

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger



Département : Automatique

Laboratoire de commande des Processus

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en

AUTOMATIQUE

Diagnostic des défauts des panneaux photovoltaïques en utilisant le modèle SANDIA

CHIBANE Lydia

Sous la direction de Mr M.CHAKIR

-MCB-

& Mr O.BENZINEB

-MCA-

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2017

Composition du jury

Président	Mr M.TADJINE	professeur	ENP Alger
Rapporteur/promoteur	Mr M.CHAKIR	MCB	ENP Alger
Co promoteur	Mr O.BENZINEB	MCA	USD Blida
Examineur	Mr M.S.BOUCHERIT	professeur	ENP Alger

ENP 2017



Département : Automatique
Laboratoire de commande des Processus
Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en
AUTOMATIQUE

Diagnostic des défauts des panneaux photovoltaïques en utilisant le modèle SANDIA

CHIBANE Lydia

Sous la direction de Mr M.CHAKIR -MCB-
& Mr O.BENZINEB -MCA-

Présenté et soutenu publiquement le 20/06/2017

Composition du jury

Président	Mr M.TADJINE	professeur	ENP Alger
Rapporteur/promoteur	Mr M.CHAKIR	MCB	ENP Alger
Co promoteur	Mr O.BENZINEB	MCA	USD Blida
Examineur	Mr M.S.BOUCHERIT	professeur	ENP Alger

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui m'ont fourni un soutien et une confiance sans faille ; que dieu vous protège et vous garde pour moi.

A mes deux chers frères Mourad et Riadh et mes belles sœurs Imene et Sarah que j'aime tant.

A ma précieuse sœur Nawel, les mots ne peuvent résumer mon amour à ton égard et son mari Naim.

Mes neveux Anes, Abderrahmane, Yasser et Zaki.

A mes grand-mère que dieu les garde pour nous.

A mes tantes, oncles, cousins et cousines.

A tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments de joie et de bonheur.

Que toute personne m'ayant aidé, de près ou de loin, trouve ici l'expression de ma reconnaissance.

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu ALLAH, pour m'avoir donné courage, volonté et patience afin d'accomplir ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à mon tuteur encadreur Mr CHAKIR professeur à l'école nationale polytechnique d'Alger pour avoir proposé le sujet et pour l'aide précieuse et le temps qu'il m'a consacré.

Je tiens à remercier le corps professorale de l'ENP d'Alger pour sa qualité s'enseignement et le corps administratif pour ses effort afin d'accomplir les trois années au sein de l'école.

Je remercie aussi tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration de ce mémoire, en particulier ma famille pour son soutien moral et pour m'avoir aidé à finaliser ce rapport.

Merci à toutes et à tous

ملخص

احتياجات سكان العالم للطاقة في ارتفاع مستمر. الطاقة المتجددة هي الحل الأمثل لإنتاج الطاقة بما في ذلك النظم الكهربائية الضوئية لتوليد الكهرباء من ضوء الشمس. ومع ذلك، يمكن أن تحدث أخطاء أثناء تشغيل الألواح الشمسية، لذلك نحتاج الى تشخيص.

والهدف من هذا العمل هو تطوير خوارزمية لكشف وتحديد الاعطال باستخدام نموذج SANDIA لتحليل التباين من نقطة التشغيل المثلى (MPP) على أساس درجة الحرارة والإشعاع الشمسي.

الكلمات المفتاحية:

مولدات الضوئية، التشخيص، النمذجة MPP. SANDIA

Abstract :

The energy needs of the world's population are rising steadily. Renewable energies are the solution for a significant production of energy especially photovoltaic systems for the production of electricity from sunlight. However, anomalies and defects may occur during operation of the solar panels, hence the need for a diagnosis.

The objective of this work is to develop a defect detection and localization algorithm using the SANDIA model for the analysis of the variation of the optimum operating point (MPP) as a function of the temperature and solar illumination conditions.

Key words: photovoltaic generators, diagnostics, modeling, MPP, SANDIA.

Résumé :

Les besoin énergétiques de la population mondiale s'élèvent continuellement. Les énergies renouvelables sont la solution pour une production importante de l'énergie notamment les systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité à partir de la lumière solaire. Or, des anomalies et défauts peuvent survenir au cours du fonctionnement des panneaux solaire, d'où la nécessité d'effectuer un diagnostic.

L'objectif de ce travail est d'élaborer un algorithme de détection et localisation des défauts en utilisant le modèle SANDIA pour l'analyse de la variation du point de fonctionnement optimale (MPP) en fonction des conditions de température et d'éclairage solaire.

Mots clés : générateurs photovoltaïques, diagnostic, modélisation, MPP, SANDIA.

TABLE DES MATIERES

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE:.....	13
1 Généralités sur les systèmes photovoltaïques :	16
1.1 Introduction.....	16
1.2 Les semi-conducteurs :.....	16
1.2.1 Définition :.....	16
1.2.2 Types de semi-conducteurs :	17
1.2.3 La jonction PN :	18
1.3 Principe de conversion photovoltaïque:.....	18
1.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque :	19
1.3.2 Structure d'un système photovoltaïque :	19
1.3.3 La protection des générateurs photovoltaïques :	23
1.4 Les types d'installations solaires photovoltaïques :.....	24
1.4.1 Les systèmes autonomes :	25
1.4.2 Les systèmes raccordés au réseau public:.....	25
1.4.3 Installation PV raccordée au réseau avec injection d'excédent de production :.....	26
1.5 Les défauts des panneaux photovoltaïques :	26
1.6 Les méthodes de diagnostic :.....	28
1.6.1 Méthode d'imagerie infrarouge:.....	28
1.6.2 La réflectométrie :	29
1.6.3 Analyse de la puissance et énergie produite :.....	29
1.6.4 Analyse du point de fonctionnement :.....	30
1.6.5 Analyse de la caractéristique statique :.....	30
1.7 Enjeux par rapport à l'énergie solaire photovoltaïque :.....	30
1.7.1 Les avantages :	30
1.7.2 Les inconvénients :.....	31
1.8 Conclusion :.....	31
2 Modélisation des générateurs photovoltaïques :	33
2.1 Introduction :	33
2.2 La caractéristique électrique :	33

2.2.1	Les paramètres photovoltaïques :.....	34
2.2.2	Fonctionnement du « maximum power point tracking (MPPT) » : ..	35
2.3	Modèle d'une cellule photovoltaïque :	36
2.3.1	Modèle électrique d'une cellule PV :.....	36
2.3.2	Modèle empirique d'une cellule photovoltaïque :.....	39
2.4	Etat de l'art sur les différents outils de simulation des systèmes photovoltaïques:	42
2.5	Choix du modèle:	43
2.6	Groupement de cellules :	43
2.6.1	Mise en série :.....	43
2.6.2	Mise en parallèle :.....	44
2.7	Conclusion :.....	44
3	Résultats de simulation du générateur PV :.....	46
3.1	Introduction :	46
3.2	Résolution du modèle électrique du GPV en fonctionnement sain:	46
3.2.1	Méthode itérative :.....	46
3.2.2	Schéma SIMULINK :.....	47
3.2.3	Schéma SIMSCAPE :.....	49
3.2.4	Groupement de cellules PV :	51
3.3	Influence des paramètres de la cellule PV :.....	55
3.3.1	Influence de la variation du courant de saturation :	55
3.3.2	Influence de la variation du photo-courant :.....	56
3.3.3	Résistance série :.....	58
3.3.4	Résistance shunt :	59
3.4	Simulation du modèle électrique du GPV en fonctionnement défaillant : 59	
3.4.1	Défauts de mismatch et ombrage :.....	60
3.4.2	Défauts de diode bypass :.....	62
3.5	Conclusion :.....	65
	Algorithme de Détection et Localisation des défauts dans un panneau solaire :..	66
4	Algorithme de Détection et Localisation des défauts dans un panneau solaire : 67	
4.1	Introduction :	67
4.2	Choix de l'approche de diagnostic :	67
4.2.1	Différentes approches théoriques de diagnostic :	67

4.3	Elaboration de l'algorithme de DLD.....	68
4.3.1	Etape 1 : Simulation de différents scénarios de défauts :	69
4.3.2	Etape 2 : Modélisation des défauts :	71
4.3.3	Constitution de la base de connaissance :	72
4.3.4	Etape 3 : développement du DLD :.....	76
4.4	Validation de l'algorithme de diagnostic :.....	81
4.4.1	DéTECTABILITÉ :.....	81
4.4.2	localisation :.....	81
4.4.3	Sensibilité :.....	81
4.4.4	Robustesse :	81
4.5	Conclusion :.....	82
	Conclusion générale et perspective :	84
	Bibliographie.....	85

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1 :

Figure I 1. Représentation des bandes d'énergie dans un atome.....	16
Figure I 2. Semi-conducteurs extrinsèques.	18
Figure I 3. Principe de fonctionnement de la jonction PN.	18
Figure I 4. Transformation de l'énergie solaire en énergie électrique	19
Figure I 5. Structure d'un système PV	19
Figure I 6. Structure d'une cellule PV	20
Figure I 7. Schéma représentant le fonctionnement d'une cellule PV	21
Figure I 8. Cellule au silicium monocristallin (noir) et cellule au silicium poly cristallin	21
Figure I 9. Module photovoltaïque	22
Figure I 10. Exemple de structure d'un champ PV	22
Figure I 11. Module PV protégé par des diodes Bypass	24
Figure I 12. Exemple d'architecture de diode bypass dans un module PV (overlap)	24
Figure I 13. Schéma d'un champ PV	24
Figure I 14. Installation PV autonome.....	25
Figure I 15. Installation PV raccordée au réseau	26
Figure I 16. Installation PV raccordée au réseau avec injection d'excédent de production	26
Figure I 17. Exemple de détection des défauts en utilisant l'imagerie infrarouge	29
Figure I 18.Principe de réflectométrie pour localiser un défaut dans un string PV	29
Figure I 19. Allure de la caractéristique statique en présence d'un défaut	30

Chapitre 2 :

Figure II 1. Caractéristique I-V d'une cellule PV	33
Figure II 2. Définition du point de fonctionnement d'un GPV	35
Figure II 3. Point de puissance maximale dans un système PV	36
Figure II 4. Schéma équivalent du modèle à une diode à 3 paramètres	36
Figure II 5. Schéma équivalent du modèle à une diode à 4 paramètres.	37

Figure II 6. Schéma équivalent du modèle à une diode à 5 paramètres.	38
Figure II 7. Schéma équivalent du modèle de BISHOP.....	38
Figure II 8. Schéma équivalent du modèle à deux diodes à sept paramètres.....	39
Figure II 9. Illustration de la courbe I-V avec les cinq points fournis par le modèle SANDIA	40
Figure II 10. Association série de cellules PV	44
Figure II 11. Association en parallèle de cellules PV	44

Chapitre 3 :

Figure III 1. Algorithme pour déterminer la caractéristique I-V d'une cellule PV	46
Figure III 2. Caractéristique I(V) d'une cellule PV.....	47
Figure III 3. Courbe P(V) d'une cellule PV.....	47
Figure III 4. Schéma en bloc représentant l'équation caractéristique du modèle de BISHOP.....	48
Figure III 5. Courbes caractéristiques I(V) et P(V) obtenues après simulation sous SIMULINK.....	49
Figure III 6. Schéma électrique complet utilisé pour la simulation du modèle de BISHOP pour une cellule PV sous SIMSCAPE	49
Figure III 7. Schéma équivalent du modèle de BISHOP pour une cellule PV sous Simscape (composant B de la figure (III.6)).....	50
Figure III 8. Caractéristique électrique I(V) d'une cellule PV	50
Figure III 9. Courbe P(V) d'une cellule PV.....	51
Figure III 10. Caractéristique électrique I(V) résultante lors de la mise en série de plusieurs cellules	51
Figure III 11. Courbes P(V) de différents groupements en série de plusieurs cellules PV	52
Figure III 12. Caractéristique I-V d'une association parallèle de cellules	52
Figure III 13. Courbe P-V d'une association parallèle de cellules.....	52
Figure III 14. Comparaison entre le circuit équivalent et une chaîne de cellules en série	53
Figure III 15. Schéma du GPV choisi	54
Figure III 16. Courbes caractéristiques du GPV choisi.....	54
Figure III 17. Influence du courant de saturation inverse sur la caractéristique I(V) de la cellule PV	56
Figure III 18. Influence de l'éclairement solaire sur les courbes caractéristiques de la cellule.....	57
Figure III 19. Influence de la température sur la caractéristique électrique I-V d'une cellule.....	57
Figure III 20. Influence de la température sur la puissance délivrée par la cellule	58
Figure III 21. Influence de la résistance série sur la courbe I(V) d'une cellule PV	58

Figure III 22. Influence de la résistance série sur la courbe P(V) d'une cellule PV	58
Figure III 23. Influence de la résistance shunt sur la courbe I-V d'une cellule PV	59
Figure III 24. Influence de la résistance shunt sur la courbe P-V d'une cellule PV	59
Figure III 25. Courbe I(V) d'une cellule PV ombragée à des cas différents	61
Figure III 26. Courbe I(V) d'un groupement de 18 cellules en série à des cas d'ombrage différents.	61
Figure III 27. Courbe I(V) d'un module de 72 cellules en série à des cas d'ombrage différents	61
Figure III 28. Influence du défaut mismatch série sur la courbe I-V du module PV	62
Figure III 29. Influence du défaut mismatch parallèle sur la courbe I-V d'un groupe de 18 cellules en série	62
Figure III 30. Schéma boc d'un groupe de cellules PV avec la diode BP défailante [1]	63
Figure III 31. Influence du court-circuit des diodes bypass sur la courbe I-V du module PV	63
Figure III 32. Influence de l'inversion de diodes bypass sur la courbe I-V du module PV	64
Figure III 33. Utilité de la diode bypass lors d'un fonctionnement défailant du module.	64
Figure III 34. Influence du claquage de diode 4 DBP sur la courbe I-V du module PV	65

Chapitre 4 :

Figure IV 1. Différentes méthodes de diagnostic	67
Figure IV 2. Schéma global décrivant les étapes de construction de l'algorithme DLD	69
Figure IV 3. Courbes des variations des conditions météorologiques	70
Figure IV 4. Simulation des défauts et sauvegarde de données	71
Figure IV 5. Modélisation des défauts (identification des paramètres)	72
Figure IV 6. Critère de CHAUVENET	74
Figure IV 7. Déroulement de l'algorithme de DLD	77
Figure IV 8. Évolution de la puissance maximale du défaut D1	80
Figure IV 9. Évolution de la puissance maximale du défaut D2	80
Figure IV 10. Évolution de la puissance maximale du défaut D3	80
Figure IV 11. Évolution de la puissance maximale du défaut D4	81

Liste des tableaux

Chapitre 1

Tableau I 1. Principaux défauts et anomalies rencontrés dans un GPV.	27
Tableau I 2. classification des défauts dans un champ PV	28

Chapitre 3

Tableau III 1. Paramètres de simulations du module PV	54
Tableau III 2. Caractéristiques techniques du module PV de 72 cellules en série	55
Tableau III 3. Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule.....	60

Chapitre 4 :

Tableau VI 1. Définition de la sévérité des défauts	70
Tableau VI 2. Champs d'estimés d'un défaut bypass (court-circuit).....	72
Tableau VI 3. Champ de paramètres estimés pour un défaut de type mismatch série de faible sévérité	73
Tableau VI 4. Champ de paramètres estimés pour un défaut de type mismatch série de sévérité importante	73
Tableau VI 5. Table de CHAUVENET.....	74
Tableau VI 6. Champ d'estimés pour un défaut d'ombrage de faible sévérité.....	75
Tableau VI 7. Paramètres relatifs aux différents défauts du module	75
Tableau VI 8. Coefficients des différents défauts pour le test de l'algorithme	78
Tableau VI 9. Les valeurs de Δ pour le défaut D1	78
Tableau VI 10. Les valeurs de Δ pour le défaut D2.....	79
Tableau VI 11. Les valeurs de Δ pour le défaut D3.....	79
Tableau VI 12. Les valeurs de Δ pour le défaut D4.....	79

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

PPV : Panneau Photovoltaïque.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

SC : Semi-conducteur.

BC : Bande de Conduction.

ZCE : zone de charge d'espace.

AC : Courant alternatif (Alternatif Courant en anglais).

DC : Courant continu (Direct Courant en anglais).

MPP : Point de puissance maximale (Maximum Power Point en anglais)

MPPT : poursuite de point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)

BP: bypass.

DBP: diode bypass.

DLD: Détection et Localisation des Défauts.

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE:

Qu'est-ce que l'énergie ?

Le mot énergie vient du mot latin « energia » qui signifie « force en action » puisqu'elle est l'élément essentiel et indispensable pour toute activité humaine ; l'énergie est le moteur du monde.

Aujourd'hui, la population mondiale augmente rapidement et la production d'énergie est devenue un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des pays industrialisés ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. [1] Les énergies utilisées sont polluantes et finiront par être épuisées, d'où la tendance à utiliser ce qu'on appelle « énergies renouvelables » qui proviennent d'une ressource naturelle permanente et inépuisable.

En plus d'être une source inépuisable, l'utilisation des énergies renouvelables engendre très peu de déchets et n'émettent jamais de CO₂ qui contribue à l'effet de serre ; ceci représente la solution idéale pour satisfaire nos besoins en énergie.

En Algérie, la production et consommation d'énergie y compris dans le secteur d'électricité, sont tirées essentiellement des hydrocarbures. La politique actuelle du gouvernement national vise à diversifier les ressources en énergie afin de se libérer des hydrocarbures, en investissant dans les énergies renouvelables notamment en énergie solaire PV. Avec une superficie de plus de deux millions de mètres carrés dont 84% est un Sahara exposé en permanence au soleil, l'Algérie est un véritable réservoir en énergie solaire.

Les systèmes photovoltaïques permettent la production d'énergie électrique à partir de la lumière solaire. Or, comme tous les autres processus industriels, un système photovoltaïque peut être soumis, au cours de son fonctionnement, à différents défauts et anomalies conduisant à une baisse de la performance du système et voire à l'indisponibilité totale du système. Toutes ces conséquences défavorables vont évidemment réduire la productivité de l'installation, et donc réduire le profit de l'installation, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal. Permettre de diagnostiquer finement et de faire de la détection et de localisation de défauts dans une installation PV réduit les coûts de maintenance et surtout augmente la productivité en augmentant le taux de disponibilité des installations en veillant à ce que leur rendement soit optimal. [2]

Le travail dans ce mémoire sera porté sur le diagnostic des systèmes PV du côté DC (générateur PV) en proposant une nouvelle approche pour faire la localisation et la détection des défauts qui repose sur l'utilisation du modèle SANDIA.

Dans ce manuscrit, le sujet sera rapporté dans quatre chapitres

Un premier chapitre pour rappeler les généralités sur les systèmes photovoltaïques. Une présentation sur les composants des systèmes PV sera abordée ainsi que le principe de la conversion d'énergie solaire en énergie électrique en définissant l'effet photovoltaïque. Une présentation des défauts qui peuvent affecter le générateur PV sera faite en plus des différentes méthodes utilisées pour le diagnostic.

Un deuxième chapitre pour présenter les différents modèles de la cellule photovoltaïques, afin de les utiliser pour la construction de l'algorithme de détection et localisation des défauts du panneau solaire. Les modèles électriques seront énumérées en premier, et qui représentent les circuits électriques équivalents de la cellule PV à utiliser sous le package SimPowerSystem de MATLAB ; suivis des modèles empiriques et plus précisément le modèle de SANDIA qui s'est avéré fiable pour notre étude.

Un troisième chapitre qui rapporte les différents résultats de simulation du fonctionnement sain et défaillant du panneau solaire choisi pour l'algorithme.

INTRODUCTION

Et enfin, un quatrième chapitre rapportant les différentes étapes pour la construction de l'algorithme de détection et localisation des défauts dans un module de 72 cellules en série. Ainsi que les différents essais pour tester l'algorithme afin de le valider.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

CHAPITRE I

1 Généralités sur les systèmes photovoltaïques :

1.1 Introduction

Durant ces dernières années, la croissance du besoin en énergie, ainsi que la pollution provenant de l'utilisation des énergies fossiles poussent le grand public à utiliser les énergies renouvelables. Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque est l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelable, qui présente un dénouement à nos problèmes de production d'énergie. De plus, cette énergie semble la plus prometteuse, non polluante et inépuisable. [3]

Ce chapitre sera en guise d'introduction au domaine du photovoltaïque, les notions les plus importantes seront présentées dans cette partie.

Au début, on définit les semi-conducteurs le matériau de base de construction des cellules PV chargées de la production de l'électricité. Ensuite, sera déroulée la description du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie photovoltaïque ainsi que la présentation des différents composants du système chargé de la conversion (système photovoltaïque) afin de comprendre le fonctionnement de la cellule PV. Enfin, ce chapitre se termine par la présentation des défauts les plus courants qui peuvent survenir au cours du fonctionnement du système PV ainsi que les différentes méthodes de diagnostic utilisées pour détecter et/ou localiser ces défauts.

1.2 Les semi-conducteurs :

Il est utile d'introduire les notions importantes des semi-conducteurs pour la compréhension du fonctionnement des cellules PV dans ce qui suit.

1.2.1 Définition :

Dans le modèle classique, un corps est isolant s'il ne contient pas d'électrons mobiles et il est conducteur si les électrons peuvent circuler librement dans le réseau cristallin. Ce modèle a été remplacé par le modèle quantique de l'atome, qui permet une représentation commode du comportement électrique d'un solide, comme le montre la figure I.1.

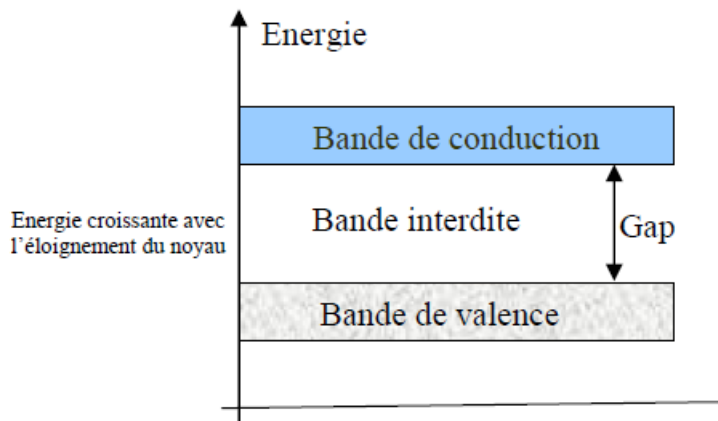


Figure I 1. Représentation des bandes d'énergie dans un atome

Les matériaux sont classés en fonction de leurs conductions du courant électrique comme suit :

- Pour un isolant, la bande de valence est saturée alors que la bande de conduction est vide. Ces deux bandes sont séparées par une bande interdite dont la hauteur (gap) est de plusieurs électrons-volts d'où la non conduction du courant électrique.
- le conducteur n'a pas de bande interdite et les électrons de valence se déplacent librement en occupant partiellement la bande de conduction, ce qui permet le passage du courant électrique.

CHAPITRE I

- Entre les deux, il y'a les semi-conducteurs qui possèdent une bande interdite de largeur si faible (de l'ordre de quelques électrons-volts) qu'un apport d'énergie relativement modeste (rayonnement ou agitation thermique) suffit de libérer des électrons de valence qui passent alors à la bande de conduction, rendant ainsi le milieu conducteur.

Les principaux éléments semi-conducteurs utilisés dans l'industrie photovoltaïque sont les éléments du groupe IV du tableau périodique des éléments et plus précisément le Silicium qui a quatre électrons de valence.

1.2.2 Types de semi-conducteurs :

On distingue deux types de semi-conducteurs :

1.2.2.1 *Semi-conducteur intrinsèques :*

Un semi-conducteur est dit intrinsèque si le cristal n'est pas pollué par des impuretés qui changeraient la concentration en porteurs libres. A basse température, il y'a une faible agitation et donc le matériau se comporte comme un corps isolant ; un faible apport d'énergie, l'électron se libère vers la bande de conduction et laisse un vide « un trou », ce dernier crée une force d'attraction électrostatique pour les électrons de covalence voisins, si l'un d'eux se piège alors il laissera à son tour un vide. [4]

1.2.2.2 *Semi-conducteur extrinsèques (dopé):*

En introduisant des impuretés dans un matériau SC, on modifie le nombre de porteurs libres (électrons ou trous) ; d'après la nature de ces impuretés, on peut discerner deux types de dopages qui sont :

- **Dopage type N :**

On introduit dans la matrice de Silicium des impuretés pentavalentes (Phosphore, Arsenic, Antimoine). Chaque atome d'impureté (donneur) a un électron de valence en plus. Ce dernier est peu lié au noyau et passe aisément à la BC par un faible apport d'énergie et donc la conductivité augmente. Ainsi le donneur devient ionisé positivement et la concentration en électrons libres sera plus grande et ces derniers seront des porteurs majoritaires ; le comportement intrinsèque persiste toujours mais ne prend pas le dessus. (Voir Figure I.2.a)

- **Dopage type P :**

Dans ce cas, on introduit dans la matrice de Silicium des impuretés trivalentes (Bore, Aluminium...) auxquelles il manque un électron de valence pour assurer les quatre liaisons covalentes. Un faible apport d'énergie suffit pour qu'un électron de Silicium voisin soit capté par l'impureté, il y'aura formation de trous qui seront majoritaires, et les atomes d'impureté (accepteurs) seront ionisés négativement. (Voir Figure I.2.b)

CHAPITRE I

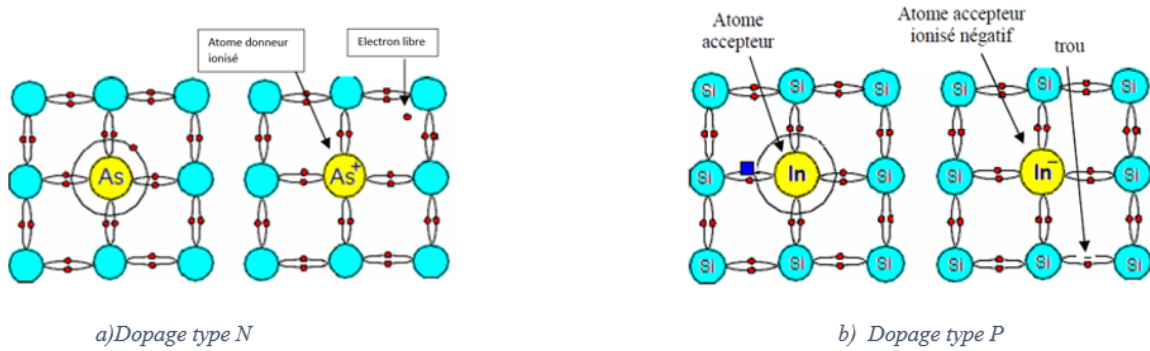


Figure I 2. Semi-conducteurs extrinsèques.

1.2.3 La jonction PN :

La jonction PN est l'accolement de deux SC de natures différentes, l'un dopé N et l'autre dopé P.

Lors de cet assemblage, les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de jonction ; où les porteurs disparaissent et ne reste plus que les ions des atomes d'impuretés et donc existera une charge positive de la région N au bord de la jonction et une charge négative dans la région P au bord de la jonction; l'ensemble forme la Zone de charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique interne entre les deux, de N vers P. Ce champ empêche les charges majoritaires de se diffuser de part et d'autre pour se recombiner. (Figure I.3)

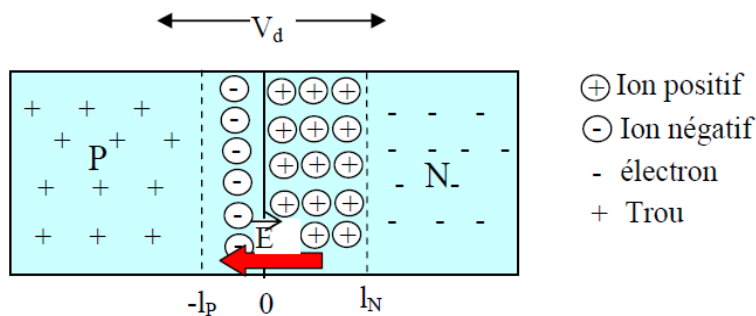


Figure I 3. Principe de fonctionnement de la jonction PN.

La formation d'une jonction PN à partir du dopage des atomes de Silicium représente le principe de base des cellules PV. Ce principe est énoncé dans la suite de ce chapitre.

1.3 Principe de conversion photovoltaïque:

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et, malgré une atténuation conséquente lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m^2 dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m^2 lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. Grâce à celle-ci, il est possible de produire trois types d'énergie : énergie calorifique avec des installations solaires thermiques, énergie électrique avec des installations solaires photovoltaïques et le solaire à concentration thermodynamique. [5] Dans ce qui suit, on s'intéresse seulement à la filière du photovoltaïque.

CHAPITRE I

1.3.1 L'énergie solaire photovoltaïque :

Le panneau solaire photovoltaïque utilise le soleil comme source de lumière en transformant en électricité l'énergie des photons arrivant à la surface de la terre. La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque). Cette transformation (effet photovoltaïque) est sans action mécanique, sans bruit, sans pollution et sans combustible. [5]

Ce processus est illustré à la Figure I.4.



