages de système photovoltaïque et le système photovoltaïque global. Ensuite, on a fait une étude comparative entre les deux méthodes P&O et ABC en termes de d'efficacité, rapidité et de robustesse sous différentes conditions atmosphériques. Les résultats de simulation ont révélé que méthode ABC présente une poursuite du point de puissance maximale une convergence rapide dans les variations rapide des conditions climatiques telles que l'éclairement à température constante par rapport la méthode classique P&O. Les résultats de simulation montrent que la méthode ABC est



meilleure par rapport la méthode classique P&O en termes d'efficacité, de stabilité et de robustesse.

## Conclusion générale

Cette mémoire c'est une étude comparative se présente le sujet concernent principalement les méthodes d'optimisation spécifiquement la méthode colonie d'abeille artificiel (ABC) et la méthode de perturbation et observation (P&O), ce qui concernant la puissance d'un système photovoltaïque. L'objectif était de proposer, à travers une étude comparative, avoir des bonne résultats et de qualité de puissance par optimisation de l'algorithme ABC par rapport la méthode de (P&O).

Au cours de ce travail nous avons développé des méthodes MPPT basée sur des différents types d'algorithmes de maximisation. Les résultats de la simulation d'une technique classique qui est « perturbation et observation » ont montrés la réussite de cette algorithme (ABC) lors de la recherche du PPM. On espérons au future de trouve des autre plus efficaces et plus simple.

A travers la comparaison entre les deux techniques méta heuristiques l'optimisation par perturbe et observe P&O et l'optimisation par colonies d'abeilles artificielles (ABC) et en faisant des différentes simulations, nous avons démontrés, que le type d'algorithme ABC est très utiles dans la poursuite du point de puissance maximal notons que le temps de convergence est moins rapide que celle pris par le type du méthode P&O.

## **Les références :**

- [1] K. Kassmi, M. Hamdaoui, et F. Olivié, “Conception et modélisation d’un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique,” 2007.
- [2] “[http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaïque.asp](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaïque.asp),” Jun. 2019.
- [3] M.N.Mchalikh et CH.Hmada, “Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau,” Ouargla, 2013.
- [4] M. Salmi, “Contribution à La Quantification De L’irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques,” Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2012.
- [5] BOUZIANE Afaf, “Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des applications photovoltaïques,” UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M’SILA, M’SILA, 2018.
- [6] Dang Minh Trung, “élaboration de cellules solaire photovoltaïque à base de polymères conjugués, études des systèmes,” université de Bordeaux, Bordeaux, 2009.
- [7] Belhadj Mohammed, “Modélisation d’un système de captage photovoltaïque autonome.,” Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar, Institut des Sciences Exactes , bachaar, 2008.
- [8] Anne Labouret et Pascal Cumunel, “Cellules solaires Les bases de l’énergie photovoltaïque,” Dunod, 2010.
- [9] A. buyers, “ les système photovoltaïques,” *guide*, canada, 2002.
- [10] B. Flèche et D. Delagnes, “Energie solaire photovoltaïque.”2006
- [11] S. Belakehal, “Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables.,” Université De Constantine, Constantine, 2010.
- [12] “site web” *researchgate*. [www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)

- [13] Berregui Abdelfettah et Absa Amjed, "Etude technicoéconomique d'une installation photovoltaïque pour application dans la région de Ouargla," Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.
- [14] Philippe Guibert, "TP Energie Solaire," PARIS.
- [15] Site web, "<http://fr.solarpedia.net> "
- [16] Hadjam Ilyas et Cherchali Mohamed Abdelbadie, "Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par l'algorithme ABC-artificial bee colony," Université Djilali Bounaama , Khemis Miliana, 2021.
- [17] BOUALEM BENDIB, "une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes," Thèse de doctorat en science, université Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, 2017.
- [18] Karim Med lamine et Debbah Houssein Eddine, "Etude par simulation d'un générateur photovoltaïque," Mémoire Master , BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2018.
- [19] O.BENSEDDIK et F.DJALOU, "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque," Mémoire de Master , Université Kasdi Merbah-Ouargla, 2012.
- [20] A. Oi, "Design and simulation of photovoltaic water pumping system ," Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, San Luis Obispo, 2005.
- [21] Houhou kamar et Kasimiouri marwa, "Simulation et Optimisation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique basse tension," mémoire master , Université Mohamed Khider , biskra, 2021.
- [22] S. Vighetti, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion." [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00525110>
- [23] M. ADOUANE, "Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur Connecté au réseau électrique," mémoire de magister, ENP, Alger Algérie, 2008.