Figure I 4. Transformation de l'énergie solaire en énergie électrique [6]

1.3.2 Structure d'un système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque se charge de la transformation de l'énergie provenant des photons lumineux solaires en énergie électrique exploitable pour diverses applications. Ce système est constitué d'un générateur PV pour la production de courant électrique continu, de convertisseurs, de batteries pour le stockage d'énergie et de régulateurs de charge. (Voir Figure I.5)

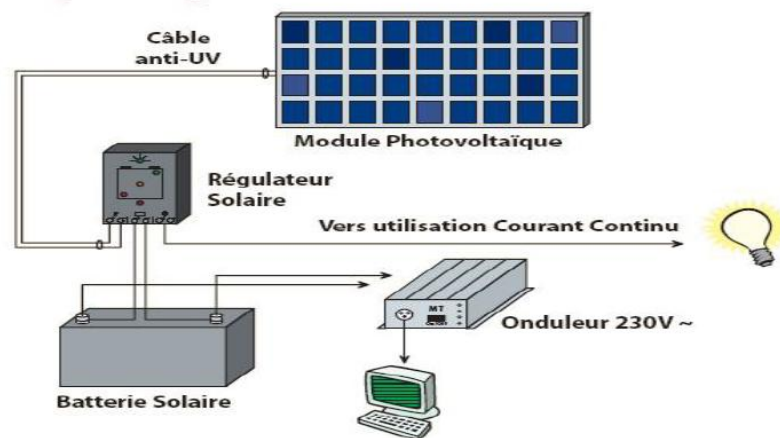


Figure I 5. Structure d'un système PV

1.3.2.1 Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique est la cellule photovoltaïque. [2]

a) La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de Silicium réalisé à partir de deux couches l'une dopée N et l'autre dopée P créant ainsi une jonction PN. [7] C'est le plus petit constituant d'un système photovoltaïque se chargeant de la production de l'électricité à partir de l'énergie solaire et ceci en se reposant sur le principe de l'effet photovoltaïque.

➤ Composants d'une cellule photovoltaïque :

CHAPITRE I

Les cellules sont constitués de :

- Une fine couche semi-conductrice, en général du Silicium.
- Une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- Une grille conductrice sur le dessus (cathode) et un métal conducteur sur le dessous (anode). [5] (voir Figure I.6)

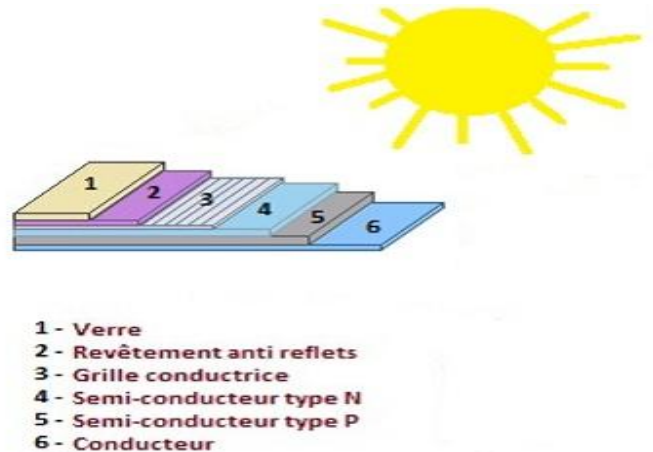


Figure I 6. Structure d'une cellule PV

➤ L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français « A.Becquerel » en 1839. C'est un phénomène physique qui se manifeste dans les cellules PV lorsque celles-ci sont exposées à la lumière du soleil afin de produire de l'électricité à partir de rayonnements solaire. Cette transformation d'énergie est basée sur trois mécanismes :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau (semi-conducteur) constituant le dispositif (cellule PV) ; le choix des SC dans l'industrie photovoltaïque est dû au fait qu'ils aient la caractéristique d'absorption facile de lumière pour permettre l'écoulement du courant.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique ce qui correspond à la création des paires électrons/trous dans le matériau SC.
- Collecte des particules générées dans le dispositif : un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons/trous créées est nécessaire ; d'où l'utilisation d'une jonction PN dans les cellules PV. [5]

Ainsi, la cellule est exposée aux rayons solaires et les photons absorbés vont transférer leur énergie aux électrons qui sont arrachés de leurs atomes en laissant des trous derrière. Au voisinage de la jonction, le champ électrique va contribuer à séparer les charges positives et négatives, les électrons vers la zone N et les trous vers la zone P. Les électrons, pour se recombiner avec les trous, sont obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous créant ainsi un courant électrique qu'on emploie pour diverses utilisations. (voir Figure I.7)

CHAPITRE I

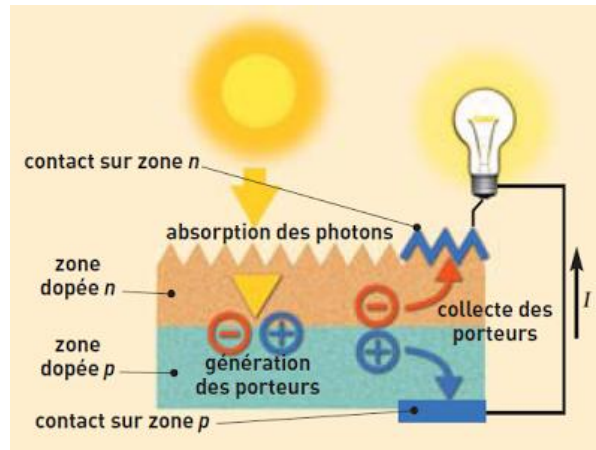


Figure I 7. Schéma représentant le fonctionnement d'une cellule PV

➤ Technologies des cellules photovoltaïques :

Selon la nature des cellules de silicium, on en distingue trois types :

- Cellules monocristallines :

On appelle cellule monocristalline une cellule issue d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Ce genre de cellule est rond, parfois presque carré, et possède une couleur uniforme. Les panneaux à cellules monocristallines offrent un rendement de 14 à 18%. Leur méthode de production restant complexe et coûteuse (il faut beaucoup d'énergie pour obtenir du cristal de silicium pur), ces panneaux sont donc chers. [8]

- Cellules poly cristallines :

Les cellules poly cristallines sont issues d'un bloc de silicium cristallisé en cristaux multiples. Elles ont souvent un aspect rectangulaire. Les panneaux solaires à cellules poly cristallines ont un rendement plus faible que ceux à cellules monocristallines (de 11 à 15%). Leur coût de production étant moins élevé, elles offrent le meilleur rapport qualité/prix. [8]

- Cellules amorphes :

Les cellules photovoltaïques amorphes sont produites à partir d'un « gaz de silicium », qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Cette technique permet d'utiliser des couches très minces de silicium. Les cellules photovoltaïques amorphes sont moins coûteuses à produire que les précédentes, mais leur rendement n'est que de 7 à 9%. [8]



Figure I 8. Cellule au silicium monocristallin (noir) et cellule au silicium poly cristallin

b) Module photovoltaïque :

CHAPITRE I

Une seule cellule photovoltaïque génère une faible puissance non adaptée aux applications courantes; afin de produire une puissance exploitable, plusieurs cellules sont regroupées en série (afin d'augmenter la tension pour un même courant) ou en parallèle (afin d'augmenter le courant pour une même tension).

Un groupement série de ces composants élémentaires constitue un « module photovoltaïque » ; cet assemblage doit être protégé pour rendre le panneau apte à un usage en extérieur. Les cellules sont en effet des objets fragiles et sensibles à la corrosion, qu'il convient de protéger mécaniquement et de mettre à l'abri du climat rude (humidité, variations de température, etc.) [9]

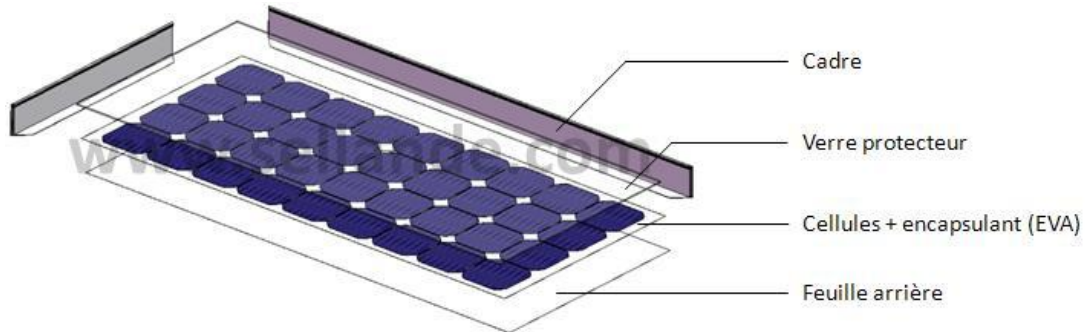


Figure I 9. Module photovoltaïque

c) Champ photovoltaïque:

Pour une puissance de plusieurs centaines de Kilowatts voir des Mégawatts, il est nécessaire d'assembler les modules PV suivant une architecture connue en électricité (série/parallèle). [9] L'assemblage en série des modules forme des strings PV qui à leur tour sont assemblés en parallèle pour former un champ PV.

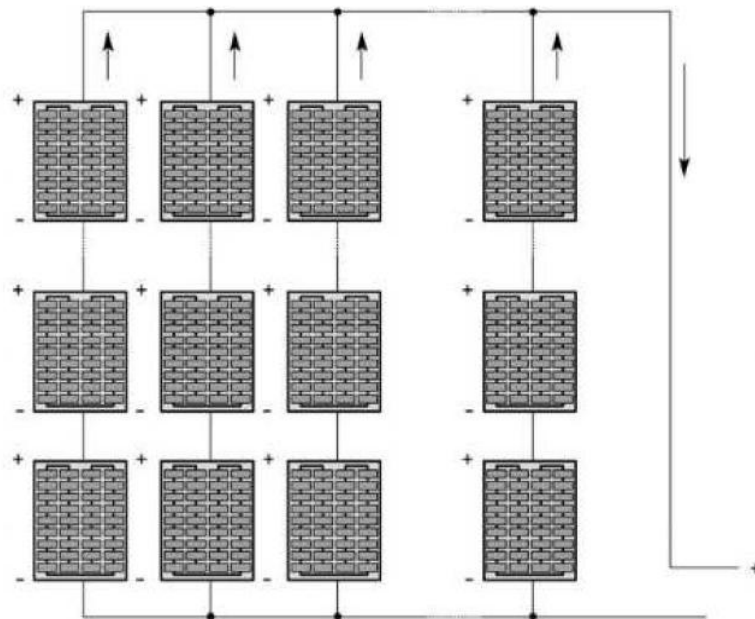


Figure I 10. Exemple de structure d'un champ PV [9]

Ainsi, le terme GPV peut désigner un des composants cités ci-dessus qui se chargent de la production d'énergie électrique (module, string, panneau).

CHAPITRE I

1.3.2.2 Les batteries :

Une batterie solaire stocke l'énergie électrique pour la restituer quand la demande électrique est supérieure (nuit, ensoleillement insuffisant) à ce qui est fourni par les panneaux photovoltaïques, soit pour garantir une fourniture quasi-permanente.

1.3.2.3 Les régulateurs de charge :

C'est le lien entre GPV et batterie, ils protègent les batteries contre la surcharge ou les décharges excessives. C'est un élément essentiel pour la durée de vie de batterie. [6]

1.3.2.4 Les systèmes de conversion :

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le panneau PV et la charge (sans stockage avec charge en continu, qu'on appelle convertisseur continu-continu), soit entre la batterie et la charge (qu'on appelle onduleur ou convertisseur continu alternatif). [6]

a) Convertisseur continu-continu :

Le convertisseur continu-continu, dit DC/DC a pour but de contrôler l'écoulement de l'énergie entre le panneau solaire et la charge.

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal. Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT acronyme de « maximum power point tracking » (qu'on verra dans le deuxième chapitre). [6]

b) Convertisseur continu-alternatif :

L'onduleur (aussi appelé convertisseur continu alternatif ou DC/AC) est un élément essentiel d'une installation photovoltaïque. C'est une machine d'électronique de puissance qui transforme l'énergie électrique DC issue des modules PV en énergie électrique AC, directement utilisable localement ou injectée sur le réseau. Lors de l'utilisation locale soit dans une installation autonome (non raccordée au réseau public d'électricité), ces onduleurs génèrent un signal de 220V d'amplitude et de 50 Hz de fréquence de manière à créer un réseau AC. Ils peuvent être combinés à un régulateur de charge et des batteries pour stocker de l'énergie pour une éventuelle utilisation lors de la baisse de production du panneau PV.

1.3.3 La protection des générateurs photovoltaïques :

Pour garantir une durée de vie importante du GPV, des protections sont nécessaires pour éviter des pannes destructives liées à l'association des cellules en série/parallèle.

1.3.3.1 Les diodes bypass :

Un module PV est divisé en plusieurs groupes de cellules PV en série, chaque groupe est connecté en antiparallèle avec une diode appelée « diode bypass ». Dans son bon état, la diode bypass est passante lorsque la tension à ses bornes est négative et est bloquée dans le cas contraire ; ainsi lorsque l'éclairement n'est pas homogène, la somme des tensions des cellules protégées par une diode bypass pouvant être négative (et donc la tension aux bornes de la diode l'est également) le groupe est isolé à la conduction de la diode, évitant ainsi l'apparition de points chauds (hot spot) et la destruction de cellules mal éclairées. [2]

Généralement, chaque groupement de 18 cellules PV en série dans un module est protégé par une diode bypass comme le montre la figure (I.11) ; certes, il existe d'autres architectures de connexion de ces diodes, comme celle montrée à la figure (I.12), mais qui sont peu utilisées à cause de la difficulté de fabrication. Une meilleure protection exige que

CHAPITRE I

chaque cellule PV soit connectée à une diode bypass mais ceci est également peu utilisé à cause de son coût élevé.

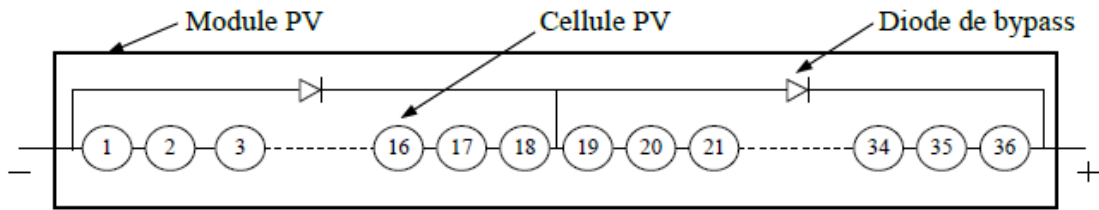


Figure I 11. Module PV protégé par des diodes Bypass [2]

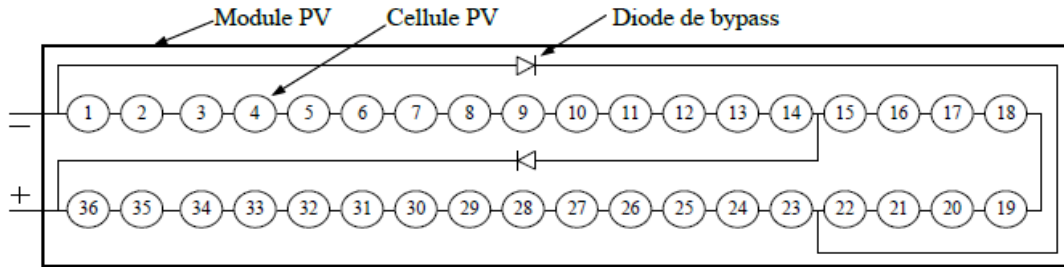


Figure I 12. Exemple d'architecture de diode bypass dans un module PV (overlap) [2]

1.3.3.2 Les diodes anti-retour :

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres ; cela conduit donc à une baisse de production et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string (voir figure I.13). [10] auquel s'ajoute le fait qu'elle évite le risque que la batterie ne débite sur le module pendant la nuit, cette diode est indispensable pour garantir le fonctionnement normal du panneau solaire.

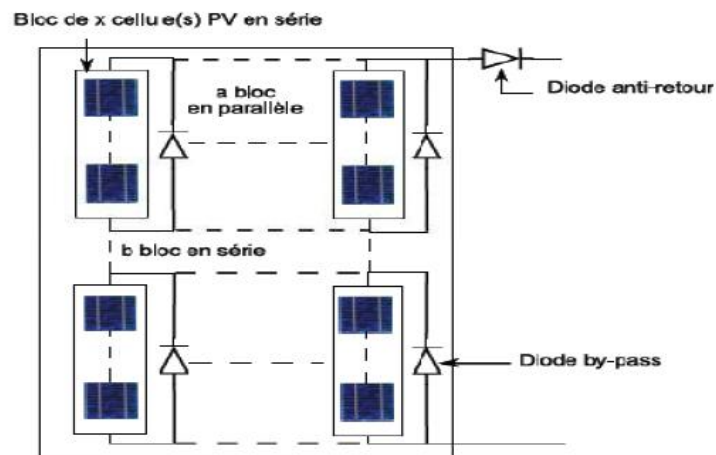


Figure I 13. Schéma d'un champ PV [5]

1.4 Les types d'installations solaires photovoltaïques :

Il y'a lieu de distinguer trois types de système PV

CHAPITRE I

1.4.1 Les systèmes autonomes :

Les panneaux solaires autonomes doivent leur nom au fait qu'ils ne soient pas raccordés au réseau d'électricité public. Ces installations sont surtout populaires pour les habitations éloignées du service public pour lesquelles le raccordement au réseau serait trop onéreux. Elles requièrent alors un dimensionnement adéquat de façon à répondre à tous les besoins électriques de la maison. [11] Un tel système est illustré à la figure I.14

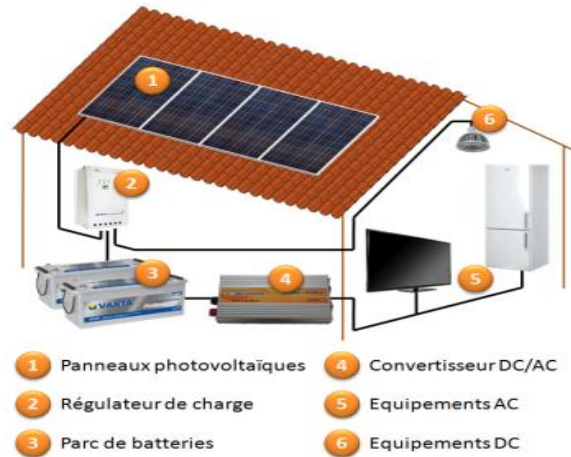


Figure I 14. Installation PV autonome

L'installation photovoltaïque autonome est équipée :

- d'une batterie qui stocke l'énergie produite pendant le jour, et en délivre au besoin ;
- d'un convertisseur DC/AC afin d'alimenter certains récepteurs fonctionnant en courant alternatif ;
- d'un régulateur de charge afin d'assurer la durabilité de la batterie.

1.4.2 Les systèmes raccordés au réseau public:

Ici les panneaux solaires sont directement raccordés au réseau d'électricité public. Dans le cas de systèmes connectés au réseau, il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en courant alternatif synchronisé avec le réseau. Pour effectuer cette conversion, on utilise un onduleur. Le rendement typique d'un onduleur est d'environ 95%. Il existe de différentes puissances et les onduleurs sont conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques. L'onduleur possède également une fonction de découplage du réseau qui empêche d'injecter du courant sur le réseau lorsque celui-ci n'est pas en fonctionnement et une fonction de protection contre les surtensions. [6]

Si ce branchement est fait par un consommateur, l'installation électrique est équipée d'un double compteur, qui d'une part mesure la quantité d'électricité que le client consomme et d'autre part ce qu'il produit avec son installation. La différence entre les deux est ensuite remboursée. Ce type d'installation est schématisé dans la figure I.15

CHAPITRE I

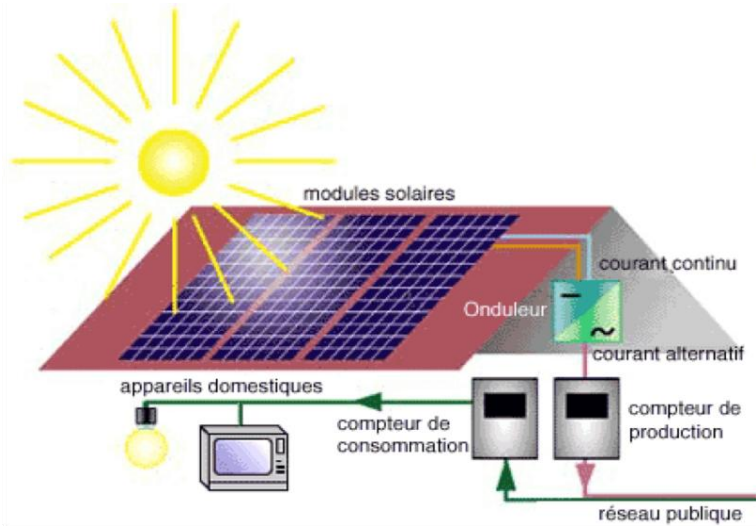


Figure I 15. Installation PV raccordée au réseau

1.4.3 Installation PV raccordée au réseau avec injection d'excédent de production :

Une telle approche permet de produire sa propre électricité en périodes ensoleillées et d'acheminer son excédent d'énergie vers le réseau public, auprès duquel le client s'approvisionne au besoin. [11]

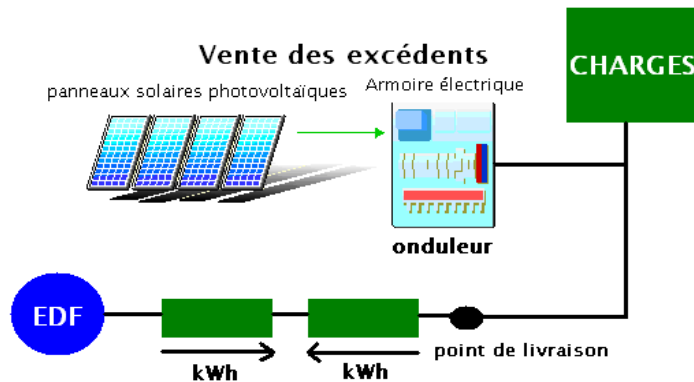


Figure I 16. Installation PV raccordée au réseau avec injection d'excédent de production

La figure I.16 montre le schéma d'une installation PV raccordée au réseau avec injection d'excédent de production, qui montre la présence de deux compteurs l'un pour comptabiliser la quantité d'électricité que le propriétaire des PPV rachète au fournisseur d'énergie et l'autre pour mesurer l'énergie renvoyée au réseau lors d'une production dépassant la consommation.

1.5 Les défauts des panneaux photovoltaïques :

Au cours de son fonctionnement, une installation PV peut être éventuellement soumise à différents défauts et conditions de fonctionnement anormales. [2]

Le tableau suivant montre les défauts les plus importants et les plus fréquents classés selon le composant du système PV affecté :

- générateur,
- boîte de jonction : contenant les éléments de protections lors de la mise en parallèle de plusieurs strings ;
- câblage et connecteur : pour assurer l'association de modules en série ;
- diodes de protection.

CHAPITRE I

Elément du système PV	Origine de défauts et anomalies
Générateur PV	<ul style="list-style-type: none"> - Feuilles d'arbre, déjections, pollution, sable, neige etc. - Détérioration des cellules, fissure, échauffement des cellules - Pénétration de l'humidité, dégradation des interconnexions, corrosion des liaisons entre les cellules - Modules de performances différentes - Module arraché ou cassé - Modules court-circuités, modules inversés
Boîte de jonction	<ul style="list-style-type: none"> - Rupture du circuit électrique - Court-circuit du circuit électrique - Destruction de la liaison - Corrosion des connexions
Câblage et connecteur	<ul style="list-style-type: none"> - Circuit ouvert - Court-circuit - Mauvais câblage (module inversé) - Corrosion des contacts - Rupture du circuit électrique
Diode de protection (diode bypass et diode anti-retour)	<ul style="list-style-type: none"> - Destruction des diodes - Absence ou non fonctionnement de diodes - Inversion de la polarité des diodes au montage, diode mal connectée

Tableau I 1. Principaux défauts et anomalies rencontrés dans un GPV. [2]

Les défauts présentés dans le Tableau (I.1) ont été classés suivant l'emplacement de leur apparition dans une installation PV (panneaux, connexion, câblage, système de protection). Par contre, généralement, les défauts sont classés selon l'étape à laquelle ils interviennent et s'ils peuvent modifier le comportement du composant de cette étape (cellule, groupe de cellules, modules, strings, champ). Tenant compte de cette hiérarchie, la nouvelle classification de défauts est illustrée dans le Tableau (I.2) en trois colonnes. La première énumère les composants. La deuxième concerne la nature des différents défauts intervenant dans les étapes. Et la dernière donne la dénomination de chaque catégorie de défauts. [2]

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination des défauts
Cellule	<ul style="list-style-type: none"> Module arraché ou cassé Pylônes, cheminée, sable, neige etc. Echauffement des cellules Dégradation des interconnexions Fissure Corrosion des liaisons entre cellules Modules de performances différentes Détérioration des cellules Pénétration de l'humidité. 	Défaut de mismatch et ombrage
Groupes de cellules	<ul style="list-style-type: none"> Destruction des diodes Absence de diodes 	Défaut de diode bypass

CHAPITRE I

	Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	
Modules	Modules court-circuités Inversion de polarité du module Modules shuntés	Défaut de module
Strings	Rupture du circuit électrique Destruction de la liaison Corrosion des connexions Corrosion des contacts Court-circuit du circuit électrique Module déconnecté	Défaut de connectique
Champs	Destruction des diodes Absence de diodes Inversion de la polarité des diodes Diode mal connectée Diode court-circuitée	Défaut de diode anti retour

Tableau I 2. Classification des défauts dans un champ PV [2]

1.6 Les méthodes de diagnostic :

Lors de la recherche des méthodes de diagnostic, il y'a lieu de différencier ses deux fonctions : la détection et la localisation. Certaines méthodes utilisées ou proposées effectuent uniquement la fonction de détection. Tandis que d'autres effectuent la fonction de localisation après que la détection de défauts a été réalisée.

Dans ce qui suit, la présentation des différentes méthodes de diagnostic utilisées couramment en industrie ainsi que des méthodes proposées en littérature [2]:

1.6.1 Méthode d'imagerie infrarouge:

Il existe plusieurs méthodes pour diagnostiquer le défaut au niveau de cellule PV. Le défaut principal souvent constaté à ce niveau est la fissure de la cellule. On peut citer comme méthodes : les essais mécaniques de flexion, l'imagerie par photoluminescence et électroluminescence...

Par contre au niveau du module PV, la méthode de l'imagerie d'infrarouge (caméra thermique) est largement appliquée. Cette méthode repose sur le fait que tous les matériels émettent un rayonnement infrarouge sur une plage de longueur d'onde qui dépend de la température du matériau. En examinant la distribution de la température au niveau du module, des anomalies (si elles ont lieu) peuvent être localisées. Quelques succès de la localisation de défauts utilisant la caméra thermique ont été reportés : courant de fuite dans la cellule, augmentation de la résistance de la connectique entre les cellules, échauffement anormal des cellules et conduction de la diode de bypass. [2]

CHAPITRE I

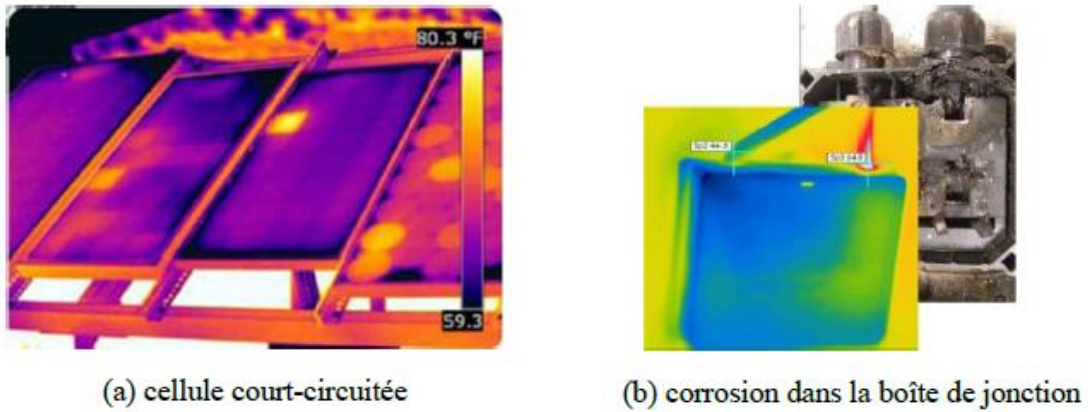


Figure I 17. Exemple de détection des défauts en utilisant l'imagerie infrarouge

1.6.2 La réflectométrie :

La méthode de réflectométrie est une méthode de diagnostic qui consiste à envoyer un signal dans le système ou le milieu à diagnostiquer. Ce signal se propage selon la loi de propagation du milieu étudié et lorsqu'il rencontre une discontinuité, une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. L'analyse du signal réfléchi permet de déduire des informations sur le système ou le milieu considéré.

Un signal de type d'échelon ou d'impulsion est injecté dans le string PV qui consiste en une série de modules connectés par des câbles. Des études expérimentales ont confirmé la possibilité de localiser la position de défaut de type « circuit ouvert », « court-circuit » et « augmentation d'impédance » dans le string. [2]

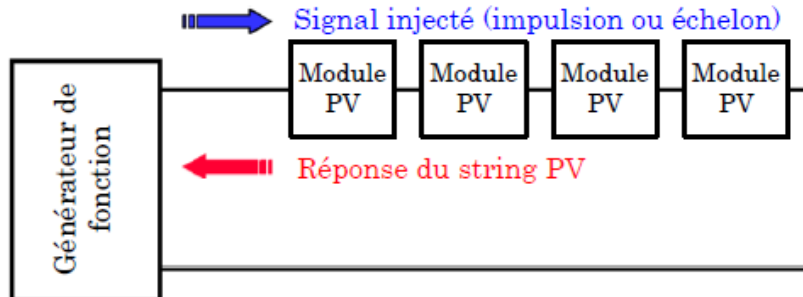


Figure I 18. Principe de réflectométrie pour localiser un défaut dans un string PV

1.6.3 Analyse de la puissance et énergie produite :

De nombreuses études reposent sur l'analyse de la puissance et de l'énergie produite par le champ PV pour faire la détection et la localisation de défauts qui y sont apparus. La puissance ou l'énergie actuelle (mesurée) est comparée à celle attendue et lorsqu'une déviation importante a lieu, on considère qu'il y a un défaut. Par contre, une meilleure localisation de défauts peut être accomplie dans ces travaux grâce à une analyse plus approfondie sur les grandeurs mesurées. L'analyse mentionnée consiste à générer des attributs supplémentaires de la chute de la puissance ou de l'énergie produite telles que : la durée, l'amplitude, la fréquence et les instants de la chute. Ces mêmes attributs sont également prédéterminés pour les différents défauts considérés. Lors de leur comparaison, le défaut dont la valeur des attributs considérés est la plus proche de celle déduite des grandeurs mesurées est considéré comme le défaut responsable de la chute. [2]

CHAPITRE I

1.6.4 Analyse du point de fonctionnement :

Outre la comparaison de la puissance ou de l'énergie produite actuelle et celle attendue, la comparaison du point de la puissance maximale actuel (courant et tension correspondant à la puissance maximale) et celui attendu peut apporter plus d'information sur l'état du système PV. La comparaison relationnelle entre ces courants et entre ces tensions donne deux couples de valeur binaire (0 ou 1). Suivant la combinaison de ces deux couples, la nature des problèmes du champ PV peut être identifiée. Les quatre familles de problèmes sont les suivantes :

- modules défectueux dans un string ;
- string défectueux ;
- famille de défauts non discriminables : ombrage, erreur de MPPT, vieillissement ;
- fausses alarmes. [2]

1.6.5 Analyse de la caractéristique statique :

Un champ photovoltaïque peut être décrit par sa caractéristique statique courant/tension (caractéristique I-V), une telle caractéristique au temps normal soit au fonctionnement sain du champ est illustrée dans la figure I.19.

La modification d'une telle caractéristique peut être espérée lorsqu'il y a un changement de l'état du champ PV provoqué par un changement de la condition de fonctionnement (ensoleillement et température) ou par une apparition d'un ou de plusieurs défauts dans le champ. [2]

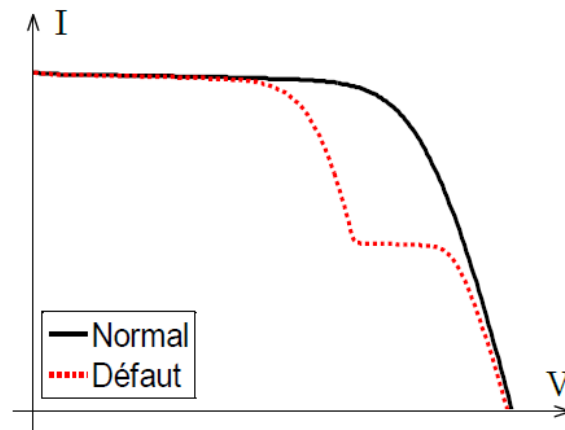


Figure I 19. Allure de la caractéristique statique en présence d'un défaut

1.7 Enjeux par rapport à l'énergie solaire photovoltaïque :

1.7.1 Les avantages :

Les panneaux solaires présentent de nombreux avantages :

- D'un point de vue écologique, les panneaux solaires sont une énergie propre non polluante pour l'environnement. Aucun gaz à effet de serre n'est rejeté et il n'y a aucun déchet radioactif produit.
- L'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole qui sont pourtant encore plus utilisés que le solaire.
- Pour les endroits isolés ou les petites installations, rien de tel que les panneaux solaires pour les rendre autonomes.
- Les panneaux solaires, une fois installés, nécessitent peu d'entretien l'énergie est produite sans action de l'homme.
- De plus, les panneaux solaires sont encore peu utilisés et ont une forte marge d'évolution et un avenir prometteur

CHAPITRE I

- Les panneaux solaires peuvent représenter un très bon investissement pour des particuliers.
- Les panneaux solaires restent silencieux et ne dérangent nullement les riverains, ce qui est contraire des autres sources d'énergie. [6]

1.7.2 Les inconvénients :

Malgré les nombreux avantages que présentent les panneaux solaires, reste que cette technologie présente des inconvénients comme toute autre technologie qu'on cite dans ce qui suit :

- Le principal inconvénient des panneaux solaires est son coût très élevé. Pour des productions importantes d'énergie, ce système n'est pas rentable. Il faut environ 3 ans pour que le panneau produise l'énergie qui a été nécessaire à sa construction, or un panneau a une durée de vie moyenne de seulement 25 ans!... Alors que l'énergie à base nucléaire est moins chère et produit plus sur une plus courte durée.
- D'autre part, les quantités d'énergie produites sont liées au climat. Pour qu'un panneau solaire fonctionne il faut du soleil. Ainsi pendant les jours de mauvais temps et la nuit ceux-ci ne produisent pas: on a ici une perte de temps conséquente. De plus, c'est en été que les panneaux solaires produisent le plus (longues journées) or nos besoins d'énergie sont plus faibles en été qu'en hiver... Ceci amènerait à devoir stocker l'énergie non-utilisée, ce qui est compliqué et cher.
- Enfin, de grandes superficies sont nécessaires pour pouvoir placer des panneaux solaires. Elles doivent, de plus, être placées stratégiquement (sur certaines longitudes de la Terre) pour recevoir un maximum d'énergie du soleil. Ainsi, les zones équatoriales seraient les plus adéquates mais ne sont pas forcément favorables à de telles installations. [6]

1.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu essentiellement des généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque.

D'abord, une brève définition a été apportée au sujet des semi-conducteurs dont on a vu l'utilité dans l'industrie photovoltaïque pour la construction des cellules, en exploitant différentes propriétés de ces matériaux. Puis, nous avons présenté la structure du système photovoltaïque en général ; et celle de la cellule en particulier pour la compréhension du principe de fonctionnement de ce composant chargé de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique utilisée pour diverses besoins domestiques ou industriels ; le processus de cette conversion mis en œuvre au niveau des cellules c'est l'effet photovoltaïque. Ensuite, nous avons identifié les différents défauts qui peuvent survenir au cours du fonctionnement du panneau solaire, ces défauts ont été classés, en vue de leur modélisation dans le chapitre suivant pour des fins de diagnostic des panneaux PV, comme suit :

- Défauts de mismatch et d'ombrage ;
- Défauts de diodes bypass ;
- Défauts de module ;
- Défauts de diode anti-retour.

Enfin, plusieurs méthodes de diagnostic utilisées pour la détection et la localisation des défauts ont été rapportées à la fin de ce chapitre.

CHAPITRE II

Modélisation des générateurs photovoltaïques

CHAPITRE II

2 Modélisation des générateurs photovoltaïques :

2.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons traité les notions essentielles dans le domaine du photovoltaïque ; et nous avons constaté qu'un générateur PV peut être affecté par différents défauts qui diminuent de sa performance à la production d'énergie électrique. Pour analyser son potentiel et optimiser sa production, l'étude de son comportement sain et défaillant est indispensable. A cet effet, on a recours à l'outil de simulation dont le modèle d'une cellule PV est nécessaire pour reproduire le fonctionnement du GPV.

Les informations sur le fonctionnement du GPV sont fournies par la courbe courant-tension de ce dernier, dite caractéristique statique que nous verrons en plus de détails en début du chapitre.

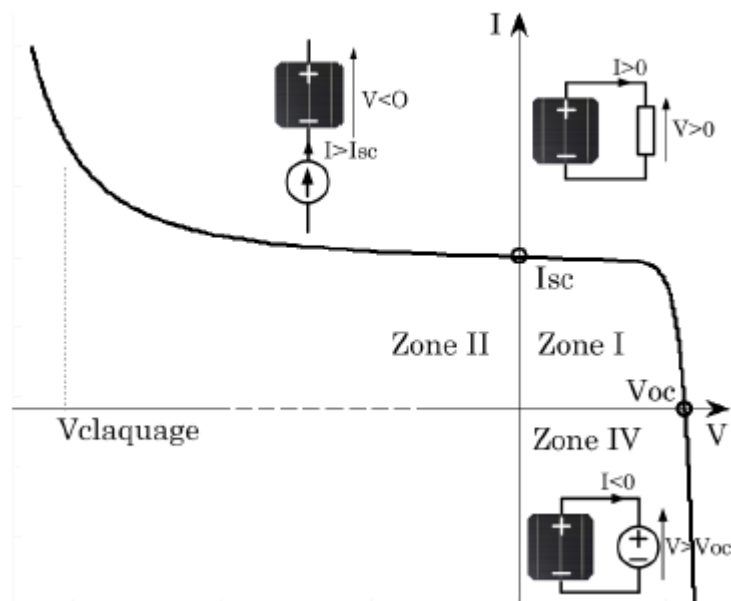
Puis, nous reporterons les différents modèles de la cellule PV proposés et choisir le modèle adéquat à l'application étudiée qui sera utilisé en simulation afin de reproduire la caractéristique statique du générateur PV lors de ses différents fonctionnements; en plus de tous les éléments essentielles dont on aura besoin pour la construction de l'algorithme de détection et localisation des défauts.

2.2 La caractéristique électrique :

La caractéristique électrique est la courbe courant-tension de la cellule PV, elle synthétise toutes les propriétés électriques de ce composant et possède la capacité de fournir des informations sur son état.

La cellule PV est normalement conçue pour fonctionner comme un générateur en fournissant l'énergie électrique convertie de l'énergie solaire à une charge. Par contre, il se peut que cette même cellule, lorsqu'elle est interconnectée avec d'autres cellules, fonctionne comme un récepteur en absorbant de l'énergie débitée par les autres cellules. [2]

La caractéristique électrique d'une cellule PV montrant ses différents régimes de fonctionnement est illustrée dans la Figure II.1



A partir de cette courbe, on remarque deux points de fonctionnements essentiels soit « I_{sc} » et « V_{oc} » qui sont respectivement le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert.

CHAPITRE II

Le courant de court-circuit correspond au courant quand la cellule est court-circuitée. Ce courant de court-circuit est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière, et pour une surface quelconque, ce courant de court-circuit dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule. La tension de circuit ouvert est la tension aux bornes de la cellule quand il n'y a pas de courant. Sa valeur est de l'ordre de 0.6 V pour la cellule de type cristallin. Ces deux points délimitent le fonctionnement de la cellule en trois zones différentes :

- La zone I de la Figure II-1 correspond au fonctionnement en générateur de la cellule avec ($0 < I < I_{sc}$) et ($0 < V < V_{oc}$). C'est le fonctionnement dit normal de la cellule dans lequel elle débite la puissance produite à la charge.
- La zone II correspond au fonctionnement en récepteur de la cellule avec ($I > I_{sc}$) et ($V < 0$). Quand le courant traversant la cellule est forcé par un circuit extérieur à dépasser son courant de court-circuit, la cellule produit une tension négative à ses bornes. La croissance en courant provoquera l'endommagement de la cellule si la tension à ses bornes atteint une limite : la tension de claquage ($V_{claquage}$). L'étude expérimentale sur différentes cellules de type cristallin a montré que la valeur de la tension de claquage varie entre -10 V et -30 V.
- La zone IV correspond de nouveau au fonctionnement en récepteur de la cellule, mais avec cette fois-ci ($I < 0$) et ($V > V_{oc}$). Quand la tension aux bornes de la cellule est amenée à dépasser sa tension de circuit ouvert, un courant inverse circule dans la cellule. Si ce courant inverse dépasse une limite, la cellule sera irrémédiablement endommagée. Cette limite n'est pas facile à définir car elle dépend de la technologie, des phénomènes internes à la circulation du courant dans la cellule en défaut. [2]

2.2.1 Les paramètres photovoltaïques :

Comme cité précédemment, la caractéristique I-V fournit toutes les informations sur le fonctionnement du GPV car les paramètres le caractérisant, appelés paramètres photovoltaïques, peuvent être déduits de la caractéristique.

Ces paramètres sont :

2.2.1.1 Courant de court-circuit

C'est le courant obtenu en court-circuitant la cellule PV soit à $V=0$, il est proportionnel à la surface de la cellule qui capture la lumière, et pour une surface quelconque, ce courant de court-circuit dépend de l'intensité de lumière absorbée par la cellule

2.2.1.2 Tension de circuit ouvert

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie. Elle dépend de l'éclairement de la cellule.

2.2.1.3 Puissance maximale (P_{mpp}) :

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairement dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{mpp}) pour un point de fonctionnement P_{mpp} (V_{mpp}, I_{mpp}) de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{sc} et tension comprise entre 0 et V_{oc}). [6]

2.2.1.4 Facteur de forme (FF)

Un paramètre important est souvent utilisé à partir de la caractéristique I(V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un GPV : c'est le facteur de remplissage ou fill factor (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la

CHAPITRE II

cellule P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{sc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. [5]

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \quad (II.1)$$

2.2.1.5 Le rendement η

Le rendement des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{sc} \cdot V_{oc}}{P_{in}} \quad (II.2)$$

Le rendement de conversion est un paramètre essentiel ; en effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule. [5]

2.2.2 Fonctionnement du « maximum power point tracking (MPPT) » :

2.2.2.1 Point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque :

Le courant et la tension générés par le panneau PV dépendent de la charge à ses bornes, cette charge à sa propre caractéristique, par exemple pour une résistance R c'est une droite de pente égale à la valeur de cette résistance; l'intersection de cette caractéristique avec celle du PPV c'est le point de fonctionnement de ce GPV comme le montre la figure (II.2)

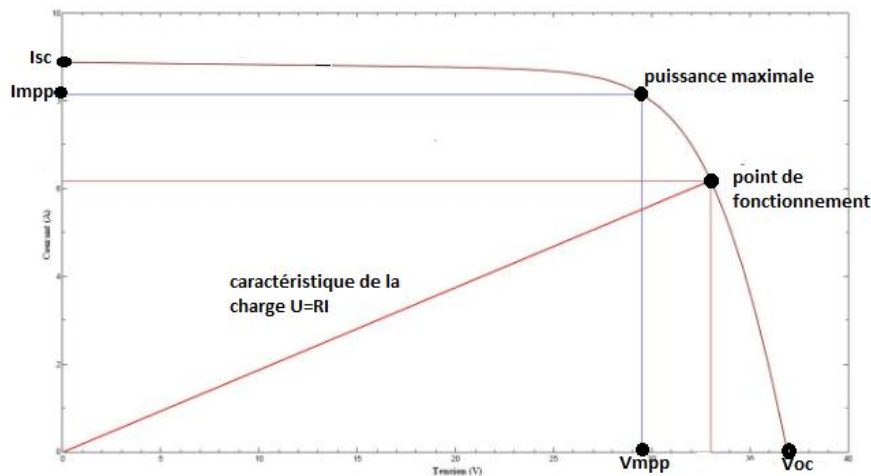


Figure II 2. Définition du point de fonctionnement d'un GPV

2.2.2.2 Principe du MPPT :

La production de l'énergie électrique est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Donc, le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque ne coïncide pas toujours avec le point de puissance maximale (voir Figure II.3). On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point de puissance maximale, appelé « maximum power point tracking » (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Par conséquent, plusieurs travaux ont porté sur les systèmes photovoltaïques. Ils ont essayé de développer des algorithmes permettant d'extraire le maximum d'énergie convertie par le panneau et alors qui permet un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. [3]

CHAPITRE II

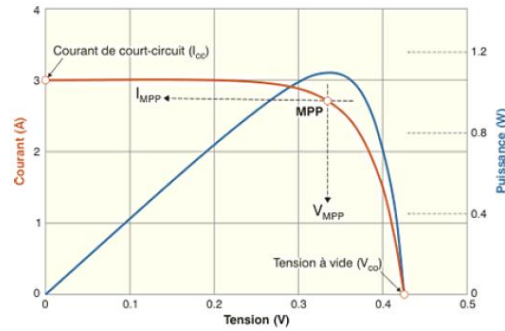


Figure II 3. Point de puissance maximale dans un système PV

2.3 Modèle d'une cellule photovoltaïque :

Expérimenter les cellules PV dans le laboratoire est une tâche longue et coûteuse. Pour surmonter ce problème, les techniques de simulation sont utilisées pour simuler le comportement des cellules PV dans différentes conditions et pour divers objets. Plusieurs logiciels de simulation sont disponibles. Ainsi, l'étude réalisée conduit à des informations précieuses. [12] Pour ce faire, on doit disposer de modèles afin de reproduire la caractéristique électrique d'une cellule.

2.3.1 Modèle électrique d'une cellule PV :

Dans les différents modèles électriques, la cellule est schématisée par un circuit électrique de composants élémentaires (résistances, source de courant, diode) où l'on peut déduire l'équation électrique du circuit facilement.

Le modèle est établi pour une seule cellule et est généralisé à des composants de plus grande puissance (module PV, string PV, champ PV) en le considérant comme un groupement série-parallèle de plusieurs cellules.

2.3.1.1 Modèle à une diode :

a) Modèle idéale à 3 paramètres :

C'est le modèle le plus simple pour une cellule PV et est représenté par le schéma de la figure II.4. Le modèle est composé d'une source de courant I_{ph} et d'une diode connectée en parallèle représentant respectivement l'ensoleillement reçu par la cellule et la jonction PN de la cellule.

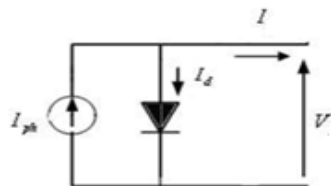


Figure II 4. Schéma équivalent du modèle à une diode à 3 paramètres

A partir du schéma électrique de la Figure II.4, et en utilisant les lois de base de l'électricité (loi d'ohm et loi de KIRCHHOFF), on déduit l'équation (II.3)

$$I = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.3})$$

I_{ph} : Courant photonique.

I_d : Courant de la diode.

La caractéristique de la diode est donnée par l'équation (II.4)

CHAPITRE II

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.4})$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

$V_t = a \frac{k_b T_c}{q}$: Tension thermique de la diode. Avec : k_b c'est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), T_c la température de la cellule, q c'est la charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C) et « a » le facteur d'idéalité de la diode (de 1 à 2).

Donc l'équation caractéristique complète associée au modèle idéal de la cellule PV est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.5})$$

b) Modèle à 4 paramètres :

Le modèle précédent ne tient pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion de l'énergie lumineuse. Dans ce modèle, par rapport au précédent, on rajoute un paramètre qui est la résistance R_s , comme le montre la figure (II.5).

Cette résistance tient compte de la résistance du matériau de celle des électrodes et du contact semi-conducteur métal. Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation caractéristique I-V (équation II.6) sont le courant photonique I_{ph} , la résistance série R_s , et les deux caractéristiques de la diode (équation II.4) I_0 et n .

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données de fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I(V) pour différents points de fonctionnement (donnés par les fabricants). [5]

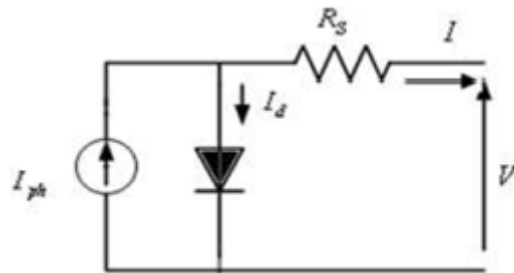


Figure II 5. Schéma équivalent du modèle à une diode à 4 paramètres.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.6})$$

c) Modèle à 5 paramètres :

Dans le modèle à 5 paramètres, une résistance parallèle R_{sh} , pour représenter les courants de fuites, est mise en parallèle avec la diode comme le représente la figure II.6 ; et donc ce modèle fait intervenir cinq paramètres, comme le montre l'équation II.7 du courant débité dans la charge.

CHAPITRE II

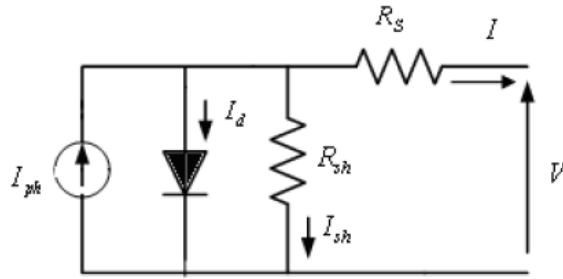


Figure II 6. Schéma équivalent du modèle à une diode à 5 paramètres.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.7})$$

d) Modèle de BISHOP :

Le modèle à une diode à cinq paramètres représente relativement bien une cellule en fonctionnement normal (zone I de la caractéristique de la figure II.1). Néanmoins, il ne prend pas en compte l'effet d'avalanche de la cellule. L'étude d'un champ PV en fonctionnement défaillant, au cours duquel la cellule peut subir différents régimes de fonctionnement, exige un modèle qui peut décrire la totalité de la caractéristique de la cellule.

L'effet d'avalanche de la cellule est pris en considération dans le modèle de Bishop en ajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire $M(V_1)$ en série avec la résistance shunt comme on peut le voir dans la Figure II.7. Ce multiplicateur correspond au dernier terme de l'équation (II.8) qui donne la relation entre le courant (I) et la tension (V) d'une cellule PV. [2]

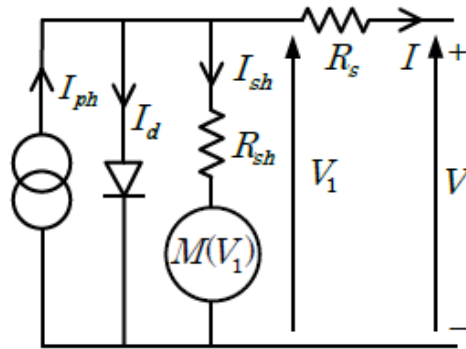


Figure II 7. Schéma équivalent du modèle de BISHOP

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \underbrace{\left[1 + k \left(1 - \frac{V+R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right]}_{M(V_1)} \quad (\text{II.8})$$

C'est une équation à deux inconnues (I et V) et à 8 paramètres qui sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_0 : Courant de saturation de la diode.

V_t : Tension thermique de la diode.

CHAPITRE II

R_s : Résistance série (représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules).

R_{sh} : Résistance parallèle ou shunt (représente tous les chemins traversés par les courants de fuite).

k : Coefficient de réglage de BISHOP (~ 3.4 à 4)

V_b : Tension de claquage de la cellule (entre -10V et -30V)

n : Coefficient de réglage de BISHOP (~ 0.1).

2.3.1.2 Modèle à deux diodes :

Le fonctionnement d'une cellule peut être également représenté par le modèle de la Figure II.8 ou il y a deux diodes mises en parallèle avec la source de courant photonique.

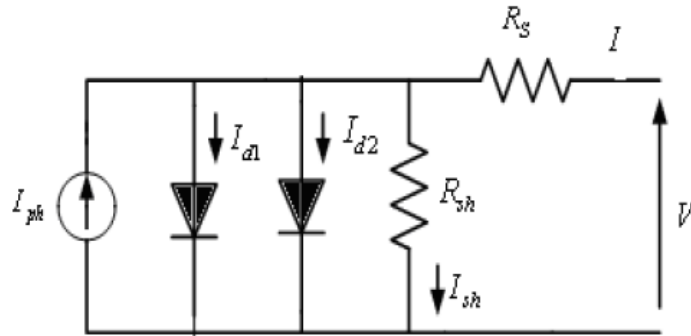


Figure II 8. Schéma équivalent du modèle à deux diodes à sept paramètres.

Ce modèle électrique est régi par l'équation caractéristique de la forme :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_{t1}} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_{t2}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.9})$$

C'est une équation à deux inconnues (I et V) et 7 paramètres qui sont :

I_{ph} : Courant photonique.

I_{01} et I_{02} : Courant de saturation des deux diodes.

V_{t1} et V_{t2} : tensions thermiques des deux diodes.

R_s : Résistance série.

R_{sh} : Résistance parallèle.

2.3.2 Modèle empirique d'une cellule photovoltaïque :

2.3.2.1 Modèle de SANDIA :

Le test et la modélisation des performances des modules PV dans l'environnement extérieur sont compliqués par l'influence d'une variété de facteurs interactifs liés à l'environnement et à la physique des cellules PV. Afin de concevoir, mettre en œuvre et surveiller efficacement les performances des systèmes PV, un modèle de performance doit être capable de séparer et quantifier l'influence de tous les facteurs significatifs. [13]

Le Sandia National Laboratory (Albuquerque, USA) a élaboré un modèle de performance de capteur PV, qui peut être utilisé pour diverses causes :

CHAPITRE II

- Conception (dimensionnement) d'un champ PV pour une application donnée en fonction de la puissance voulue et/ou de la production d'énergie sur une base horaire, mensuelle ou annuelle.
- Détermination de la puissance du champ PV en traduisant les paramètres en fonction d'une condition de référence standard.
- Surveiller la performance du champ réel par rapport à la performance prédite sur la durée de vie du champ PV et ceci peut aider à diagnostiquer les problèmes de performance du champ.

La forme du modèle donnée par les équations (II.10) à (II.19) est utilisée lors du calcul de puissance et énergie attendues produites par un module, en supposant que les coefficients de performance du module sont prédéterminés et que les informations de ressource solaire soient disponibles. Les trois points classiques sur la courbe courant-tension (I-V) : courant de court-circuit, la tension en circuit ouvert, et le point maximum de puissance, sont donnés par les quatre premières équations. La figure (II.9) illustre ces trois points, avec deux points supplémentaires qui définissent mieux la forme de la courbe. [13]

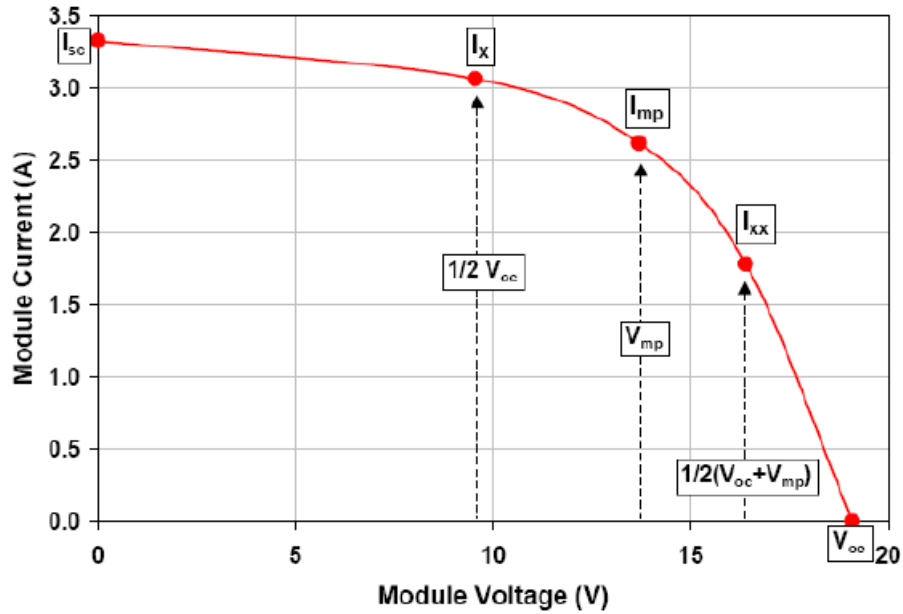


Figure II.9. Illustration de la courbe I-V avec les cinq points fournis par le modèle SANDIA

$$I_{sc} = I_{sc0} \cdot f_1(AM_a) \cdot \left\{ \frac{E_b \cdot f_2(AOI) + f_d \cdot E_{diff}}{1000} \right\} \{1 + \alpha_{I_{sc}}(T_c - T_0)\} \quad (II.10)$$

$$I_{mpp} = I_{mpp0} \cdot \{C_0 \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + \alpha_{I_{mpp}}(T_c - T_0)\} \quad (II.11)$$

$$V_{oc} = V_{oc0} + N_s \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + \beta_{V_{oc}}(E_e)(T_c - T_0) \quad (II.12)$$

$$V_{mpp} = V_{mpp0} + C_2 \cdot N_s \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + C_3 \cdot N_s \cdot \{\delta(T_c) \cdot \ln(E_e)\}^2 + \beta_{V_{mpp}}(E_e) \cdot (T_c - T_0) \quad (II.13)$$

$$P_{mpp} = I_{mpp} \cdot V_{mpp} \quad (II.14)$$

$$FF = P_{mpp} / (I_{sc} \cdot V_{oc}) \quad (II.15)$$

Avec :

$$E_e = G/1000 \quad : \text{L'irradiation effective} \quad (II.16)$$

CHAPITRE II

$$\delta(T_c) = a \cdot k_b (T_c + 273.15) / q : \text{Voltage thermique pour une cellule} \quad (\text{II.17})$$

Et :

- k_b : c'est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).
- q c'est la charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).
- a : le facteur d'idéalité de la diode (de 1 à 2).
- T_c : la température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$)
- T_0 : température de cellule sous conditions de test standards (25°C).
- les paramètres $I_{sc0}, I_{mpp0}, V_{oc0}, V_{mpp0}$ représentent respectivement les grandeurs courant de court-circuit, courant du MPP, tension de circuit ouvert et la tension au MPP sous les conditions de test standards ($G=1000$ W/m² et $T_0=25$ $^{\circ}\text{C}$).
- N_s : le nombre de cellules en série dans le module PV.
- AM_a : la densité de l'air.
- AOI : angle d'incidence d'irradiation solaire.
- $f_1(AM_a)$ et $f_2(AOI)$: Des fonctions empiriques pour quantifier l'influence sur le courant de court-circuit du module de variation du spectre solaire et les pertes optiques dues à l'angle d'incidence solaire.
- C_0, C_1, C_2, C_3 : Paramètres de SANDIA à définir expérimentalement.
- Les différents coefficients de température $\alpha_{Isc}, \alpha_{Impp}, \beta_{Voc}(E_e)$ et $\beta_{Vmpp}(E_e)$ sont généralement donnés par le fabricant sinon ils peuvent être définis expérimentalement.