[24] BOUALEM DENDIB, “Technique conventionnelles et avancées de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative,” mémoire de magister, Université Ferhat Abbas-Sétif, 2007.

[25] “Energie renouvelables.” <http://www.energies-renouvelables.org/> (consulté 22 May 2022).

[26] Hadjam Ilyas et Cherchali Mohamed Abdelbadie, “Optimisation du fonctionnement d’un générateur photovoltaïque par l’algorithme ABC-artificial bee colony,” Université Djilali Bounaama , Khemis Miliana, 2021.

[27] Cylia TIGRINE et Ouerdia Ait Ouali, “Etude et simulation des techniques MPPT d’un système photovoltaïque,” Université A. MIRA-BEJAIA, BEJAIA, 2019.

[28] M.BOUDJEMA et N. BELHAOUAS, “Commande d’une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones et implémentation sur FPGA et DSP,” thèse d’ingénieur, E.N.P, alger, 2007.

[29] larbaoui khaled, “Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques par l’algorithme d’optimisation Meta-heuristique ‘Artificial Bee Colony’ (ABC),” mémoire master , Université SAAD DAHLAB , blida, 2017.

[30] A. F. Boehinger, “ Self-adaptive DC converter for solar spacecraft power supply,” IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, 1968, 1968.

[31] Ali Omar Baba, Guangyu Liu, and Xiaohui Chen, “Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods ,” School of Automation, Université Hangzhou Dianzi, Hangzhou , 2020.

[32] D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu, et F. Blaabjerg, “Improved MPPT Algorithms for Rapidly Changing Environmental Conditions ,” 12th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2006, pp.1614–1619, 30 Aug. – 1. Sept. 2006.

[33] Salaheddine Bensalem, ‘Effets De La Température Sur Les Paramètres Et Caractéristiques Des Cellules Solaire’, Université Farhat Abbas- Setif, Mémoire De Magister, 2011.

[34] A. AZIZ, ‘Propriétés Électriques Des Composants Électroniques Minéraux Et Organiques, Conception Et Modélisation D’une Chaîne Photovoltaïque Pour Une Meilleure

Exploitation De l'Énergie Solaire', Thèse De Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 2006

[35] Abdelkader Mekemeche, 'Modélisation À Deux Dimensions Des Propriétés Physiques De Cellules Solaires Au Silicium À Base De Substrat De Type N, Étude De Quelques Cas Particuliers De Cellules Innovantes', Thèse De Doctorat, L'Université Abdel Hamid Ibn Badis De Mostaganem, 2017.

[36] Hua et C. Shen, "Comparative Study Of Peak Power Tracking Techniques For Solar Storage System ", IEEE Applied Power Electronics Conference And Exposition, 15-19 February, Anaheim, CA, USA, 1998.

[37] OUMNAD, 'Électronique fondamentale' , École Mohammedia Des Ingénieurs, Site internet, [Http://Z.Oumnad.123.Fr](http://Z.Oumnad.123.Fr).

[38] V. Boitier, P. Maussion ' Recherche du maximum de puissance sur les générateurs Photovoltaïques', 1 LAAS-CNRS ; Université de Toulouse ; 7, avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France.

[39] OUABDELKADER Katia et MERSEL Houria, ' Modélisation Et Contrôle D'un système Photovoltaïque Connecté Au Réseau', Mémoire De Master, Université abderrahmane Mira De Bejaia, 2015.

[40] BELGHITRI H 'Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Hybride éolien-Photovoltaïque', Mémoire De Master, Université Kasdi merbah Ouargla, 2009.

[40] MANSOUR Salaheddine, ' Étude De Dimensionnement Optimal D'une Station Solaire Autonome En Site Isolé', Mémoire De Master, Université Abou-Bakr belkaide De Tlemcen (23 Juin 2014).