Les deux point supplémentaires sont définis par les équations (II.18) et (II.19) ; le quatrième point I_x est défini à une tension égale à la moitié de la tension de circuit ouvert et le cinquième I_{xx} à une tension à mi-chemin entre V_{mpp} et V_{oc} . Les cinq points fournis par le modèle de base de la courbe I-V et peuvent être utilisés pour régénérer une proche approximation de la courbe entière. [13]

$$I_x = I_{x0} \cdot \{C_4 \cdot E_e + C_5 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + (\alpha_{Isc})(T_c - T_0)\} \quad (\text{II.18})$$

$$I_{xx} = I_{xx0} \{C_6 \cdot E_e + C_7 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + (\alpha_{Impp})(T_c - T_0)\} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

- I_{x0}, I_{xx0} les valeurs des courants I_x, I_{xx} mesurées sous les conditions de test standards.
- Les paramètres C_4, C_5, C_6, C_7 sont définis expérimentalement.

Ce modèle est un modèle empirique et qui a été validé et approuvé après plusieurs tests sur les PPV commercialisés de technologies différentes et aussi en comparant avec les résultats d'autres laboratoires.

2.3.2.2 Modèle de CENERG :

Le modèle développé par le Centre d'énergétique se base sur le modèle à une diode. Un bilan électrique sur ce schéma permet d'établir une expression donnant le courant I en fonction de la tension V disponible aux bornes du capteur. [6]

$$I = P_1 \cdot G \cdot \{1 + P_2(G - G_{ref}) + P_3(T_c - T_0)\} - \left\{ P_4 \cdot T_c^3 \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{k \cdot T_c}\right) \right\} \cdot \left\{ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{A n k T_c}\right) - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

I : intensité aux bornes du capteur

V : tension aux bornes du capteur

G : rayonnement incident (W/m²)

T_c : température de jonction du capteur PV,

CHAPITRE II

$P_1, P_2, P_3, P_4, R_s, R_{sh}$: paramètres à déterminer expérimentalement (R_s et R_{sh} étant les résistances séries et shunt des cellules)

n : paramètre d'ajustement, est égal au nombre de cellules en série (36 par exemple) pour un module PV parfait, et est supérieur dans la pratique

G_{ref} : rayonnement de référence (1000 W/m²)

T_c : température de jonction de référence (25 °C)

E_g : gap du matériau, vaut 1.12eV pour le silicium cristallin.

2.3.2.3 Modèle de MADISON :

Le modèle « CENERG » se base sur le modèle électrique des cellules appelé « Modèle à une diode ». Par contre, le modèle « Madison » développé propose une méthode qui permet de calculer les performances du module PV à partir des données fournies par les constructeurs. L'équation qui donne l'intensité I en fonction de la tension V aux bornes du capteur est la suivante [6]:

$$I = I_{ph} - I_s \left\{ \exp \left[\frac{q}{nkT_c} (V + R_s I) \right] - 1 \right\} - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.21})$$

Avec :

I : intensité aux bornes du capteur (A)

V : tension aux bornes du capteur (V)

I_{ph} : photo-courant (A)

I_s : courant de saturation inverse de diode (A)

n : paramètre d'ajustement

T_c : température de jonction

R_s : résistance série

R_{sh} : résistance shunt.

2.4 Etat de l'art sur les différents outils de simulation des systèmes photovoltaïques:

Ces outils peuvent être classifiés en trois grandes catégories :

a) La première catégorie est dédiée à la simulation d'un système électronique ou d'un système de puissance en général. Dans ces outils, le modèle d'une cellule PV peut être créé à partir d'un arrangement des composants de base (diode, résistance...). Ce modèle de la cellule est dupliqué pour avoir le nombre souhaité de cellules, qui sont ensuite interconnectées pour constituer l'application étudiée. [2] on en cite certains :

- **PSIM** : qui est un package de simulation de circuits électroniques de puissance. On peut utiliser des blocs simples tels que le contrôleur PID, le filtre passe-bas, la logique ET / OU / NON, etc. pour concevoir le système de contrôle .
- **LabVIEW** : c'est un environnement de développement intégré conçu spécifiquement pour les ingénieurs et les scientifiques. Native LabVIEW est un langage de programmation graphique (G) qui utilise un modèle de flux de données au lieu de lignes séquentielles de code texte.
- **Simscape de MATLAB** : (SimPower) est un package de Simulink où l'on peut utiliser différents composants électroniques (diodes, sources de courant, résistances...)

b) La deuxième famille d'outils de simulation est celle dédiée spécifiquement à l'application photovoltaïque. Cependant, la plupart d'entre eux est dédiée à la simulation d'un champ PV en fonctionnement normal convenable pour divers objectifs tels que le dimensionnement, l'analyse de la production, l'évaluation économique etc. [2]

Parmi ces logiciels, on cite :

- **PVsyst** : Un des logiciels photovoltaïques professionnels indispensables pour les bureaux d'études, architectes, installateurs, qui souhaitent estimer la production photovoltaïque d'un générateur et dimensionner l'ensemble des composants du système : panneaux, onduleurs, câblage... Utile pour le dimensionnement et l'analyse de la production d'un champ PV.

CHAPITRE II

- **SolarPro** : Il permet aux utilisateurs de visualiser l'ombrage et de configurer la couverture du module ; car il est utilisé pour créer des modèles 3D de systèmes photovoltaïques et les effets d'ombrage de chaque objet créé dans Solar Pro peuvent être visualisés sur une base.
- **HOMER Pro** : HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Ressources) est un logiciel de simulation et d'optimisation destiné à l'étude d'installations de production d'énergie multi-sources (PV, éolien, réseau, stockage, diesel...). Il est principalement destiné à la simulation de mini-réseaux connectés ou non-connectés.
- **PVGis** : Outil en ligne gratuit pour estimer la production électrique mensuelle et annuelle potentielle E [kWh] d'un système photovoltaïque avec des modules définis d'inclinaison et d'orientation. A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système PV à partir des données d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes). Pvgis est mis en œuvre par le CCR (Joint Reseach Center) des services scientifiques internes de la Commission européenne.

c) La dernière famille d'outils de simulation est celle développée spécifiquement pour simuler le comportement d'un champ PV. Deux approches ont été proposées dans la littérature pour déterminer la caractéristique I-V d'un champ PV en fonctionnement défaillant. La première approche consiste à écrire les équations de tension et de courant pour toutes les mailles formées par l'interconnexion des différents composants du champ et les résoudre pour trouver des points de fonctionnement. La deuxième approche consiste à faire une addition consécutive des caractéristiques des cellules, modules, strings et champs. [2]

2.5 Choix du modèle:

Parmi les modèles électriques de la cellule, le modèle de BISHOP représente au mieux le fonctionnement réel de la cellule dans ses différents modes (génératrice où réceptrice). Ce modèle est utilisé pour la collecte des informations sur le mode sain et défaillant du GPV. Pour la simulation, SIMSCAPE et MATLAB sont les outils exploités pour la reproduction des courbes caractéristiques ainsi que pour l'acquisition des différentes informations sur le PPV dont on aura besoin.

Parmi les modèles empiriques, le modèle 'Madison' propose une méthode de calcul des paramètres du modèle en fonction des données constructeur, alors, si un mal fonctionnement du panneau PV causé par un défaut quelconque le modèle ne sera plus valable. Par contre Les deux modèles « Sandia » et « Cenerg » offrent certainement une meilleure précision que le modèle 'Madison'. Cependant, ces deux modèles nécessitent soit d'effectuer des mesures sur site en ce qui concerne le modèle « Sandia », soit des mesures en plus de celles généralement effectuées par les constructeurs en ce qui concerne le modèle « Cenerg ». Le modèle de « Sandia » offre une possibilité de détecter des défauts sur le panneau PV durant toute sa durée d'utilisation. [6] A cet effet, on va utiliser le modèle de 'Sandia' dans la modélisation des défauts.

2.6 Groupement de cellules :

Les modèles électriques ont été établis pour une seule cellule ; donc pour travailler sur un PPV de plus grande puissance, on regroupe ces cellules comme suit :

2.6.1 Mise en série :

Comme pour les dipôles électriques, la mise en série de plusieurs cellules PV implique la sommation des tensions aux bornes de ces composants pour un même courant qui circule dans le circuit.

CHAPITRE II

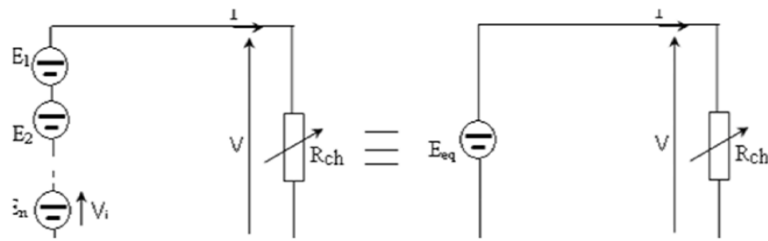


Figure II 10. Association série de cellules PV

2.6.2 Mise en parallèle :

La mise en parallèle de plusieurs cellules amplifie la valeur du courant délivré par ce groupement, étant donné que pour une même tension le courant résultant est égale à la somme des courants circulants dans chaque cellule.

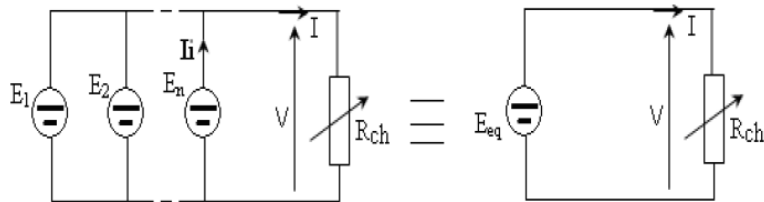


Figure II 11. Association en parallèle de cellules PV

2.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modèles électriques d'une cellule ainsi que ceux proposés dans la littérature. Notamment, le schéma électrique du modèle de BISHOP sera utilisé dans la simulation des différents modes de fonctionnement du générateur photovoltaïque ; et le modèle de SANDIA pour la construction de l'algorithme de détection et localisation des défauts.

On y retrouve également les différents outils de simulations des systèmes PV en général et ceux permettant la reconstruction de la caractéristique statique du GPV en particulier, étant donné que cette caractéristique représente la source d'informations du GPV, de son fonctionnement et de sa productivité.

CHAPITRE III

Résultats de simulation du générateur PV

CHAPITRE III

3 Résultats de simulation du générateur PV :

3.1 Introduction :

Ce chapitre sera consacré aux différents résultats de simulations de générateurs photovoltaïques dans leurs modes de fonctionnement sain et défaillant ; effectuées sous Matlab, ces simulations sont basées sur le modèle électrique d'une cellule PV qui sont généralisés à celui d'un module ou d'un panneau quelconque par simple association série/parallèle. L'influence des différents paramètres intervenants dans le modèle du GPV sera également abordée.

3.2 Résolution du modèle électrique du GPV en fonctionnement sain:

Le modèle à une diode a été largement utilisé grâce à sa simplicité et sa précision convenable pour la plupart des applications [2]. Or, ce modèle ne tient pas compte du fonctionnement de la cellule en réceptrice ; donc, on utilise le modèle de BISHOP puisqu'il est plus adéquat à notre application.

3.2.1 Méthode itérative :

Le point de fonctionnement de la cellule peut être déterminé par la résolution de l'équation (II-8). Il consiste à calculer la valeur d'une des inconnues (V ou I) en fonction de l'autre en supposant que les 8 paramètres de cette équation sont connus. Sachant que les cellules sont généralement mises en série, il est préférable de calculer I à partir de V. La caractéristique I-V d'une cellule peut être obtenue en calculant I pour plusieurs valeurs de V sur une plage souhaitée. L'équation (II-8) ne peut pas être résolue analytiquement. Elle peut être mise sous la forme $F(V, I) = 0$. La résolution de l'équation de cette forme peut être effectuée en utilisant la méthode de Newton-Raphson classique. L'algorithme de détermination de la caractéristique

I-V d'une cellule est illustré dans la Figure III-1. [2]

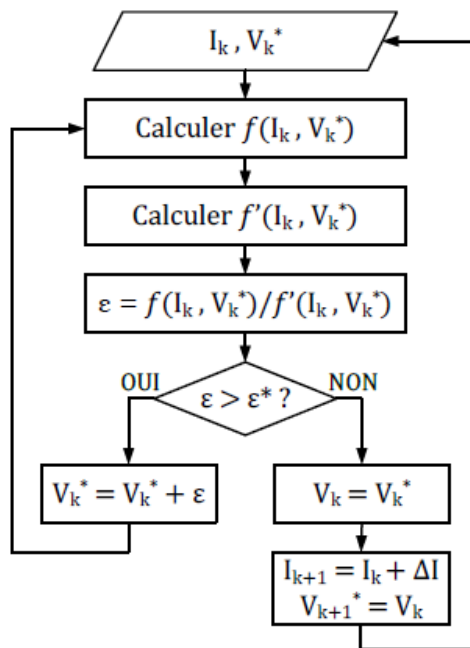


Figure III 1. Algorithme pour déterminer la caractéristique I-V d'une cellule PV

Dans cet algorithme, on cherche à calculer la tension en fonction du courant. Sur ce principe, un programme script sous MATLAB a été construit ; après simulation, on obtient

CHAPITRE III

les graphes des figures (III.2) et (III.3) représentant respectivement les courbes caractéristiques courant-tension et puissance-tension d'une cellule PV dont les paramètres sont les suivants :

- Courant photonique : $I_{ph} = 4.75 \text{ A}$
- Tension thermique de la diode : $V_t = 0.0258 \text{ V}$
- Tension de claquage : $V_b = -20 \text{ V}$
- Résistance série : $R_s = 0.005 \text{ ohm}$
- Résistance shunt : $R_{sh} = 50 \text{ ohm}$
- Les coefficients de réglage de BISHOP : $n = -0.1$ et $k = 3.4$

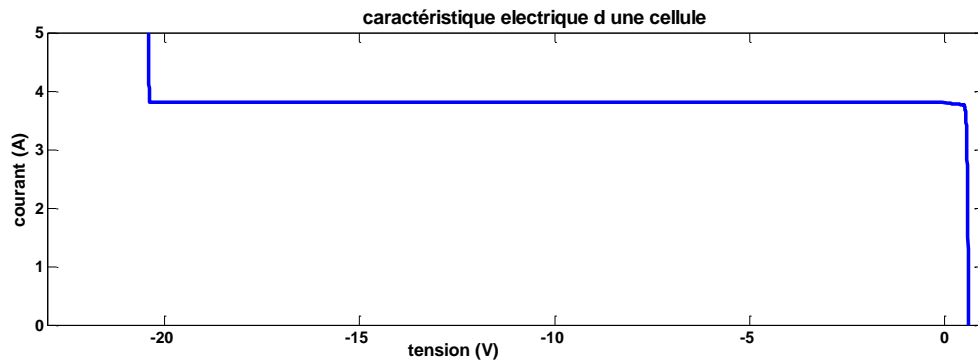


Figure III 2. Caractéristique I(V) d'une cellule PV

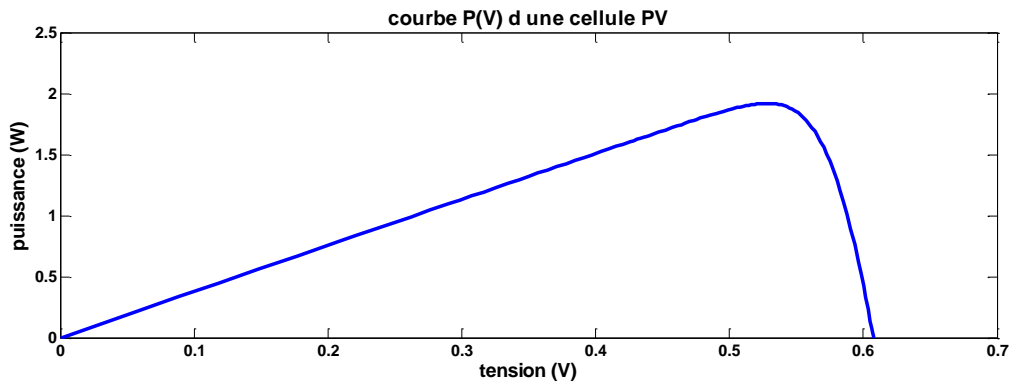


Figure III 3. Courbe P(V) d'une cellule PV

3.2.2 Schéma SIMULINK :

Simulink est un outil intégré au logiciel MATLAB, permettant de travailler sur des diagrammes en blocs qui sont disponible dans sa bibliothèque. Ainsi, on peut modéliser l'équation caractéristique (II.8) de la cellule PV sous Simulink comme le montre la Figure (III.4) en utilisant les mêmes paramètres utilisés précédemment.

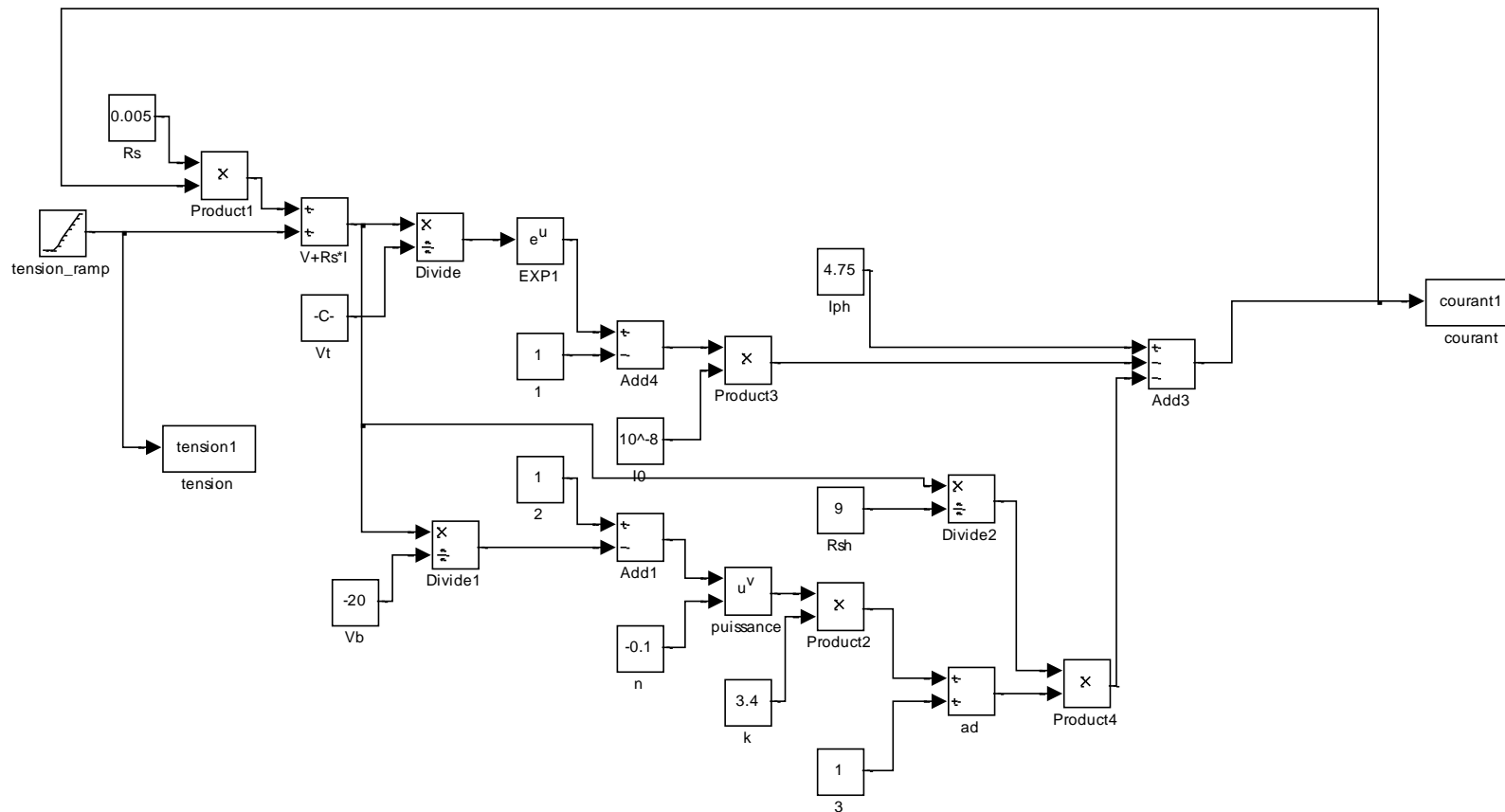


Figure III 4. Schéma en bloc représentant l'équation caractéristique du modèle de BISHO

CHAPITRE III

Après acquisition des données de courant, tension et puissance, on trace via MATLAB les deux courbes I(V) et P(V) de la Figure (III.5)

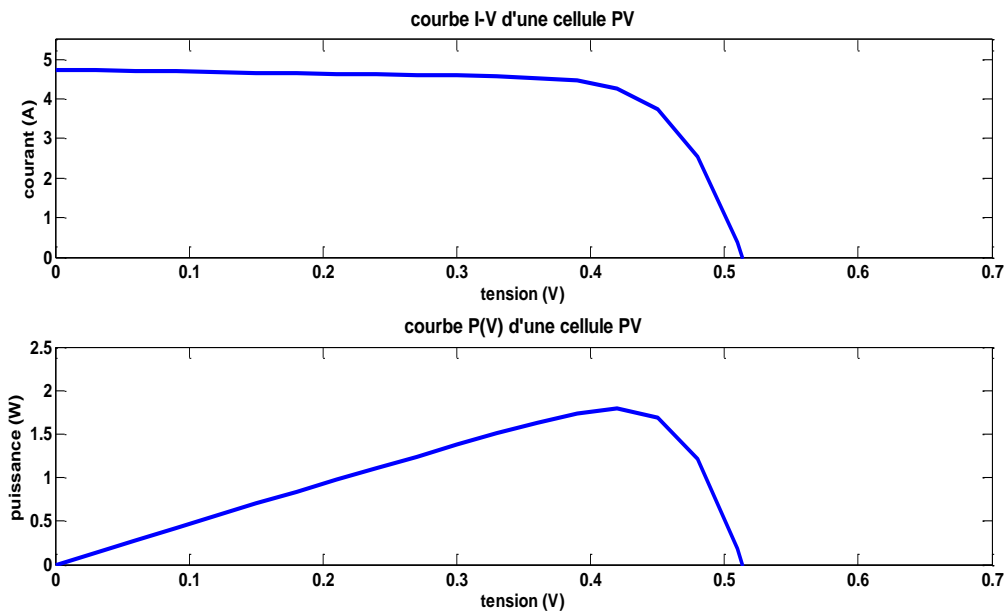


Figure III 5. Courbes caractéristiques I(V) et P(V) obtenues après simulation sous SIMULINK

3.2.3 Schéma SIMSCAPE :

Le package SimPower de SIMULINK nous a permis de construire le schéma équivalent du modèle de BISHOP pour une cellule PV présenté à la Figure (III.6).

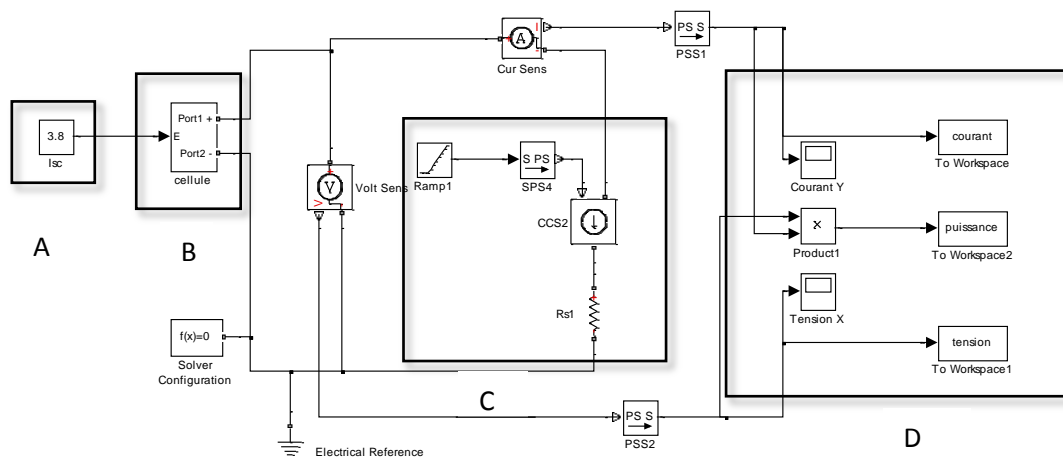


Figure III 6. Schéma électrique complet utilisé pour la simulation du modèle de BISHOP pour une cellule PV sous SIMSCAPE

Ce schéma est essentiellement constitué de quatre composants

CHAPITRE III

- A : désigne le courant photonique, qui représente la lumière solaire.
- B : le circuit de la cellule modélisée par le modèle de BISHOP comme montré à la Figure (III.7).
- C : la charge alimentée par la cellule PV.
- D : bloc pour la collecte des données de tension, courant et puissance en vue de leurs utilisations.

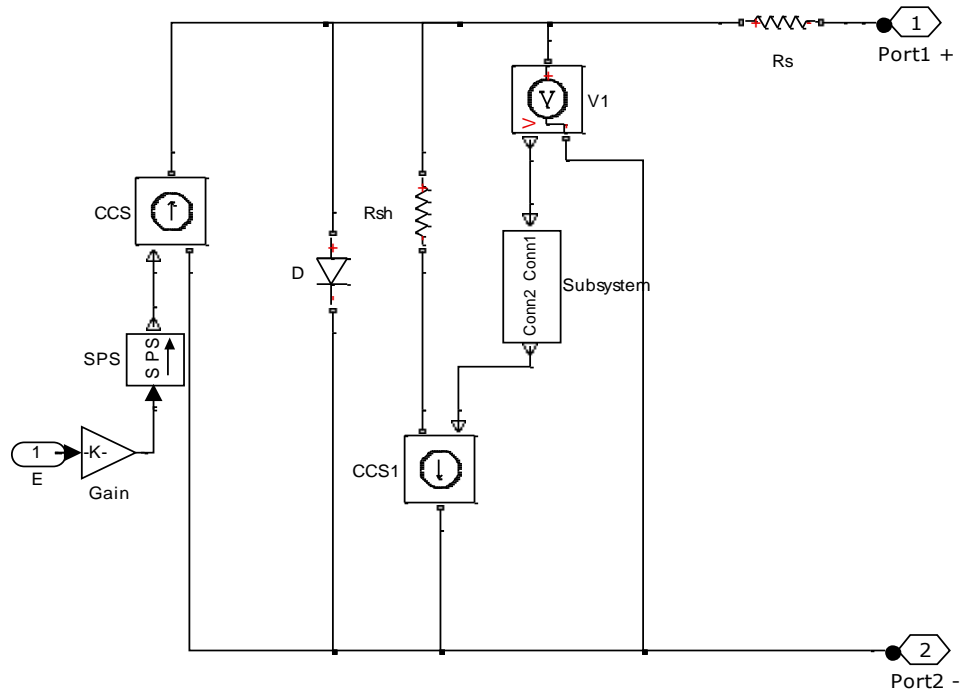


Figure III 7. Schéma équivalent du modèle de BISHOP pour une cellule PV sous Simscape (composant B de la figure (III.6))

Les résultats de simulation sont illustrés dans les figures (III.8) et (III.9) et les paramètres de la cellule sont à la Figure (III.8)

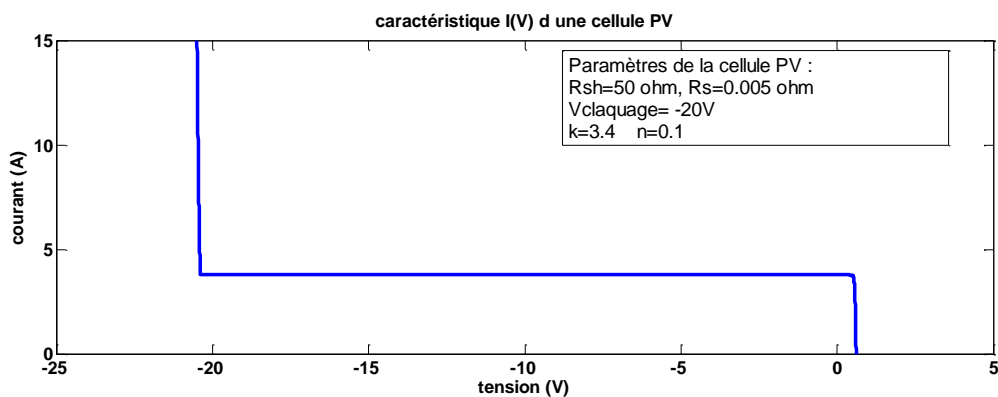


Figure III 8. Caractéristique électrique I(V) d'une cellule PV

CHAPITRE III

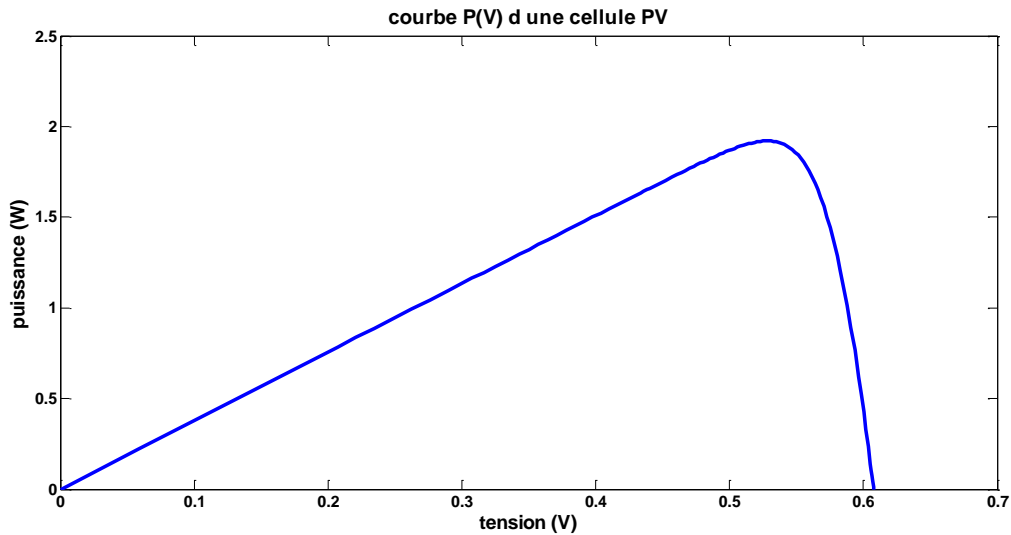


Figure III 9. Courbe P(V) d'une cellule PV

3.2.4 Groupement de cellules PV :

La partie précédente a été consacrée à l'étude des différents modèles pour une seule cellule ; et d'après le paragraphe (2.6), un groupement de taille supérieur est réalisé par simple branchement. Dans ce qui suit, on verra comment obtenir la caractéristique résultante lors de l'association de plusieurs cellules.

3.2.4.1 Mise en série :

La caractéristique résultante lors d'un tel branchement pour ce cas est montrée à la Figure (III.10)

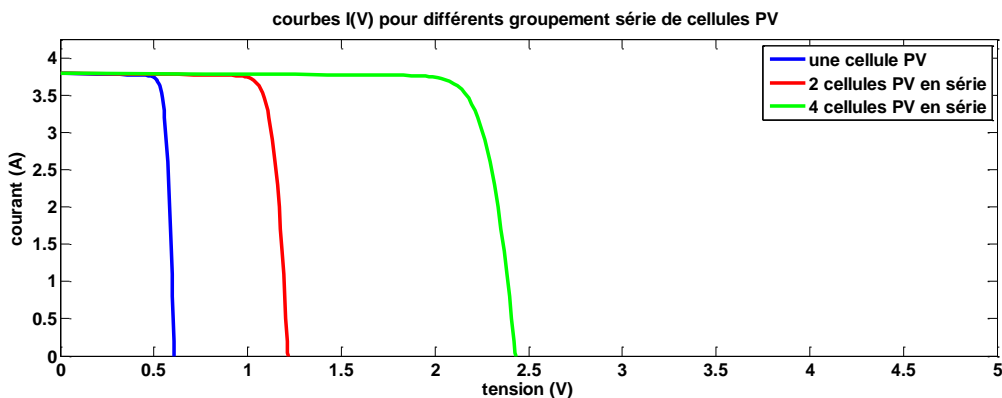


Figure III 10. Caractéristique électrique I(V) résultante lors de la mise en série de plusieurs cellules

Dans ce cas, la tension de circuit ouvert augmente avec l'augmentation du nombre de cellules mises en série par conséquent la puissance le sera également comme le montre la Figure (III.11).

CHAPITRE III

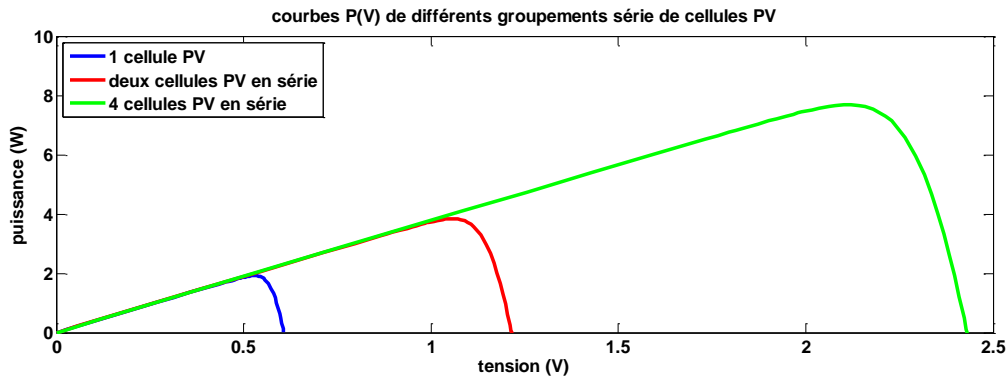


Figure III 11. Courbes P(V) de différents groupements en série de plusieurs cellules PV

3.2.4.2 Mise en parallèle :

La caractéristique électrique résultante (Figure III.12) d'un tel groupement de cellules montre l'augmentation du courant de court-circuit avec l'augmentation du nombre de cellules dans le circuit.

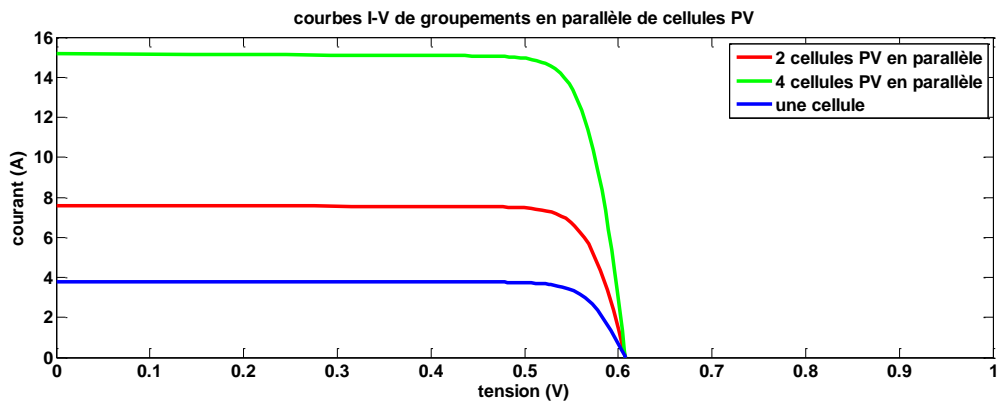


Figure III 12. Caractéristique I-V d'une association parallèle de cellules

De même pour la puissance :

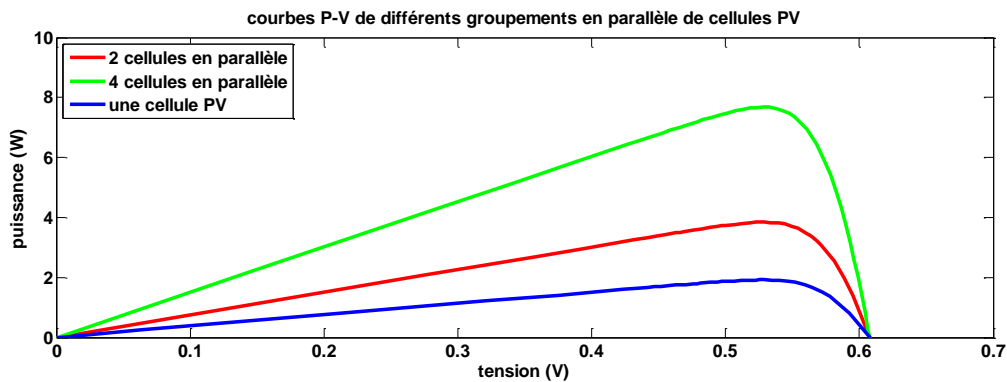


Figure III 13. Courbe P-V d'une association parallèle de cellules

CHAPITRE III

3.2.4.3 Association par le circuit équivalent :

Les prochaines simulations sont faites en utilisant le toolbox SimPowerSystem de Simulink. Afin d'éviter les problèmes de lourdeur de simulation, on utilise des circuits équivalents.

Dans l'équation (II.8) qui représente la caractéristique pratique d'une cellule solaire PV, les cinq paramètres de l'équation sont I_{ph} , I_0 , V_t , R_s et R_{sh} . Un module PV qui contient N_s cellules PV en série peut être alors représenté avec un seul circuit électrique équivalent dont les paramètres sont: $I_{ph,série}=I_{ph}$, $I_{0,série}=I_0$, $V_{t,série}=N_s * V_t$, $R_{s,série}=N_s * R_s$ et $R_{sh,série}=N_s * R_{sh}$.

De même, on peut représenter N_p cellules PV en parallèle avec un seul circuit équivalent dont les paramètres sont les suivants: $I_{ph,parallèle}=N_p * I_{ph}$, $I_{0,parallèle}=N_p * I_0$, $V_{t,parallèle}=V_t$, $R_{s,parallèle}=R_s/N_p$ et $R_{sh,parallèle}=R_{sh}/N_p$. [6]

La figure (III.14) montre les deux courbes tracées lors d'une association série de quatre cellules et lors de l'utilisation du circuit équivalent.

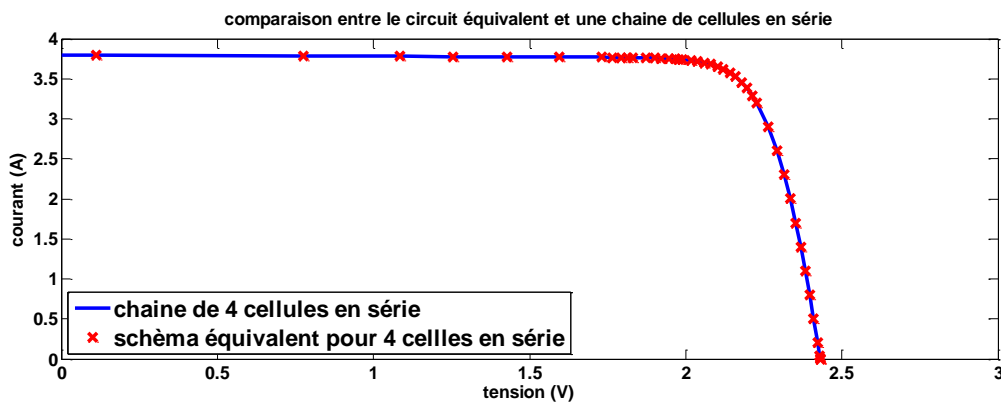


Figure III 14. Comparaison entre le circuit équivalent et une chaîne de cellules en série

Les deux courbes sont similaires (soit une même caractéristique I-V), donc le circuit équivalent sera utilisé dans le reste des programmes pour la rapidité de simulation.

3.2.4.4 Simulation du générateur photovoltaïque choisi :

Le modèle de GPV choisi, dans la suite de notre étude, est un module constitué de 72 cellules en série. Des circuits équivalents sont utilisés pour chaque groupement de 18 cellules en série (pour éviter les lourdeurs en simulation), auquel est connecté une diode bypass en antiparallèle comme protection en cas de présence de cellules mal éclairées. Ce GPV a une charge à ses bornes qui est variable afin de balayer l'ensemble de la caractéristique.

Le schéma du module est représenté à la Figure (III.15)

CHAPITRE III

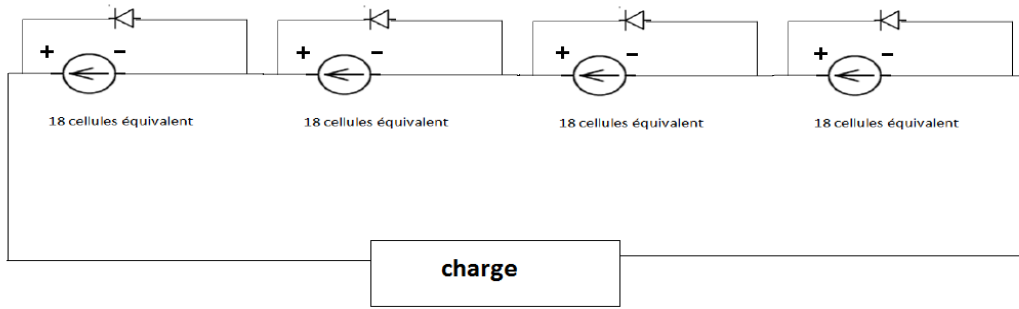


Figure III 15. Schéma du GPV choisi

En utilisant SimPowerSystems pour la modélisation du module de la Figure (III.15) (mais sans connexion des diodes bypass), on obtient les deux courbe I-V et P-V de la Figure (III.16). Les paramètres utilisés lors de la simulation de ce module sont présentés au tableau (III.1)

Paramètre	Valeur
Courant photonique I_{ph}	4.75 A
Résistance série R_s	0.005 ohms
Résistance parallèle R_{sh}	50 ohms
Température de la cellule T_c	25 °c
Eclairement solaire G	1000 W/m ²
Coefficient température courant	0.00065 %/°c
Température NOCT	47 °c

Tableau III 1. Paramètres de simulations du module PV

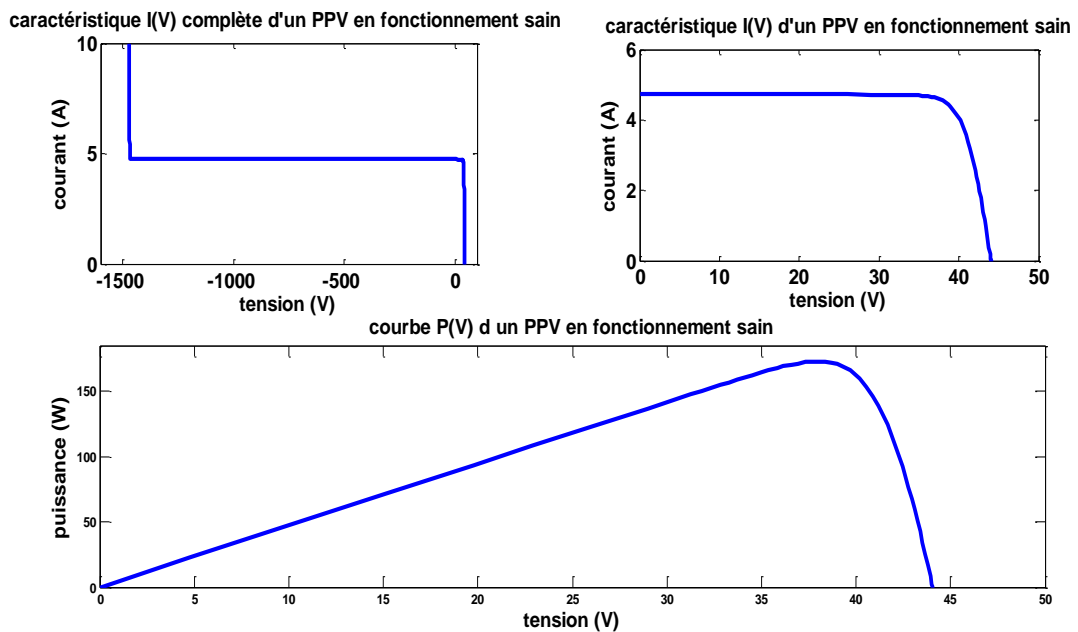


Figure III 16. Courbes caractéristiques du GPV choisi

Le tableau III.2 représente les caractéristiques techniques du module choisi.

CHAPITRE III

Puissance maximale	172.9 Watts
Tension au MPP	38 V
Courant au MPP	4.55 A
Tension de circuit ouvert	44 V
Courant de court-circuit	4.75 A

Tableau III 2. Caractéristiques techniques du module PV de 72 cellules en série

3.3 Influence des paramètres de la cellule PV :

Le modèle de la cellule PV représenté par l'équation (II.8) est un modèle à deux inconnues et huit paramètres.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \left[1 + k \left(1 - \frac{V+R_s I}{V_b} \right)^{-n} \right] \quad (\text{II.8})$$

I_{ph} : Courant photonique.

I_0 : Courant de saturation de la diode.

V_t : Tension thermique de la diode.

R_s : Résistance série (représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules).

R_{sh} : Résistance parallèle ou shunt (représente tous les chemins traversés par les courants de fuite).

k : Coefficient de réglage de BISHOP (~ 3.4 à 4)

V_b : Tension de claquage de la cellule (entre -10V et -30V)

n : Coefficient de réglage de BISHOP

La variation de ces paramètres modifie le comportement de la cellule et donc de la puissance délivrée. On s'intéresse essentiellement à quatre paramètres qui sont susceptibles de varier à l'apparition de certains défauts.

3.3.1 Influence de la variation du courant de saturation :

Le courant de saturation inverse de la diode dépend de la température et de la largeur de bande d'énergie du matériel de la cellule photovoltaïque. L'expression du courant de saturation inverse est très compliquée et certains paramètres physiques ne sont pas disponibles. Par contre, on peut le calculer en faisant référence au courant de saturation inverse à une température de référence donnée. Le rapport de ces deux courants est donné dans l'expression suivante (III.1). E_g est la bande d'énergie et égale à 1.12 eV pour le cristal de type silicium. [2]

$$I_0 = I_{0,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{qE_g}{ak} \right) \left(\frac{1}{T_{c,ref}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (\text{III.1})$$

Avec :

I_0 : Courant de saturation inverse à la température T_c .

$I_{0,ref}$: Courant de saturation inverse à la température $T_{c,ref}$. Généralement, on choisit la condition de test standard comme référence ($T_{c,ref}=25^\circ\text{C}$).

La Figure (III.17) montre un ensemble de caractéristiques I(V) d'une cellule PV pour différentes valeurs du courant de saturation inverse de la diode.

CHAPITRE III

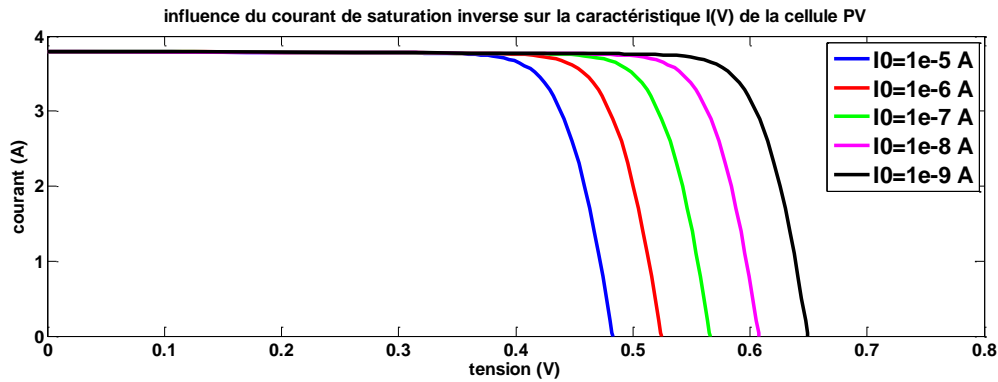


Figure III 17. Influence du courant de saturation inverse sur la caractéristique I(V) de la cellule PV

On remarque que le courant de saturation inverse n'a aucune influence sur le courant de court-circuit de la cellule. Par contre, il fait varier la tension de circuit ouvert. Plus le courant de saturation inverse augmente plus la tension de circuit ouvert diminue.

3.3.2 Influence de la variation du photo-courant :

Le photo-courant est proportionnel à l'éclairement lumineux que reçoit la cellule et varie en fonction de sa température comme indiqué par l'équation (III.2)

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{stc}} [I_{ph,stc} + \alpha(T_c - T_0)] \quad (III.2)$$

G : éclairement reçu par la cellule.

G_{stc} : Éclairement à la condition de test standard et est égale à 1000 W/m^2 .

$I_{ph,stc}$ Étant le courant photonique mesuré sous les conditions standards de fonctionnement, soit un éclairement $G_{stc} = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ et une température de cellule $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$

α : Coefficient de température.

T_c : Température de cellule.

T_0 : Température de cellule à la condition de test standard et est égale à 25°C .

Les paramètres $I_{ph,stc}$ et α sont généralement donnés par les fabricants, la température de la cellule est calculée à partir de la température ambiante et de l'éclairement lumineux en utilisant la formule (III.3)

$$T_c = T_0 + \frac{NOCT-20}{0.8} \cdot G \quad (III.3)$$

Avec :

T_c : Température de la cellule photovoltaïque [$^\circ\text{C}$]

T_0 : Température ambiante [$^\circ\text{C}$]

G : ensoleillement reçu par la cellule photovoltaïque [W/m^2]

NOCT : température normale de fonctionnement de la cellule (Normal Operating Cell Temperature). Sa valeur est généralement fournie par le fabricant.

3.3.2.1 Influence du l'éclairement solaire :

D'après l'équation (III.2), le premier paramètre de la cellule qui est le courant photonique dépend de l'éclairement lumineux ; la figure (III.18) montre l'influence de ce dernier sur la caractéristique électrique de la cellule et donc sur son rendement.

CHAPITRE III

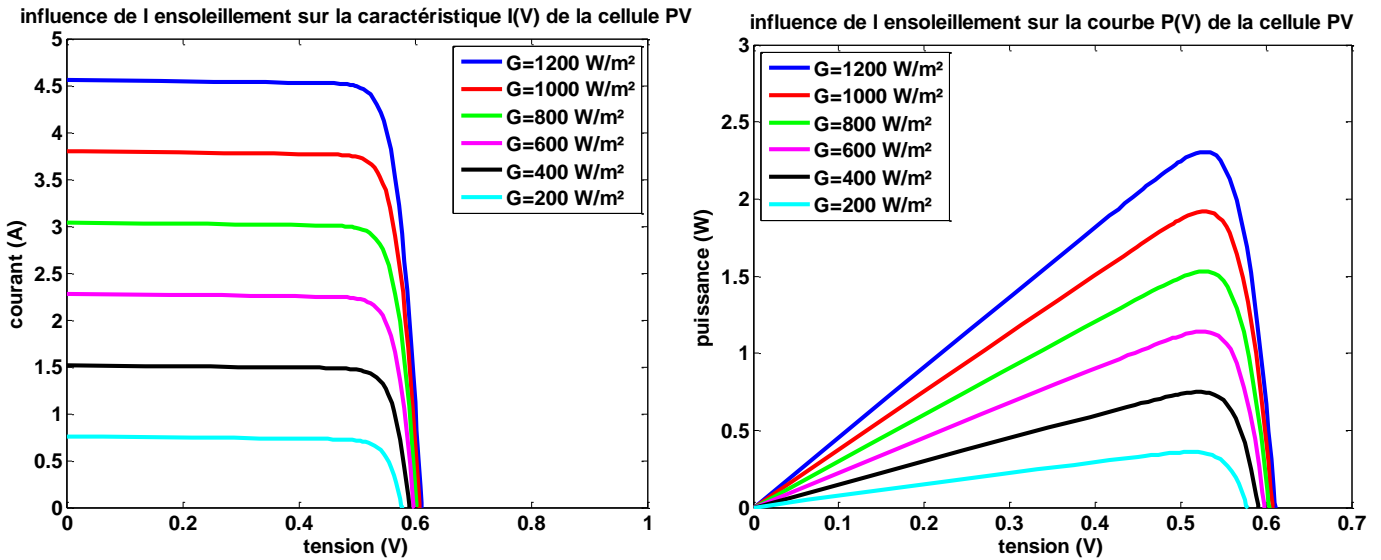


Figure III 18. Influence de l'éclairement solaire sur les courbes caractéristiques de la cellule

Le courant de court-circuit est directement proportionnel à la lumière que reçoit le capteur solaire, tandis que la tension de circuit ouvert l'est légèrement.

Plus il y'a de lumière meilleur est le rendement étant donné que la cellule PV exploite l'énergie que porte les photons de la lumière pour produire de l'électricité.

3.3.2.2 Influence de la température de cellule :

La variation de la température influe le fonctionnement de la cellule comme le montre la Figure (III.19); à température élevée, on remarque une baisse de la tension de circuit ouvert, ceci est prévisible vu que l'équation (III.4) montre la proportionnalité entre ces deux grandeurs.

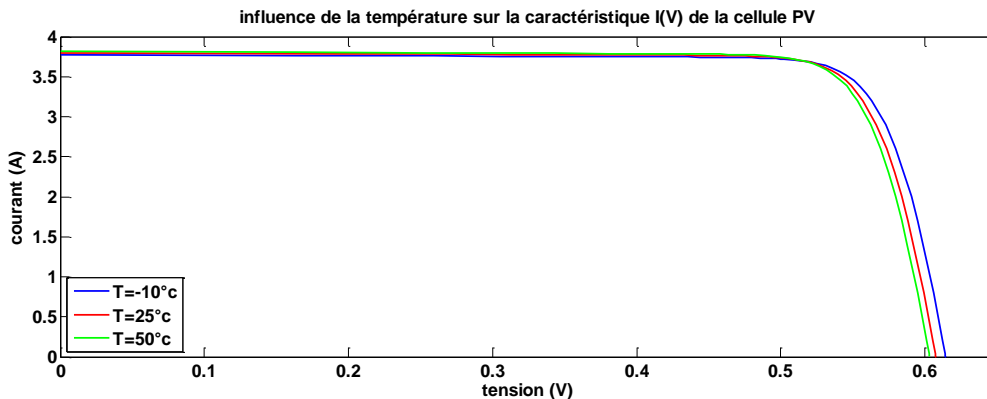


Figure III 19. Influence de la température sur la caractéristique électrique I-V d'une cellule

CHAPITRE III

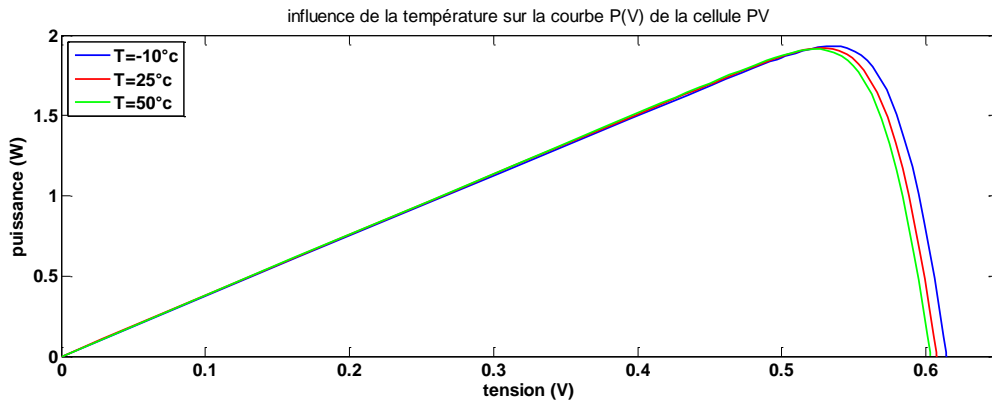


Figure III 20. Influence de la température sur la puissance délivrée par la cellule

$$V_{oc} = a \left(\frac{kT_c}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (\text{III.4})$$

Dans l'équation caractéristique de la cellule, les deux paramètres I_{ph} et I_0 dépendent de sa température comme le montre leurs équations respectives (III.2) et (III.1).

3.3.3 Résistance série :

La résistance série dans le modèle de la cellule PV tient compte de :

- la résistance entre métal et semi-conducteur,
- la résistance qui connecte les cellules,
- la résistance du matériau SC. [2]

On montre aux figure (III.21) et (III.22) une famille de caractéristiques obtenues pour différentes valeurs de R_s .

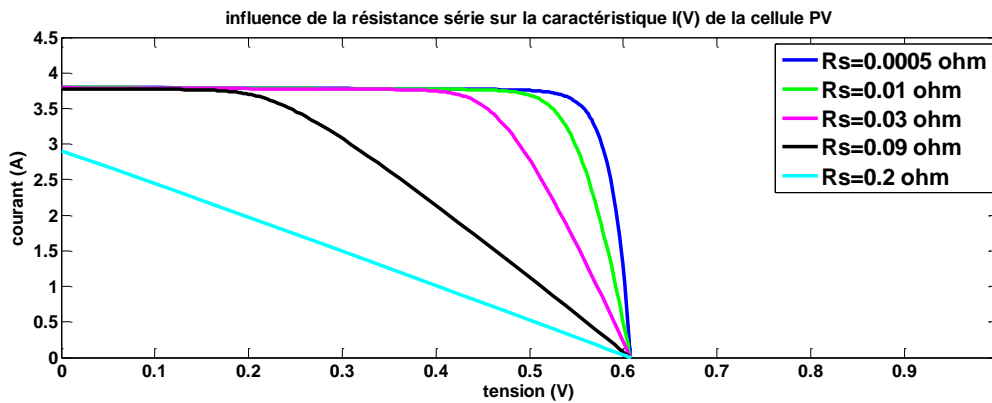


Figure III 21. Influence de la résistance série sur la courbe I(V) d'une cellule PV

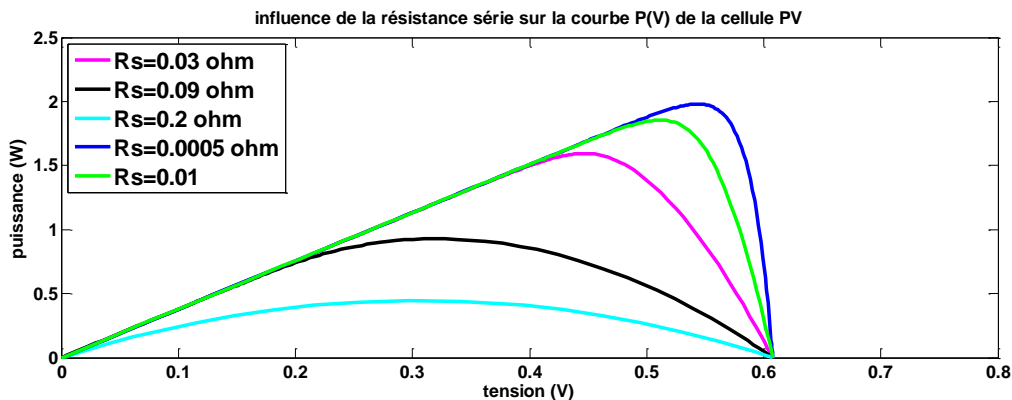


Figure III 22. Influence de la résistance série sur la courbe P(V) d'une cellule PV

CHAPITRE III

On remarque, d'après la Figure (III.21), que l'augmentation de la valeur de la résistance série modifie la forme de la courbe en diminuant de sa pente et ce sans influencer la tension de circuit ouvert; Mais, pour le courant de court-circuit il reste inchangé que dans une certaine plage de variation de R_s et diminue lorsque cette valeur augmente considérablement.

La résistance série doit être idéalement la plus faible possible pour optimiser la production d'énergie électrique ceci est remarquable à la Figure (III.22) où on a de meilleurs rendements pour les faibles valeurs de ce paramètre.

3.3.4 Résistance shunt :

La résistance parallèle représente tout chemin du courant de fuite : courant de fuite entre des cellules, courant de fuite entre la cellule et le bord du module etc. [2]

Les figures (III.23) et (III.24) montrent l'influence de la résistance shunt sur les courbes I(V) et P(V).

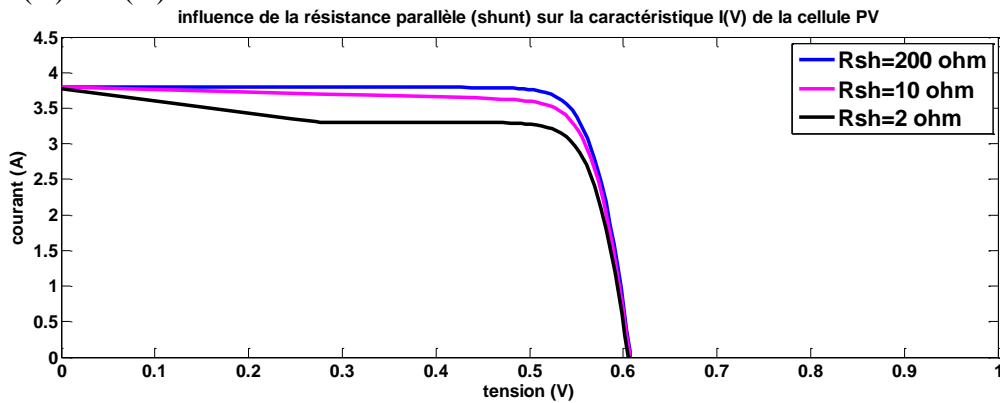


Figure III 23. Influence de la résistance shunt sur la courbe I-V d'une cellule PV

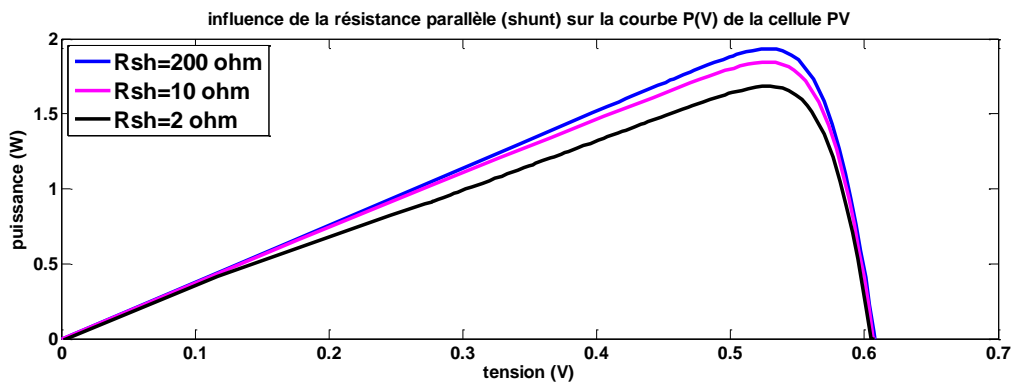


Figure III 24. Influence de la résistance shunt sur la courbe P-V d'une cellule PV

On remarque que la tension de circuit ouvert est influencée par la variation de R_{sh} surtout lorsque celle-ci diminue considérablement. La tension de circuit-ouvert et la puissance produite diminuent avec la diminution de R_{sh} cependant, le courant de court-circuit reste inchangé.

Contrairement à la résistance série, pour maximiser la production électrique, la résistance shunt doit être la plus grande possible.

3.4 Simulation du modèle électrique du GPV en fonctionnement défaillant :

La cellule PV est le composant élémentaire d'un générateur PV, les cellules sont regroupées en série pour obtenir un module PV qui a son tour est raccordé en série parallèle avec d'autres modules, qui lui sont similaires, pour former un panneau PV selon le besoin en puissance. Avec cette configuration, les défauts sont classés selon l'étape à laquelle ils interviennent (cellule, module, string, champ PV) comme au tableau (I.2) du premier chapitre.

CHAPITRE III

Dans cette partie, on s'intéresse à la modélisation détaillée des différents défauts qui peuvent survenir au cours du fonctionnement du générateur PV ainsi que leurs influences sur la caractéristique courant-tension de ce dernier.

Les défauts qu'on présentera dans ce qui suit sont ceux qui seront utilisés par la suite dans l'algorithme de détection et localisation des défauts.

3.4.1 Défauts de mismatch et ombrage :

Le défaut de « **mismatch** » est le défaut causé par le groupement de cellules possédant une caractéristique I-V non identique. Tout changement dans l'un des paramètres de l'équation (II.8) conduira à la dissemblance de leur caractéristique. Le défaut d'ombrage est un cas particulier du défaut de mismatch car sa présence conduit à une réduction de l'ensoleillement reçu par des cellules. Le changement de ces paramètres provient de deux facteurs principaux.

Premièrement, des cellules pourraient posséder des propriétés physiques différentes suite à une tolérance dans la fabrication. Seule la tolérance de la puissance du module est donnée par les fabricants de la cellule ou du module. Elle peut varier entre +/-3% et +/-5% selon les fabricants.

Deuxièmement, des cellules PV peuvent être exposées à des conditions de fonctionnement différentes causées par les différents défauts. D'une manière qualitative, les paramètres de la cellule affectés par ces défauts peuvent être identifiés (voir *Tableau III-3*). [10]

Nature des défauts	Paramètres affectés
Module arraché ou cassé Ombrage : Feuille d'arbre, déjections, Sable, pollution, neige etc.	Variation de I_{ph}
Echauffement des cellules	Variation de T
Dégradation des interconnexions Fissure Corrosion des liaisons entre cellules	Variation de R_s
Modules de performances différentes Détérioration des cellules Pénétration de l'humidité	Variation de R_{sh}

Tableau III 3. Impact des différents défauts sur les paramètres de la cellule [10]

3.4.1.1 Défaut d'ombrage :

Ce défaut a lieu lorsque les cellules ne sont pas uniformément éclairées, d'où l'obtention de caractéristiques différentes. Ceci affectera la caractéristique résultante de l'association de ces cellules.

CHAPITRE III

courbe I(V) d'une cellule PV ombragée

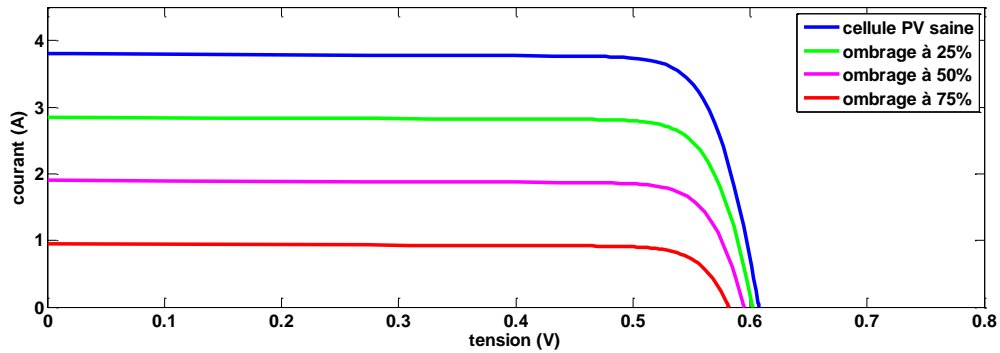


Figure III 25. Courbe I(V) d'une cellule PV ombragée à des cas différents

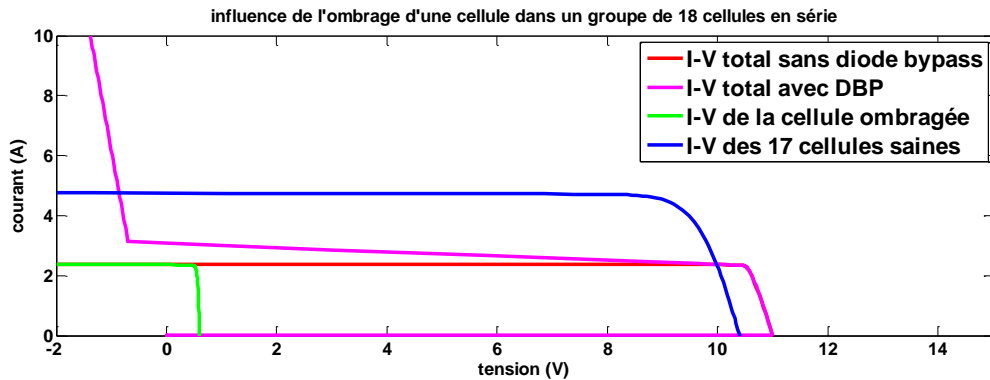


Figure III 26. Courbe I(V) d'un groupement de 18 cellules en série à des cas d'ombrage différents.

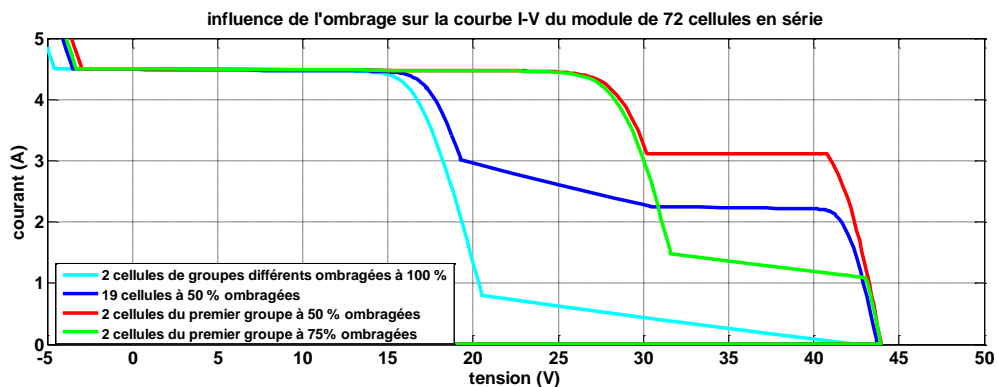


Figure III 27. Courbe I(V) d'un module de 72 cellules en série à des cas d'ombrage différents

3.4.1.2 Défaut mismatch série :

La résistance série doit être idéalement faible, la présence de certains défauts affecte ce paramètre dont la valeur augmente ce qui influe à son tour au rendement du générateur.

La figure suivante représente l'influence du défaut de type mismatch sur la caractéristique I-V du module étudié.

CHAPITRE III

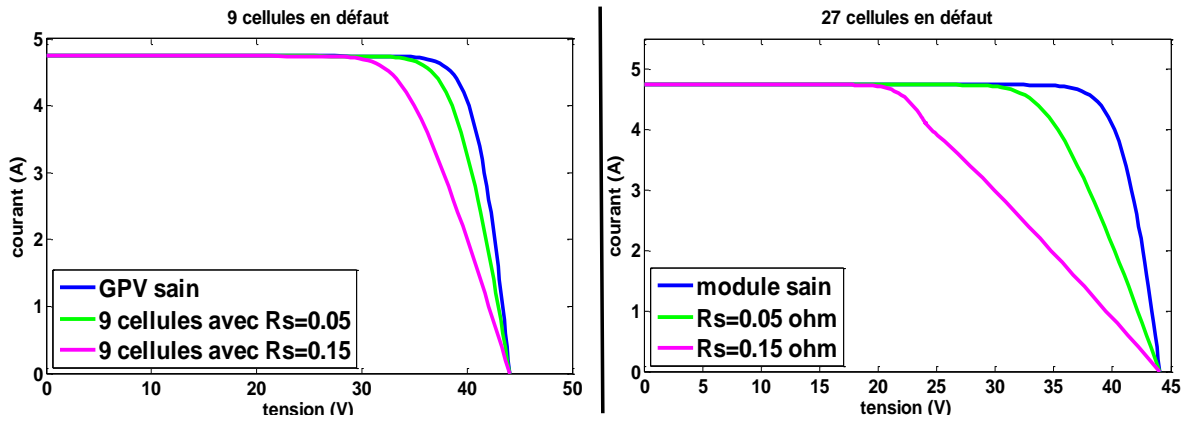


Figure III 28. Influence du défaut mismatch série sur la courbe I-V du module PV

Le défaut mismatch série se traduit par une augmentation de la résistance série du composant en défaut et ceci diminue de la pente de la courbe I-V dans la partie génératrice du module sans pour autant influencer la tension de circuit ouvert. Ce changement de pente de la courbe I-V va conduire à une diminution de puissance puisque cette dernière n'est autre que le produit des deux grandeurs de la courbe caractéristique (courant et tension).

3.4.1.3 Mismatch type parallèle :

La résistance parallèle (ou shunt) est une résistance qui prend en compte les fuites inévitables du courant qui intervient entre les bornes d'une photopile. En général, la résistance shunt est très élevée [5] ; sa diminution est le résultat de certains défauts comme le montre le tableau (II.3) et ceci entraîne à une production faible.

La figure ci-dessous montre l'influence de la diminution de cette résistance sur la caractéristique I-V du composant à étudier.

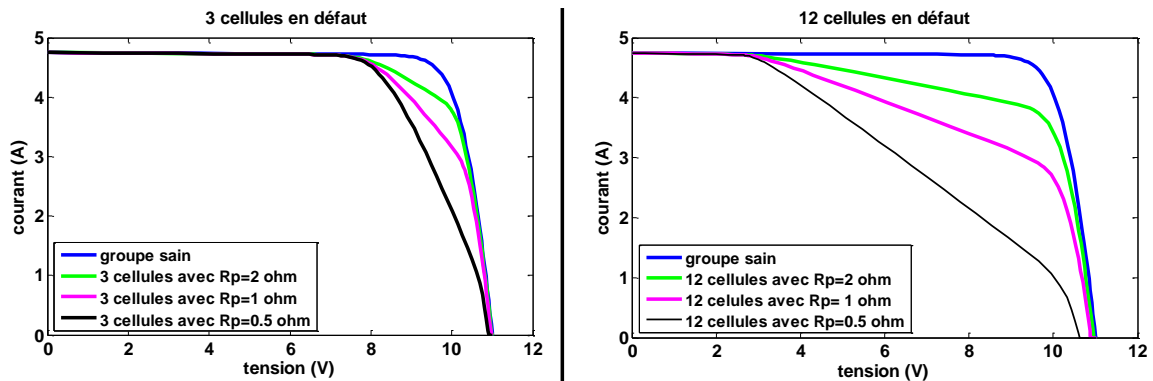


Figure III 29. Influence du défaut mismatch parallèle sur la courbe I-V d'un groupe de 18 cellules en série

Un défaut mismatch parallèle influence la valeur de la résistance parallèle en diminuant de sa valeur ce qui influe négativement la puissance dissipée dans la charge. Car cette puissance est plus grande pour de grandes valeurs de Rsh

3.4.2 Défauts de diode bypass :

Dans son bon état, la diode de bypass est passante quand la somme de la tension des cellules qu'elle protège est négative et elle est bloquée dans le cas contraire. Dans son état défaillant, ce rôle de protection n'est plus assuré. Les défauts électriques associés à cette diode sont : diode court-circuitée, diode déconnectée et diode inversée. En plus de ces défauts électriques, cette diode pourrait être éventuellement claquée en cours de fonctionnement et se comporter comme une impédance d'une valeur quelconque. La Figure III-30 montre un schéma d'un groupe de cellules (groupe jème) dans lequel la diode de bypass est remplacée

CHAPITRE III

par un élément qui peut, à chaque fois, prendre un des états défectueux de la diode : court-circuit, circuit ouvert, impédance quelconque et diode inversée. [5]

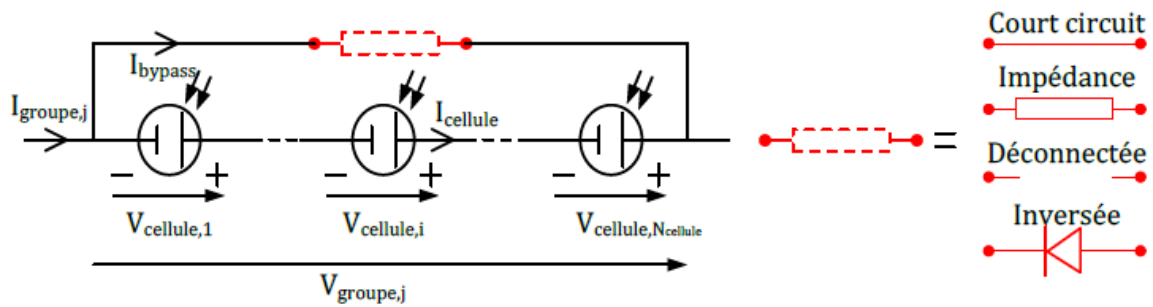


Figure III 30. Schéma boc d'un groupe de cellules PV avec la diode BP défectueuse [2]

3.4.2.1 Diode bypass court-circuitée :

Lorsque la diode bypass est court-circuitée, la tension du groupe de cellules à ses bornes est nulle et donc la tension totale du module diminue également.

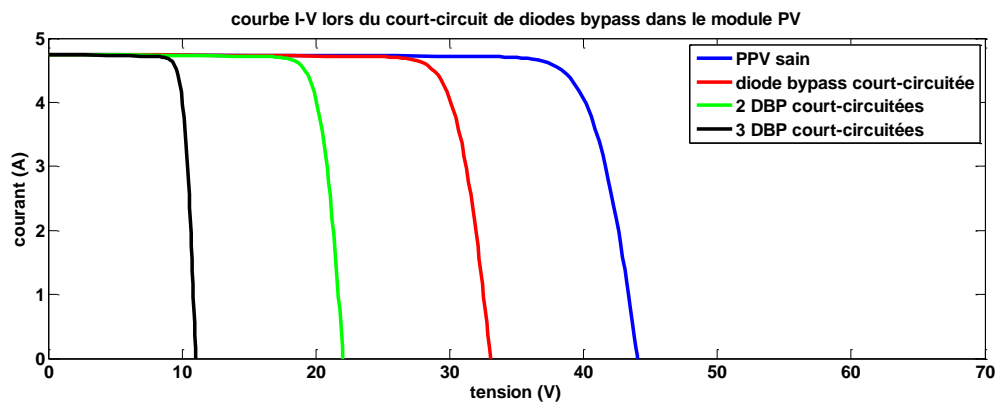


Figure III 31. Influence du court-circuit des diodes bypass sur la courbe I-V du module PV

3.4.2.2 Inversion de diodes bypass :

Lorsqu'une diode bypass est inversée, elle fonctionne à l'opposé son fonctionnement normal. Car, dans ce cas, la diode bypass conduit lorsque la somme des tensions des cellules PV à ses bornes est positive et se bloque dans le cas contraire.

CHAPITRE III

caractéristique I(V) d'un PPV lors de l'inversion de diodes bypass

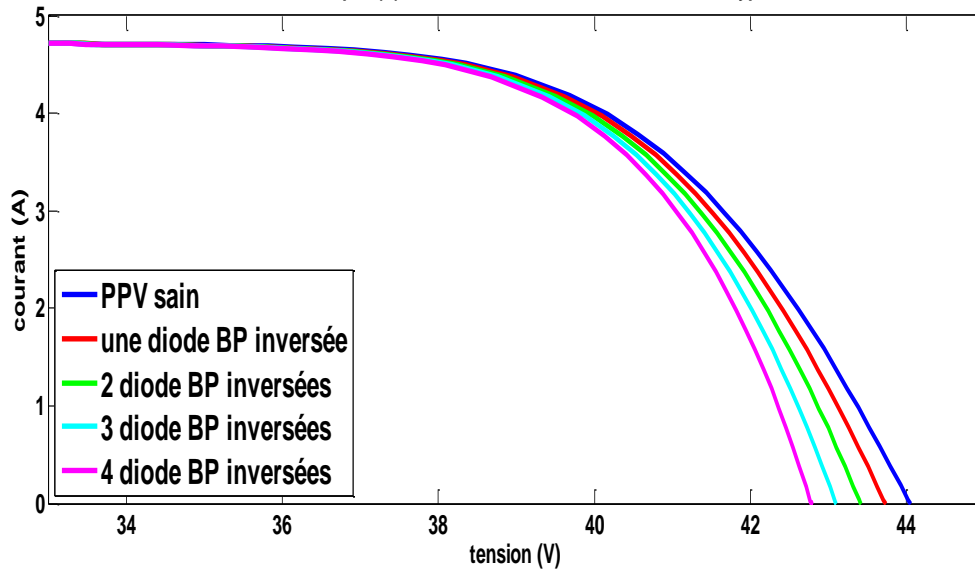


Figure III 32. Influence de l'inversion de diodes bypass sur la courbe I-V du module PV

3.4.2.3 Déconnexion de diode bypass :

La diode bypass est connectée pour protéger le générateur en cas de fonctionnement en récepteur. Lorsque le panneau est sain, la déconnexion de la diode n'influe en aucun cas sur le fonctionnement du GPV ou sur la puissance qu'il produit. Tandis qu'en présence de défaut tel que l'ombrage, la caractéristique est différente (comme le montre la Figure (III.33)), et dans ce cas, ceci peut même conduire au phénomène de « hot spot » du fait que la cellule en défaut absorbe toute la puissance produite par les autres cellules d'où l'utilité de la diode bypass pour isoler le groupe en défaut des autres.

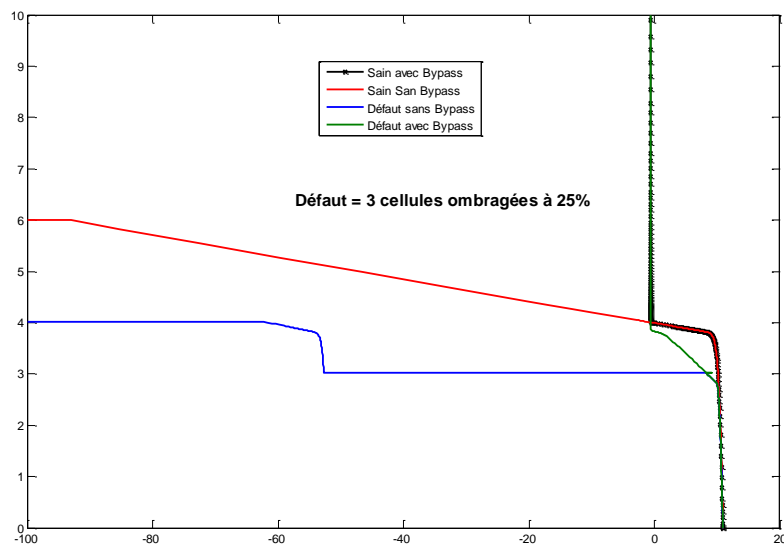


Figure III 33. Utilité de la diode bypass lors d'un fonctionnement défaillant du module

3.4.2.4 Claquage de diode bypass :

Dans ce cas, la diode de bypass fonctionne comme une impédance. Plus l'impédance diminue, plus elle absorbe le courant produit par le groupe qui devrait être normalement fourni à la charge.

CHAPITRE III

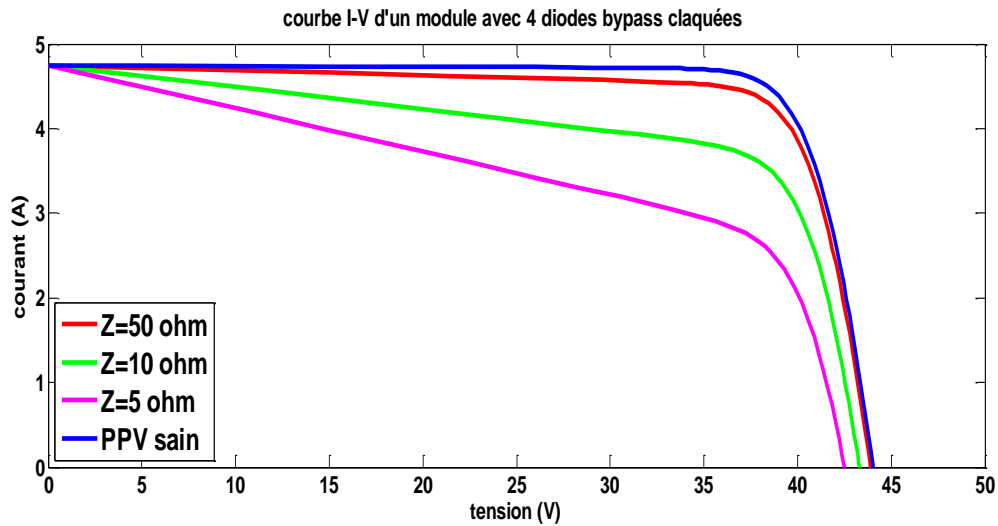


Figure III 34. Influence du claquage de diode 4 DBP sur la courbe I-V du module PV

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, il y'a le déroulement des différents résultats de simulation d'un générateur photovoltaïque ; d'abord ceux du fonctionnement sain du GPV en utilisant le modèle de BISHOP et ainsi que l'influence des différents paramètres de cellule sur la caractéristique électrique de la cellule et donc sur son rendement. Puis, ceux du fonctionnement défaillant du module PV choisi en vue de l'exploitation des résultats pour la construction de l'algorithme du DLD. Le module utilisé est un groupement série de 72 cellules identiques.

CHAPITRE IV

Algorithme de Détection et Localisation des défauts dans un panneau solaire :

CHAPITRE IV

4 Algorithme de Détection et Localisation des défauts dans un panneau solaire :

4.1 Introduction :

L'objectif de ce chapitre est de développer une méthode pour la détection et localisation des défauts. A cet effet, différentes approches de diagnostic sont utilisées.

Dans ce qui suit, on va présenter d'abord l'approche choisie pour ce faire, afin de l'exploiter en vue de l'utilisation du modèle de SANDIA pour développer un algorithme de détection et localisation des défauts.

En premier lieu, on effectue plusieurs simulations pour un scénario exhaustif de défauts afin d'étudier leurs effets sur le fonctionnement du générateur photovoltaïque. Puis, on modélise chaque défaut en utilisant le modèle SANDIA énoncé précédemment. Ainsi, on pourra constituer une base de connaissance sur le fonctionnement défaillant du GPV, qui servira dans l'algorithme pour cerner la cause de la baisse de production.

On termine ce chapitre par des essais en vue de confirmer ou infirmer l'approche basée sur le modèle SANDIA pour la détection et localisation des défauts.

4.2 Choix de l'approche de diagnostic :

Comme énoncé au paragraphe (1.4) du premier chapitre, afin d'identifier la cause la plus probable de la diminution de production d'énergie par le générateur PV, différentes méthodes de diagnostic sont couramment utilisées en industrie telle que la méthode d'imagerie infrarouge ou encore celles proposées dans la littérature tel que l'analyse de l'énergie produite ou l'analyse de la caractéristique statique. On utilisera une approche de diagnostic pour la construction de l'algorithme de DLD

4.2.1 Différentes approches théoriques de diagnostic :

Les grandes familles de méthodes de diagnostic sont présentées dans la Figure IV.1

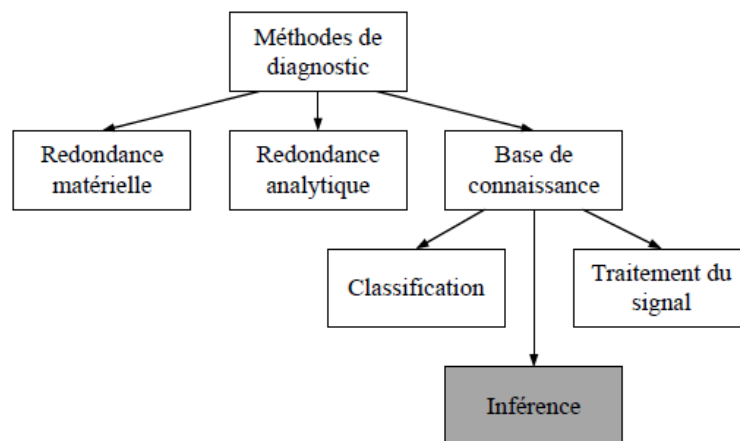


Figure IV 1. Différentes méthodes de diagnostic

La méthode de redondance matérielle consiste à utiliser plusieurs composants (capteurs, actionneurs, générateurs etc.) identiques pour exercer une même fonction. Lorsqu'un écart existe entre les sorties de ces composants, celui qui est défectueux peut être facilement identifié. Dans l'application photovoltaïque, cette méthode est utilisée, dans certains onduleurs, pour identifier le string le plus faible. Il n'est pourtant pas possible d'identifier la nature de défauts.

La méthode de redondance analytique consiste à déduire l'état du système (processus) surveillé à partir de mesures (grandeur entrées/sorties) sur le système lui-même. Cette

CHAPITRE IV

méthode requiert un modèle, généralement de type modèle d'état, qui peut représenter le système surveillé. Or, comme nous l'avons déjà vu, le système PV est composé de différents composants de natures différentes. La construction du modèle d'état d'un tel système est compliquée et voire impossible à faire. La méthode de redondance analytique n'est donc pas appropriée pour le diagnostic de défauts d'un champ PV.

La méthode de diagnostic à base de connaissance peut être encore divisée en trois grandes familles : la méthode de traitement du signal, la méthode de classification et la méthode d'inférence. La méthode de traitement du signal repose sur l'extraction des symptômes à partir du signal mesuré. Les techniques d'extraction couramment utilisées sont la démodulation, filtrage, FFT, analyse de l'ondelette etc. Néanmoins, cette technique d'extraction ne peut être appliquée que pour les signaux qui se répètent dans le temps tels que le courant, la tension, la vibration, l'onde acoustique etc. Or, la caractéristique I-V sur laquelle nous voulons faire l'analyse est le signal du type instantané qu'il n'y a pas d'évolution dans le temps.

Il ne reste donc que deux méthodes à choisir entre la méthode de classification et la méthode d'inférence. Le choix d'une de ces méthodes dépend de la connaissance qu'on a sur la relation entre les défauts et les symptômes. Si aucune connaissance structurelle n'est acquise, la méthode de classification est sélectionnée. Dans le cas contraire, la méthode d'inférence est choisie. [2]

On utilise la méthode de classification.

4.2.1.1 Le diagnostic par la méthode de classification :

Le diagnostic de défaillance est essentiellement vu comme un problème de classification. Le but principal est de construire un bloc de correspondance tel qu'à partir d'un ensemble d'informations décrivant la situation courante du processus, il est possible d'obtenir les causes probables des situations anormales. Les observations déjà connues sont regroupées en classes, constituant des prototypes auxquels la nouvelle observation est comparée pour être identifiée. En d'autres termes, le diagnostic a pour mission d'identifier le mode de fonctionnement d'un système à partir d'observations sur celui-ci. [14]

La méthode de diagnostic à base de classification peut être décomposée en 4 étapes principales qui sont :

- Choix du critère pour le déclenchement de l'algorithme de diagnostic.
- Simulation de plusieurs défauts susceptibles de se produire au sein du panneau PV.
- Etablissement d'une base de connaissance des différents défauts.
- Choix d'une approche afin d'identifier chaque classe à son défaut. [6]

4.3 Elaboration de l'algorithme de DLD

Pour aboutir à l'algorithme de détection et localisation des défauts au sein d'un générateur PV en utilisant le modèle SANDIA, on doit passer par certaines étapes essentielles comme le montre le graphique suivant :

CHAPITRE IV

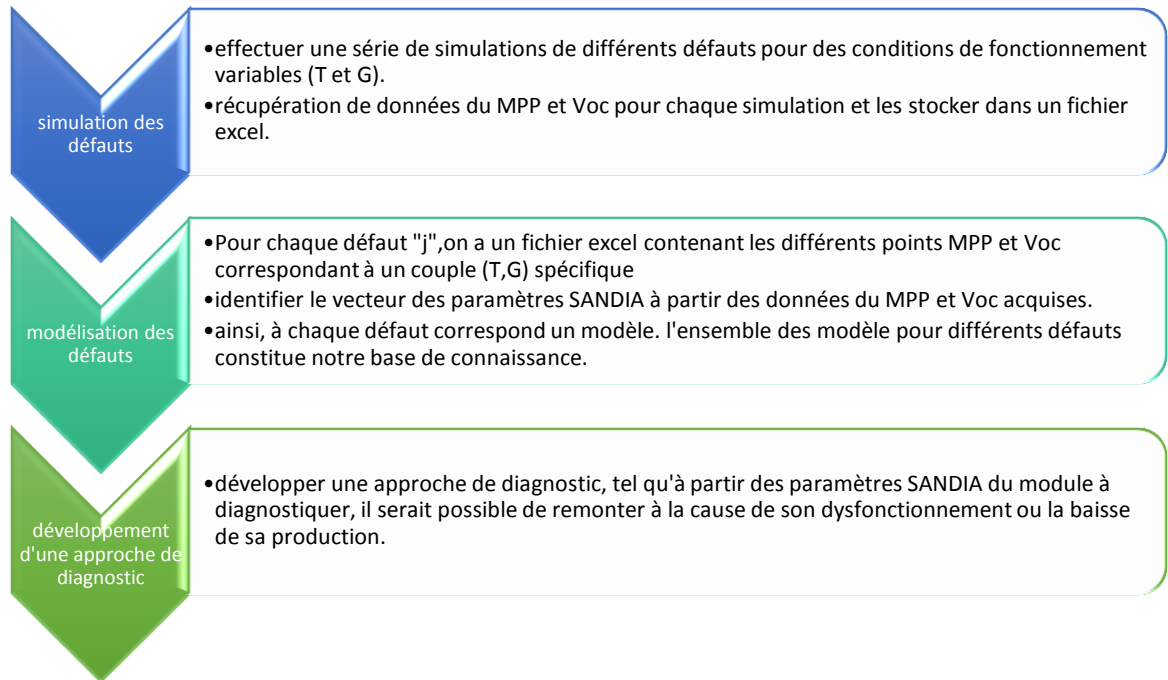


Figure IV 2. Schéma global décrivant les étapes de construction de l'algorithme DLD

4.3.1 Etape 1 : Simulation de différents scénarios de défauts :

La présence d'un défaut quelconque conduit à la diminution de la puissance produite par le module PV et donc changement du point de fonctionnement optimal (MPP) ; en plus de ça, on remarque d'autres symptômes sur les points critiques de la courbe I-V du GPV tel que le changement de la valeur de la tension de circuit ouvert.

Certes, différents facteurs peuvent faire évoluer ce défaut. On peut en envisager trois qui peuvent intervenir : la sévérité du défaut, la variation de la condition de fonctionnement et le type du système PV (module, string ou champ). Il est à rappeler qu'il y a cinq catégories de défauts. Ce sont les défauts de mismatch et d'ombrage, défauts de diode de bypass, défauts de module, défauts de connectique et défauts de diode anti-retour. [2]

a) Le type du système PV :

dans notre étude, le choix de travailler sur un module PV constitué de 72 cellules en série (voir paragraphe 3.2.4.4) est due au fait que l'utilisation du package SimPowerSystem de SIMULINK/MATLAB nous mène dans plusieurs cas à des problèmes de boucles algébriques (algebraic loop problem) qu'on ne peut résoudre, ceci est probablement dû au fait que le courant de sortie est nécessaire pour être une entrée de l'équation de cette même grandeur dans le modèle de BISHOP, des itérations peuvent être nécessaires pour résoudre ce problème qui, dans de nombreux cas, se terminent avec une rupture de simulation. Or, le fait de travailler sur un module limite l'étude aux deux premières catégories de défauts soit les défauts de Mismatch et d'ombrage et les défauts de diodes bypass.

b) Variation des conditions de fonctionnement :

Chaque défaut est simulé pour différentes conditions de fonctionnement. La Figure (IV.3) représente les profils journaliers de température et d'éclairement solaire utilisés dans les simulations.

CHAPITRE IV

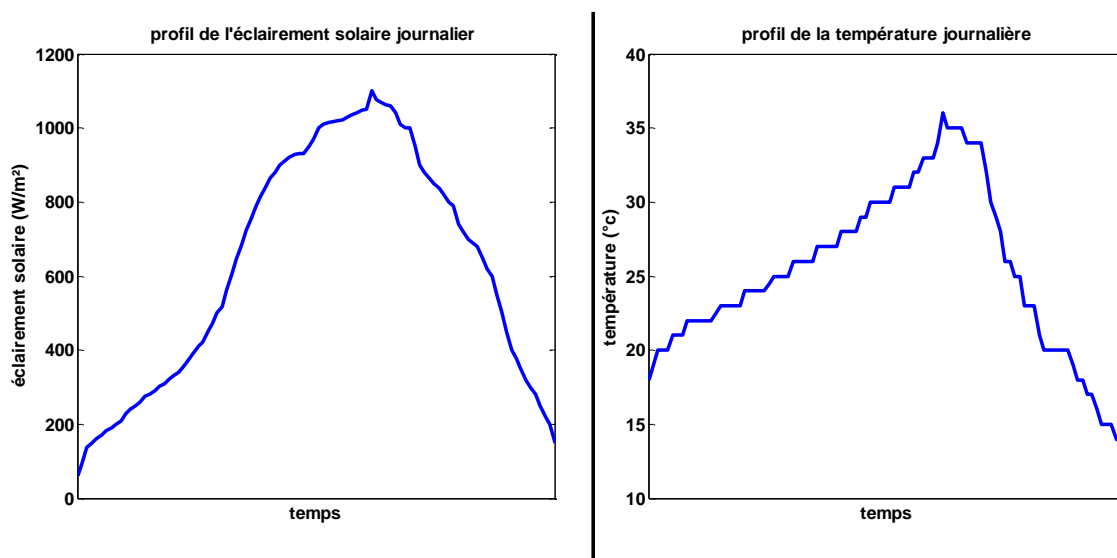


Figure IV 3. Courbes des variations des conditions météorologiques

c) Sévérité des défauts :

La sévérité de la plupart des défauts peut être définie par deux grandeurs : leur amplitude et le nombre de composants en défaut. A titre d'exemple, on dit qu'un défaut de mismatch de type « résistance série » s'aggrave quand la résistance d'une cellule augmente et il s'aggrave davantage quand il affecte plusieurs cellules. Cependant, la sévérité de certains défauts peut être quantifiée uniquement avec le nombre de composants en défaut. On peut citer comme exemple le cas du court-circuit de la diode de bypass.

Le Tableau (IV.1) présente comment nous définissons la sévérité des défauts considérés dans la simulation. [2]

Catégorie Défaut	Défaut	Sévérité ↑
Défaut de Mismatch	Ombre	$I_{ph}(A) \downarrow$
	Mismatch série	$R_s(\Omega) \uparrow$
Défaut de diode bypass	Diode bypass court-circuitée	X
	Diode bypass inversée	X
	Diode bypass claquée	$R_{dbp}(\Omega) \downarrow$

Tableau VI 1. Définition de la sévérité des défauts [15]

Le symbole « x » associé à certains défauts représente le fait que la sévérité de ces défauts ne peut être quantifiée qu'avec le nombre de composants en défaut.

Pour cette première étape, on a d'abord relevé les données météo de température et d'éclairement (comme le montre la Figure (VI.3)) pendant une journée.

Afin d'effectuer la simulation d'un scénario exhaustif de défauts, on traitera chaque défaut à part (ombage, mismatch série, court-circuit de diode bypass, inversion de diode bypass et claquage de diode bypass). Premièrement, prenons un défaut « j », parmi les défauts précédents, auquel on associe plusieurs cas défaillants suivant sa sévérité.

Ainsi, pour chacun de ces cas, on réalise la simulation du modèle défaillant construit sous Simscape à base du modèle de BISHOP et ce pour les différentes conditions de fonctionnement et à chaque fois, on relève les valeurs de la puissance maximale, du courant et de la tension à ce point optimal et de la tension de circuit ouvert (P_{mpp} , I_{mpp} , V_{mpp} et V_{oc}) qui sont stockées dans un fichier Excel. La simulation de chaque cas et l'acquisition de

CHAPITRE IV

données sont effectuées automatiquement en lançant un programme MATLAB conçu pour cette tâche.

Ceci est illustré dans le schéma suivant.

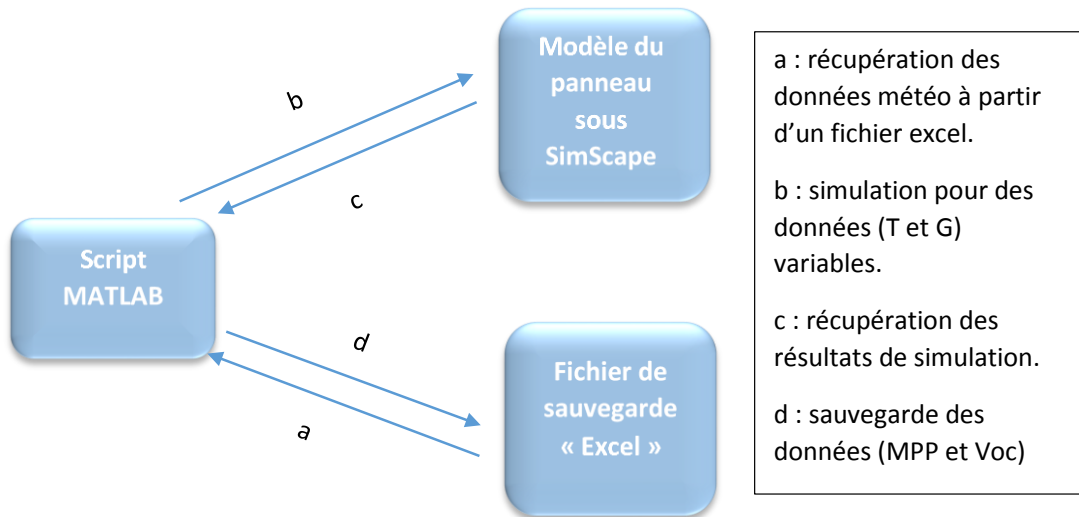


Figure IV 4. Simulation des défauts et sauvegarde de données

4.3.2 Etape 2 : Modélisation des défauts :

Après acquisition des données pour plusieurs scénarios de défauts, on passe à leurs modélisations.

Dans le chapitre 2, on a présenté plusieurs modèles d'une cellule PV dont le modèle électrique de BISHOP qu'on a utilisé précédemment pour les simulations des différents défauts, ainsi que le modèle SANDIA qui a l'avantage de prendre en compte la variation des conditions météorologiques qui influent le rendement des panneaux solaires et permet aussi la représentation du fonctionnement sain et défaillant du PPV par un simple modèle paramétrique.

Sur ce, chaque défaut peut être modélisé par les équations suivantes, dont la première représente le courant de la puissance maximale et la deuxième celle de la tension de la puissance maximale tandis que la troisième c'est celle de la tension de circuit ouvert :

$$I_{mpp} = I_{mpp0} \cdot \{C_0 \cdot E_e + C_1 \cdot E_e^2\} \cdot \{1 + C_2(T_c - T_0)\} \quad (IV.1)$$

$$V_{mpp} = V_{mpp0} + C_3 \cdot N_s \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + C_4 \cdot N_s \cdot \{\delta(T_c) \cdot \ln(E_e)\}^2 + C_5 \cdot (T_c - T_0) \quad (IV.2)$$

$$V_{oc} = V_{oc0} + N_s \delta(T_c) \cdot \ln(E_e) + C_6(T_c - T_0) \quad (IV.3)$$

$$P_{mpp} = I_{mpp} \cdot V_{mpp} \quad (IV.4)$$

$$E_e = G/1000 \quad : \text{L'irradiation effective} \quad (IV.5)$$

$$\delta(T_c) = a \cdot k_b(T_c + 273.15)/q \quad : \text{Voltage thermique pour une cellule} \quad (IV.6)$$

Et :

- k_b : c'est la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K).
- q : c'est la charge de l'électron ($1,602 \cdot 10^{-19}$ C).
- a : le facteur d'idéalité de la diode (de 1 à 2).

CHAPITRE IV

- T_c : la température de la cellule ($^{\circ}C$)
- T_0 : température de cellule sous conditions de test standards ($25^{\circ}C$).
- les paramètres $I_{mpp0}, V_{oc0}, V_{mpp0}$ représentent respectivement les grandeurs courant du MPP, tension de circuit ouvert et la tension au MPP sous les conditions de test standards ($G=1000 \text{ W/m}^2$ et $T_0=25^{\circ}C$).
- N_s : le nombre de cellules en série dans le module PV.
- $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$: Paramètres de SANDIA à définir par identification.

Le premier terme de ces équations représente les données acquises lors des simulations précédentes et le second terme comporte les données caractérisant le module ($I_{mpp0}, V_{oc0}, V_{mpp0}$ et N_s) ainsi que les valeurs des données météorologiques en plus des coefficients (C_i avec $i=0,1,2,\dots,6$) qu'on doit identifier et qui différencient un cas de fonctionnement du module d'un autre.

Ces coefficients sont estimés pour chaque défaut en utilisant la fonction « lsqnonlin » de MATLAB pour la résolution d'équations non linéaires numériquement.



Figure IV 5. Modélisation des défauts (identification des paramètres)

Par conséquent, pour chaque défaut introduit, il lui correspond sept paramètres estimés ($C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ et C_6), alors si on effectue plusieurs essais pour chaque défaut (la sévérité du défaut augmente d'un essai à un autre), on obtient un champ d'estimés.

Le tableau (IV.2) montre un exemple d'un champ de paramètres estimés pour un défaut de court-circuit de diode bypass dans un panneau PV.

essais	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0,97785573	0,05322716	-0,00048023	0,05895648	-3,16788809	-0,01229404	-0,00130242
2	0,97785573	0,05322716	-0,00048023	0,03930433	-2,11192526	-0,00819603	0,00362453
3	0,97785573	0,05322717	-0,00048023	0,01965239	-1,05595697	-0,00409801	0,00855148

Tableau VI 2. Champs d'estimés d'un défaut bypass (court-circuit)

Finalement on aura un champ de paramètres estimés stockés dans un fichier pour tous les types de défauts traités.

4.3.3 Constitution de la base de connaissance :

Chaque défaut parmi les cinq à étudier est associé à un champ de paramètres estimés. Or, tenant compte de la sévérité des défauts, le nombre de défauts à détecter est plus grand que ceux présentés initialement ; par exemple, pour un seul défaut qui est l'ombrage on peut en générer deux défauts d'ombrage de sévérité plus ou moins importante.

Par conséquent, on aura sept défauts différents discriminable :

- Défaut d'ombrage partiel de sévérité faible.
- Défaut d'ombrage partiel de sévérité importante.
- Défaut mismatch série de sévérité faible.

CHAPITRE IV

- Défaut mismatch série de sévérité importante.
- Défaut de court-circuit de diode bypass.
- Défaut d'inversion de diode bypass.
- Défaut de claquage de diode bypass.

A chacun d'eux correspond une liste de paramètres. Les tableaux (IV.3) et (IV.4) montre un exemple de champs de paramètres des deux défauts mismatch série classés selon leur sévérité.

essais	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0,99425237	0,01303077	-0,00013054	-0,97157124	-11,9097683	-0,00873232	-0,00625288
2	1,00298132	0,01268948	-0,00023944	-1,57670592	-16,2710999	-0,01227042	-0,00625288
3	1,0089696	-0,01027361	-6,7067E-06	-2,27736841	-21,1671008	-0,00619511	-0,00625288
4	1,02474902	-0,01678699	-8,971E-05	-2,70520065	-23,9148274	-0,01124983	-0,00625288
5	1,04172817	-0,00733032	-0,00080505	-3,19954474	-26,5737744	-0,0092829	-0,00625289
6	1,00013562	0,00322911	0,00012675	-0,04937829	16,9577784	-0,0092233	-0,00625288
7	0,98565699	0,02450654	-2,5258E-05	-3,47251333	-17,907639	-0,01948735	-0,00625288
8	1,02557573	-0,00902828	-0,00014606	-1,38234961	7,75705761	-0,01011473	-0,00625288
9	1,22002421	0,08950894	-0,00595032	-3,79191897	-21,5906359	-0,0096574	-0,00625288
10	0,96653052	-0,09520507	0,00333051	-2,86385767	-2,52233208	0,00429764	-0,00625288
11	0,92276398	0,19273359	-0,00251061	0,00525924	38,396484	-0,00555491	-0,00625288
12	0,82083236	-0,11212246	0,00931866	-7,20343857	-49,8221786	0,00656255	-0,00625288
13	0,74396362	-0,09530309	0,00884716	-7,8811529	-57,885532	0,07038928	-0,00625288

Tableau VI 3. Champ de paramètres estimés pour un défaut de type mismatch série de faible sévérité

essais	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	2,53216434	-1,41318771	-0,00270827	-0,07784209	28,2383362	-0,02111563	-0,00625288
2	1,34664063	-0,42067852	0,00448852	-1,43118434	30,7196621	-0,02795178	-0,00625288
3	2,72553832	-1,53152496	-0,0044923	0,00537181	26,3312072	-0,01383226	-0,00625288
4	3,4771467	-2,12113985	-0,00749807	1,24070752	30,7774743	-0,01229743	-0,00625288
5	2,62876522	-1,40630294	-0,00557069	-2,58821368	-25,0296788	-0,00190291	-0,00625288
6	3,82641164	-2,40513923	-0,0087226	1,66123946	23,8205162	-0,00695233	-0,00625288

Tableau VI 4. Champ de paramètres estimés pour un défaut de type mismatch série de sévérité importante

Afin de caractériser chaque défaut par son vecteur de paramètres C_i , on se propose de calculer une moyenne (équation IV.7):

$$C_{imoy} = \frac{\sum_{j=1}^N C_{i,j}}{N} \quad (IV.7)$$

N : nombre d'essais effectués pour chaque défaut selon la sévérité.

i : type du défaut.

Dès lors, la base de connaissance est construite à partir des C_{imoy} .

4.3.3.1 Approche statistique :

Chaque défaut est caractérisé par son vecteur de paramètres SANDIA qui est obtenu par le calcul de la moyenne des coefficients issus des différents essais effectués par rapport à

CHAPITRE IV

la sévérité de ce dernier. Pour des résultats plus précis, corrects et significatifs, on utilisera une approche statistique pour le calcul de la moyenne qui est le critère de **CHAUVENET**.

a) Introduction au critère de CHAUVENET :

Lorsqu'on dispose de N échantillons dont on doit calculer la moyenne, on peut rencontrer une valeur qui semble s'éloigner des autres soit une mesure suspecte qui peut être due à une erreur survenu lors de la mesure. Si on a une influence externe ou erreur technique qui sont facilement identifiables, cette donnée peut être simplement éliminée. Le plus difficile est lorsqu'aucune explication ne peut être faite et c'est le cas le plus commun. Pour éviter des valeurs erronées pour solliciter les résultats, on utilise le critère statistique de CHAUVENET pour identifier les points pouvant être rejetés.

Il nous permet d'éliminer toute mesure dont la probabilité est inférieure à $(1/2N)$. La justification de l'élimination de la mesure est donc au niveau de la faible probabilité qu'elle se produise. [15]

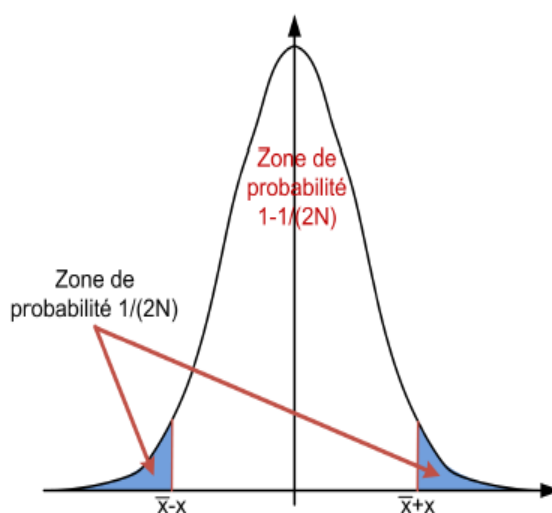


Figure IV 6. Critère de CHAUVENET

La déviation maximale de la donnée x_i par rapport à la moyenne \bar{x} est de :

$$\tau_{max} = \frac{|x_i - \bar{x}|_{max}}{S_x} = \frac{d_{max}}{S_x} \quad (IV.8)$$

Avec : S_x : écart type de l'échantillon.

Donc, toute mesure dont la distance $\frac{|x_i - \bar{x}|}{S_x}$ est supérieure à τ_{max} peut être éliminée sachant que les écarts maximaux acceptables pour différentes tailles d'échantillon ont été pré-calculés, le tableau (IV.5).

N : nombre d'échantillons	τ_{max} : déviation maximale
3	1.383
4	1.534
6	1.732
8	1.863
9	1.915
13	2.070
14	2.100

Tableau VI 5. Table de CHAUVENET

CHAPITRE IV

Après différentes opérations, une nouvelle moyenne et un nouvel écart type sont calculés pour l'échantillon.

b) Test de normalité :

L'utilisation de la moyenne comme indicateur statistique et représentant de l'échantillon n'est possible que pour les distributions normales ; ajoutant à cela, le fait que le critère de CHAUVENET assume que la répartition des mesures soit gaussienne. Un test de normalité sur les grandeurs à manipuler (paramètres de SANDIA C_i) est indispensable.

Ce test est effectué en utilisant la fonction MATLAB « kstest » qui teste l'hypothèse nulle selon laquelle les données proviennent d'une distribution normale avec des valeurs spécifiques de la moyenne et de l'écart type ; ces paramètres sont utilisés pour centrer et étaler chaque élément du vecteur de données car, par défaut, les tests kstest pour une distribution normale standard.

4.3.3.2 La base de connaissance finale :

En premier lieu, le test de normalité est essentiel pour pouvoir utiliser la moyenne comme représentant des différents paramètres provenant de différents cas de sévérité pour le même défaut ; notamment pour l'utilisation du critère de CHAUVENET.

Le test de normalité est effectué pour chaque vecteur du même coefficient du champ d'estimés d'un défaut « x ». Par exemple, pour un défaut d'ombrage de faible sévérité, on a le champ d'estimés présenté dans le tableau (IV.6)

essai	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
1	0,97273151	0,04940931	-0,00039152	0,005853	-5,2561974	-0,01197644	-0,00622937
2	0,97315836	0,04910234	-0,00037986	0,03380817	-4,80405505	-0,01251283	-0,00622937
3	0,97572901	0,04170988	-0,00021319	0,05971353	-4,57765358	-0,01437811	-0,00622937
4	0,97548154	0,0417156	-0,00022337	0,04881916	-4,71883438	-0,013987	-0,00622937
5	0,97012396	0,05400529	-0,00043092	0,03545124	-5,60895369	-0,01239364	-0,00622937
6	0,97177087	0,05515854	-0,00039264	0,14710001	-4,03053976	-0,01602806	-0,00622937
7	0,9683231	0,06403453	-0,00058562	0,16419534	-3,80469697	-0,01380316	-0,00622937
8	0,96273573	0,06904208	-0,00058533	0,17661913	-4,05183232	-0,01305759	-0,00622937
9	0,95714194	0,07363223	-0,00066171	0,11541405	-4,41419967	-0,00894766	-0,00622937

Tableau VI 6. Champ d'estimés pour un défaut d'ombrage de faible sévérité

Par conséquent, on aura sept vecteurs, chacun contenant le coefficient C_i de chaque cas de défaut, sur lesquels on effectue le test de normalité.

Puis, on utilise le critère de CHAUVENET pour améliorer la valeur de la moyenne qui sera dépourvu de mesures suspectes.

Enfin, on obtient la base de connaissance constituant des différents paramètres de SANDIA relatifs à chaque défaut (voir tableau IV.7).

	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
modèle SAIN	0,9748601	0,03752602	-0,00169397	-0,03009496	-5,1044277	0,00218256	0,00413498
ombrage partiel de faible sévérité	0,97125676	0,05302219	-0,00040031	0,08394495	-4,60659539	-0,0135171	-0,00622937
ombrage partiel de sévérité importante	0,93039626	0,12469632	-0,00112222	0,27421061	-4,36485176	-0,01226194	-0,00622937
mismatch série de faible sévérité	0,98107595	-0,02110672	0,00134869	-2,50026485	-13,2000122	-0,00737921	-0,00625288
mismatch série de sévérité importante	3,14031525	-1,86774794	-0,00585531	0,70736918	27,2918835	-0,01354941	-0,00625288
court circuit de diode bypass	0,97785573	0,05322716	-0,00048023	0,0393044	-2,11192344	-0,00819603	0,00362453
inversion de diode bypass	0,97685153	0,05102733	-0,00046544	0,13449972	-3,9337034	-0,01279065	-0,00155133
claquage de diode bypass	1,09072232	-0,10809159	0,00073505	3,64487354	20,7981229	-0,00315681	-0,04062366

Tableau VI 7. Paramètres relatifs aux différents défauts du module

CHAPITRE IV

4.3.4 Etape 3 : développement du DLD :

4.3.4.1 *Choix d'un critère pour le déclenchement du diagnostic :*

La présence de défauts quelconque dans le panneau solaire implique la baisse de production d'électricité, et donc de puissance de fonctionnement du générateur ; si, en outre, le système effectue un suivi efficace du point de puissance maximum du générateur, alors la puissance de fonctionnement peut être considérée comme équivalente à la puissance maximale. Par conséquent, la présence d'un défaut est détectée en observant la baisse de la puissance maximale. Mais, pour discriminer la nature du défaut, cette approche ne suffit pas étant donné que deux défauts différents peuvent causer la même baisse en puissance.

4.3.4.2 *Approche pour la détection de la nature du défaut :*

L'algorithme de détection et localisation des défauts est résumé dans la figure (IV.6)

CHAPITRE IV

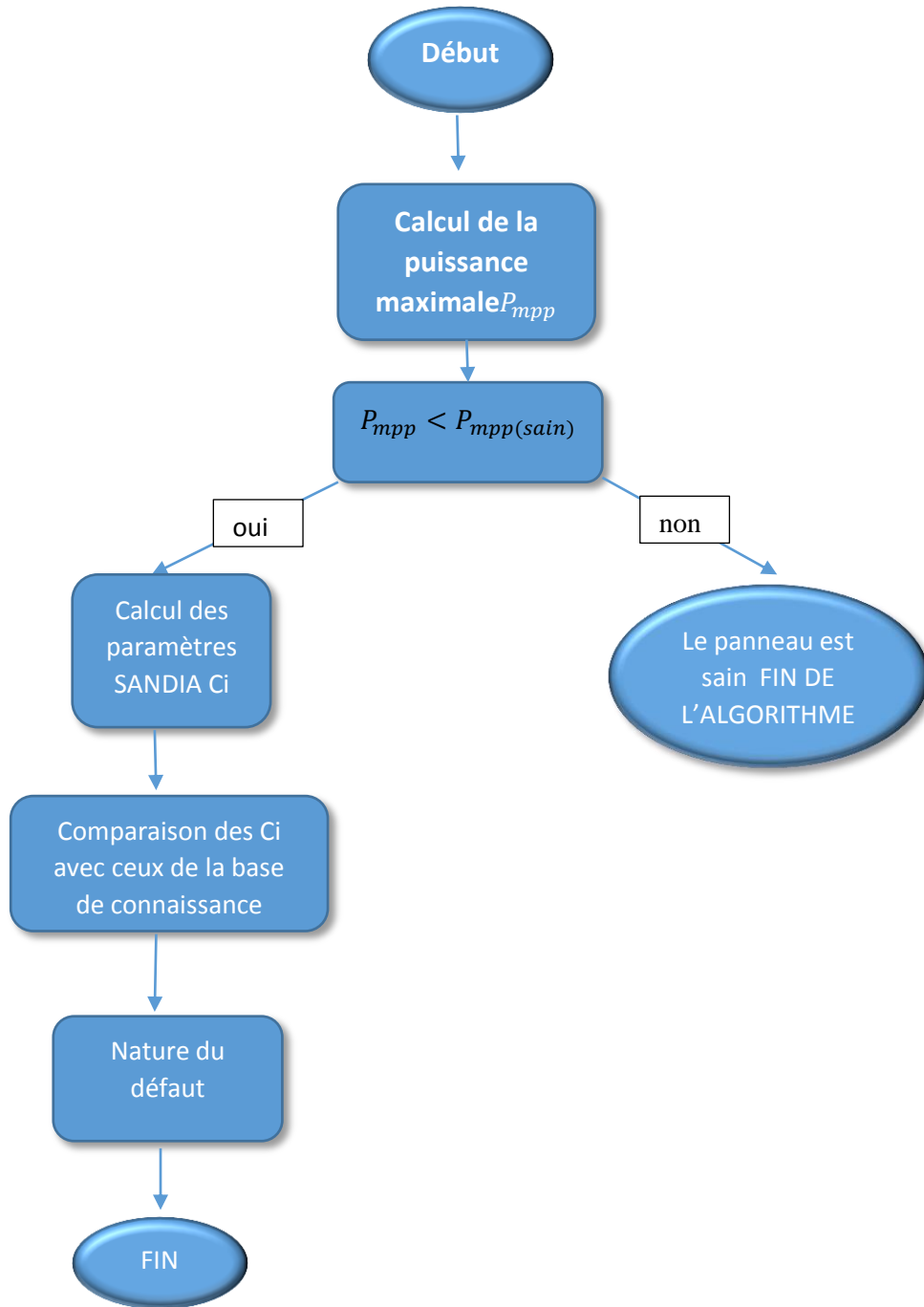


Figure IV 7. Déroulement de l'algorithme de DLD

En premier lieu, le panneau à diagnostiquer est soumis aux mêmes conditions de température et d'éclairement pour pouvoir calculer les coefficients C_i le caractérisant.

Dans l'étape précédente, on a construit une base de connaissance du mode défaille du panneau solaire à partir des différents paramètres de SANDIA (voir tableau (VI.6))

Une comparaison entre les coefficients du panneau en essai et ceux de la table ci-dessous et faite par le calcul suivant :

$$\Delta_i^k = |C_{imoy}^k - C_i| \quad (VI.9)$$

CHAPITRE IV

k désigne un défaut parmi ceux de la base de données.

$i=0,1,2\dots 6$

Δ_i^k Différence entre les coefficients du panneau C_i et ceux pré-calculés pour chaque défaut « k » C_{imoy}^k

Cette comparaison sera effectuée pour seulement les six premiers paramètres correspondants au point de puissance maximale (tension et courant). La décision sur la nature du défaut se fait après le calcul de toutes les valeurs de Δ où l'on aura une matrice de valeurs où chaque colonne représente les différences relatives à un seul paramètre parmi les 6 pour tous les différents défauts et chaque ligne représente les différences relatives de tous les paramètres d'un même défaut ; on calcule le minimum de la matrice suivant les colonnes ainsi, le défaut qui génère le plus de valeurs minimale est considéré comme étant le plus probable de la défaillance.

Si plusieurs défauts ont la même probabilité suivant le calcul précédent, le coefficient caractérisant la tension de circuit ouvert sera pris en considération afin de trancher entre les cas et ce en prenant celui qui génère le Δ minimale.

3.1. Test de l'algorithme :

On prend les différents défauts simulés dans la première partie, dans le but de construire la base de connaissance, dont les paramètres de SANDIA sont connus afin de tester l'approche élaboré précédemment, prenons l'exemple de différents défauts (mismatch série, ombrage, court-circuit et claquage de diode bypass)

	C0	C1	C2	C3	C4	C5	C6
défaut (D1)	2,72553832	-1,53152496	-0,0044923	0,00537181	26,3312072	-0,01383226	-0,00625288
défaut (D2)	0,97572901	0,04170988	-0,00021319	0,05971353	-4,57765358	-0,01437811	-0,00622937
défaut (D3)	0,97785573	0,05322716	-0,00048023	0,05895648	-3,16788809	-0,01229404	-0,00130242
défaut (D4)	0,99457899	0,02864452	-0,0012382	3,3496825	24,6501715	0,00756771	-0,06476221

Tableau VI 8. Coefficients des différents défauts pour le test de l'algorithme

On calcule pour chacun des défauts, les différentes valeurs de delta.

	$\Delta C0$	$\Delta C1$	$\Delta C2$	$\Delta C3$	$\Delta C4$	$\Delta C5$	$\Delta C6$
ombrage partiel de faible sévérité	1,75428156	1,58454715	0,004092	0,07857313	30,9378026	0,00031515	2,3513E-05
ombrage partiel de sévérité importante	1,79514206	1,65622128	0,00337009	0,26883879	30,696059	0,00157031	2,3513E-05
mismatch série de faible sévérité	1,74446237	1,51041824	0,00584099	2,50563667	39,5312195	0,00645305	7,0586E-11
mismatch série de sévérité importante	0,41477693	0,33622298	0,00136301	0,70199736	0,96067626	0,00028285	7,9594E-11
court circuit de diode bypass	1,74768259	1,58475212	0,00401207	0,03393259	28,4431307	0,00563623	0,00987741
inversion de diode bypass	1,74868679	1,58255229	0,00402686	0,12912791	30,2649106	0,0010416	0,00470155
claquage de diode bypass	1,634816	1,42343337	0,00522735	3,63950172	5,53308431	0,01067544	0,03437077

Tableau VI 9. Les valeurs de Δ pour le défaut D1

CHAPITRE IV

	$\Delta C0$	$\Delta C1$	$\Delta C2$	$\Delta C3$	$\Delta C4$	$\Delta C5$	$\Delta C6$
ombrage partiel de faible sévérité	0,00447225	0,01131232	0,00018711	0,02423142	0,02894182	0,00086101	2,6514E-10
ombrage partiel de sévérité importante	0,04533275	0,08298645	0,00090902	0,21449708	0,21280182	0,00211616	1,6751E-10
mismatch série de faible sévérité	0,00534694	0,0628166	0,00156188	2,55997838	8,62235867	0,0069989	2,3513E-05
mismatch série de sévérité importante	2,16458624	1,90945781	0,00564212	0,64765565	31,8695371	0,0008287	2,3513E-05
court circuit de diode bypass	0,00212672	0,01151728	0,00026704	0,02040913	2,46573013	0,00618208	0,0098539
inversion de diode bypass	0,00112252	0,00931746	0,00025225	0,0747862	0,64395018	0,00158745	0,00467804
claquage de diode bypass	0,11499331	0,14980147	0,00094824	3,58516001	25,3757765	0,0112213	0,03439429

Tableau VI 10. Les valeurs de Δ pour le défaut D2

	$\Delta C0$	$\Delta C1$	$\Delta C2$	$\Delta C3$	$\Delta C4$	$\Delta C5$	$\Delta C6$
ombrage partiel de faible sévérité	0,00659897	0,00020497	7,9928E-05	0,02498846	1,4387073	0,00122306	0,00492695
ombrage partiel de sévérité importante	0,04745947	0,07146916	0,00064198	0,21525412	1,19696367	3,2097E-05	0,00492695
mismatch série de faible sévérité	0,00322022	0,07433388	0,00182892	2,55922134	10,0321242	0,00491483	0,00495046
mismatch série de sévérité importante	2,16245952	1,9209751	0,00537508	0,64841269	30,4597716	0,00125537	0,00495046
court circuit de diode bypass	1,651E-10	2,501E-09	6,1832E-11	0,01965208	1,05596465	0,00409801	0,00492695
inversion de diode bypass	0,0010042	0,00219983	1,4791E-05	0,07554324	0,76581531	0,00049661	0,00024891
claquage de diode bypass	0,11286659	0,16131875	0,00121528	3,58591706	23,966011	0,00913723	0,03932124

Tableau VI 11. Les valeurs de Δ pour le défaut D3

	$\Delta C0$	$\Delta C1$	$\Delta C2$	$\Delta C3$	$\Delta C4$	$\Delta C5$	$\Delta C6$
ombrage partiel de faible sévérité	0,02332223	0,02437767	0,00083789	3,26573755	29,2567669	0,02108481	0,05853283
ombrage partiel de sévérité importante	0,06418273	0,0960518	0,00011598	3,07547189	29,0150233	0,01982965	0,05853283
mismatch série de faible sévérité	0,01350304	0,04975124	0,00258689	5,84994735	37,8501838	0,01494691	0,05850932
mismatch série de sévérité importante	2,14573626	1,89639246	0,00461711	2,64231332	2,64171198	0,02111712	0,05850932
court circuit de diode bypass	0,01672326	0,02458264	0,00075797	3,3103781	26,762095	0,01576373	0,06838674
inversion de diode bypass	0,01772746	0,02238281	0,00077276	3,21518277	28,5838749	0,02035836	0,06321088
claquage de diode bypass	0,09614333	0,13673611	0,00197325	0,29519104	3,85204859	0,01072452	0,02413855

Tableau VI 12. Les valeurs de Δ pour le défaut D4

Résultats de test et prise de décision :

Selon les tableaux précédents, les défauts D1 et D3 peuvent être détectés en n'utilisant que les six premiers paramètres de SANDIA et on conclue que D1 est un défaut mismatch série et de sévérité importante et D3 est résultat du court-circuit de DBP et D4 est un défaut de DBP claquée. Mais aucune autre information supplémentaire sur la sévérité ne peut être apportée.

Tandis que pour le défaut D2, en comparant les six paramètres SANDIA relatifs à la puissance maximale (tension et courant à ce point), pour décider de la nature du défaut, on a la même probabilité que la cause soit un défaut de type inversion de DBP ou de type ombrage partiel ; dans ce cas, on fait appel au septième paramètre relatif à Voc ainsi on conclue que la cause du dysfonctionnement est un défaut de type ombrage partiel de faible sévérité

Les courbes suivantes montrent l'évolution du point de puissance maximale des différents défauts à tester (D1, D2, D3 et D4) ainsi que celles de défauts qui sont dans la base de connaissance et ceci permet de valider graphiquement les résultats des tests précédents. Pour les défauts D1, D3 et D4, on remarque une similitude entre l'évolution de son MPP ainsi que celui du défaut responsable de sa baisse de production tandis que pour le défaut D2, on a confusion entre plusieurs courbes de l'évolution du MPP d'où la nécessité d'utiliser le paramètre relatif à la tension e circuit ouvert.

CHAPITRE IV

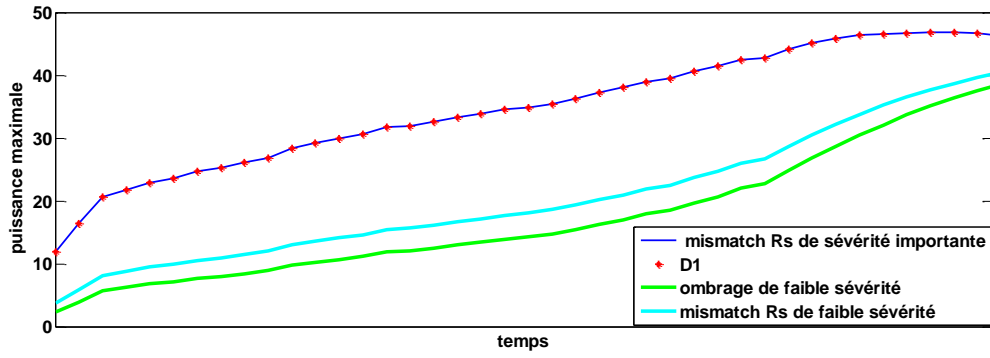


Figure IV 8. Évolution de la puissance maximale du défaut D1

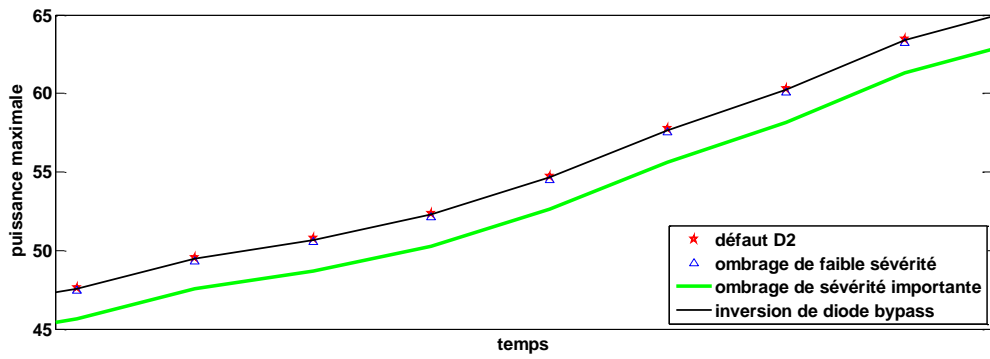


Figure IV 9. Évolution de la puissance maximale du défaut D2

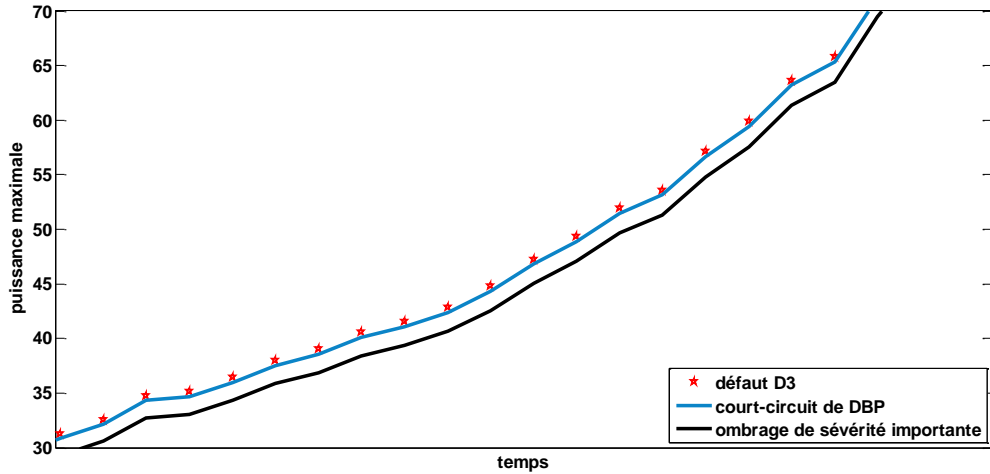


Figure IV 10. Évolution de la puissance maximale du défaut D3

CHAPITRE IV

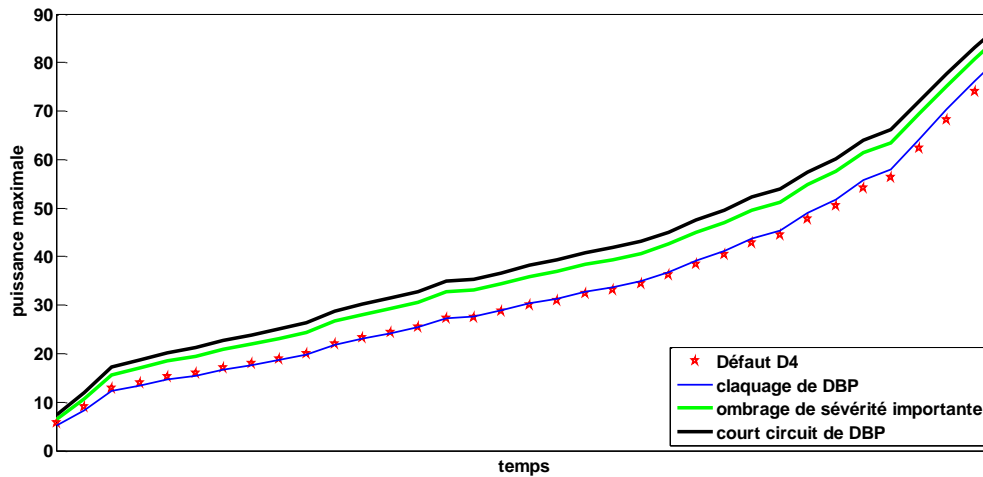


Figure IV 11. Évolution de la puissance maximale du défaut D4

4.4 Validation de l'algorithme de diagnostic :

Comment s'assurer que le système de diagnostic développé soit le plus performant possible ? Pour répondre à une telle question, il convient tout d'abord de définir en vertu de quels critères le système peut être évalué. D'une manière générale, nous pouvons regrouper les différents critères de performance du système de détection de la manière suivante : [20]

4.4.1 Détectabilité :

C'est l'aptitude du système de diagnostic à pouvoir déceler la présence d'une défaillance sur le système. Elle est fortement liée à la notion d'indicateurs de défauts (symptômes) : le générateur de symptômes doit, d'une certaine manière, être sensible aux défauts que l'on souhaite détecter. [10] Dans notre cas, un défaut est détecté lors de la baisse de puissance maximale qui est considéré comme un bon indicatif de présence de défaillance.

4.4.2 localisation :

C'est la capacité du système de diagnostic à remonter directement à l'origine du défaut. [10] Ceci a été validé lors des tests effectués précédemment. On a vu que l'algorithme établi a la capacité de détecter et localiser la plupart des défauts simulés.

4.4.3 Sensibilité :

Elle caractérise l'aptitude du système à détecter des défauts d'une certaine amplitude. [10] Dans notre cas, la variation de l'amplitude de défauts est caractérisée par les différents cas de sévérités simulés au début. Cependant, l'algorithme détecte la nature du défaut sans pour autant détecter le degré de sévérité pour tous les défauts. On a pu détecter des défauts d'ombrage et mismatch série de sévérité plus ou moins importante sans apporter plus de précision.

4.4.4 Robustesse :

Lors de la variation de la condition de fonctionnement, le système de diagnostic doit garantir sa performance en détectant les défauts selon l'exigence. Dans cet Algorithme, on a supposé des conditions de fonctionnement (Température et éclairage) d'une journée choisi aléatoirement. Cela veut dire que malgré les variations des conditions de fonctionnement durant toute la période d'essai, le système de diagnostic garantit sa performance en détectant les défauts selon leur nature. [6]

En pratique, d'autres critères sont à prendre en considération. En phase d'industrialisation, les contraintes ergonomiques et économiques sont essentielles. Les aspects

CHAPITRE IV

temps réel sont par exemple prépondérants pour un système de diagnostic embarqué sur un système PV. La rapidité de détection peut être un facteur déterminant. De même, les coûts économiques vont conditionner la stratégie de diagnostic : le système nécessite-t-il des composants trop chers pour sa conception, le temps de développement est-il trop important ? Autant de points à vérifier afin de satisfaire le cahier des charges. [10]

4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons essentiellement repris les différentes étapes effectuées pour le développement d'un algorithme pour le diagnostic des défauts dans un panneau solaire, qui consiste en leurs détections puis leurs localisations en définissant la nature du défaut.

Cet algorithme repose sur la méthode de classification qui consiste à établir une base de connaissance sur le comportement défaillant du PPV, qui est constitué des paramètres estimés du modèles SANDIA. Le modèle SANDIA s'avère être le plus fiable pour effectuer le diagnostic car il rend compte des changements des conditions de fonctionnement.

Nous avons repris quatre exemples pour illustrer la démarche à suivre pour le diagnostic et pour pouvoir valider l'algorithme.

Conclusion générale et perspective :

CONCLUSION

Conclusion générale et perspective :

Dans une installation PV, la supervision et le diagnostic sont indispensables pour minimiser les effets des défauts et assurer un meilleur rendement du panneau. A cet effet, on effectue le diagnostic de différents défauts d'un GPV en proposant un algorithme en prenant le moins de mesures possible afin de respecter les contraintes économiques. On a développé le long de ce projet une méthode pour la détection et localisation des défauts.

Pour aborder le diagnostic, d'abord une présentation sur les systèmes PV a été faite ainsi que la modélisation des générateurs PV. Le modèle de BISHOP, étant le modèle qui représente au mieux le fonctionnement réel de la cellule, a été choisi pour simuler le comportement de la cellule PV.

Puis, une étude sur le comportement sain et défaillant du module PV a été menée ; sur ce, plusieurs simulations ont été effectuées.

Pour la construction de l'algorithme, la méthode de classification a été choisie, qui est fondée sur l'élaboration de la base de connaissance en premier lieu puis la modélisation des défauts par les paramètres de SANDIA en se reposant sur des approches statistiques pour améliorer les résultats.

Ce travail a été conclu par la validation de l'approche proposée pour la détection et localisation des défauts pour la plupart des défauts simulés.

Lors des simulations des circuits électriques, on a rencontré plusieurs problèmes notamment celui des boucles algébriques (algebraic loop solver) donc on a été limité par le nombre de simulations effectuées (type du système étudié, types de défauts, plusieurs essais de sévérité).

Ce travail de mémoire a ouvert de nombreuses perspectives à cibler et qui se résument ainsi :

- Amélioration des résultats de simulation en travaillant sur des générateurs de grande puissance ce qui augmente le nombre de défauts pouvant se produire et qui permettra de généraliser l'approche étudiée. Mais aussi en augmentant le nombre d'essais relatifs aux différents cas de sévérité pour un seul défaut.
- Travailler sur d'autres logiciels afin d'éviter le problème rencontré dans plusieurs cas de simulations.
- Utilisation de nouvelles approches pour la construction de la base de connaissance pour améliorer le diagnostic tel que : la logique floue, les réseaux de neurones artificiels, méthodes utilisant l'intelligence artificielle.
- Proposer une approche pour décider de la sévérité du défaut détecté.
- Elargir la base de connaissance en prenant compte de la combinaison des défauts.
- Validation des résultats de simulation dans la pratique en mettant en œuvre l'approche.

Bibliographie

- [1] A. C. Pastor, «conception et réalisation des modules photovoltaïques électroniques,» thèse de doctorat, Institut Nationale des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.
- [2] L. Bun, «détection et localisation des défauts pour un système PV,» Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [3] H. K. A. e. M. H. Abbes, *Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque*, revue des Energie Renouvelables Vol. 17N°3 435-445, 2014.
- [4] P. A. Chovet, *Physique des semi-conducteurs*, Ecole polytechnique universitaire de Marseille, Département Micro-électronique et télécommunication, 2004/2005.
- [5] K. HELALI, *Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative*, Université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou: Magister en electrotechnique, 2012.
- [6] K. SAAOUI, «détection et localisation des défauts dans un panneau PV par le modèle SANDIA,» ingénieur d'état en automatique, école nationale polytechnique, Alger, 2015.
- [7] F. SLAMA, «modélisation d'un système multi-générateurs PV interconnectés au réseau électrique,» Magister en electrotechnique, Université Farhat Abbas, SETIF.
- [8] «Conso Neo,» [En ligne]. Available: <http://energies-renouvelables.consonéo.com/guide/entreprise-ecologique/les-differents-modeles-panneaux-photovoltaïques/1260/>.
- [9] M. BRESSAN, «développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque,» Université de Perpignan Via Domitia, 2014.
- [10] A. BELAOUT, «Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes PV par emploi de la caractéristique courant-tension,» Magister en instrumentation, université setif 1, 2014.
- [11] «écohabitation,» [En ligne]. Available: <http://www.ecohabitation.com/guide/fiches/differents-types-installations-solaires-photovoltaïques>.
- [12] V. K. B. Reena Rathe, «comparative analysis to study the effects of partial shading on pv array with lt-spice and matlab-simulink environment,» *international journal of engineering research & technology (IJERT)*, vol. Vol 2, n° 1 ISSN 2278-0181, 2013.
- [13] W. J. D. L. King, «photovoltaic array performance model,» SANDIA REPORT, SANDIA national laboratories, 2004.
- [14] T. KEMPOWSKY, «Surveillance de procédés à base de méthodes de classification : conception d'un outil d'aide pour la détection et le diagnostic des défaillances,» thèse de doctorat dans les systèmes industriels, institut national des sciences appliquées de TOULOUSE, 2004.
- [15] «data rejection of bad data- CHAUVENET's criterion-,» [En ligne]. Available: <http://www.ohio.edu/people/bayless/seniorlab/chaуvenet.pdf>.