

Mémoire de Fin d'études

Pour l'Obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique Industrielle

Filière : Electrotechnique

Option : Electrotechnique industrielle

Présenté par :

Hamdoud Mohamed Maamoune

Melili Ramzi

Contribution au Diagnostic de Pannes dans un Système Photovoltaïque au Niveau de l'Onduleur à Cinq Niveaux de type NPC

Devant le Jury composé de :

Soutenue le : **24/ 09 /2024**

Nom & prénoms	Grade	Qualité	Domiciliation
AZZEDINE Mohammed	MAA	Président	UMAB
CHAOUCH Abdellah	Pr.	Examineur	UMAB
BENYAMINA Mansour	MCA	Encadrant	UMAB
BENZIDANE Mohammed Ridha	MAB	Co-Encadrant	UMAB

Remerciement

Nos remerciements vont tout premièrement, à ALLAH le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience durant toutes ces années d'études.

Nous adressons nos sincères remerciements et reconnaissances à notre encadrant Monsieur Benyamina Mansour, Enseignant-chercheur à l'université Abdelhamid Ibn Badis, pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée Pour la réalisation de ce mémoire.

On exprime notre profond respect pour Monsieur AZZEDINE Mohammed d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire de fin d'étude. Nous tenons également à remercier Monsieur CHAOUCH Abdellah Enseignant-chercheur à l'Université Abdelhamid Ibn Badis, qui a accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde reconnaissance à notre Co-Encadrant, BENZIDANE Mohammed Ridha, maître de conférences en génie électrique à la Faculté des sciences et technologie de l'Université de Mostaganem, pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée dans la réalisation de ce mémoire.

La réalisation de ce mémoire a été grandement facilitée par le formidable soutien moral de nos familles. Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude, tout particulièrement à nos parents, pour leur soutien inébranlable et leurs encouragements constants tout au long de ces années.

Nous adressons également un immense merci à tous nos amis et collègues pour leur aide précieuse, leur appui et leurs encouragements incessants, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce mémoire.

Symboles et abréviations	
Introduction générale	01
Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques PV	
1- Introduction	05
2- Etat de l'art	05
3- L'énergie solaire	05
4- Rayonnement solaire	06
4-1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	06
4-1-1 Rayonnement direct	06
4-1-2 Rayonnement diffus	06
4-1-3 Rayonnement global	06
5- Effet photovoltaïque	07
6- Cellule photovoltaïque	07
6-1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	07
6-2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)	08
6-2-1 1ère génération	08
6-2-2 2ème génération : couches minces "thin films"	10
7- Module photovoltaïque	11
7-1 Association des modules	12
8- String PV	13
9- Champ PV	14
10- Protection d'un générateur photovoltaïque	14
10-1 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques	14
10-1-1 Protection contre les contacts directs	14
10-1-2 Protection contre les contacts indirects	14

10-2	Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions	14
10-3	Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités	15
10-3-1	Ombrage d'un générateur	15
10-3-2	Nécessité de protection contre les courants inverses	15
10-3-3	Diode de by-pass	15
10-3-4	Diode anti-retour	16
11-	Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques	17
11-1	Définition	17
11-2	Technologies des onduleurs	17
11-2-1	Onduleurs modulaires (module inverter)	17
11-2-2	Onduleurs centralisés (central inverter)	17
11-2-3	Onduleurs "String" ou "de Rangée"	18
12-	Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT)	18
12-1	Principe de la commande MPPT	19
12-2	Méthode Perturbation & Observation (P&O)	19
12-3	Méthode Logique Floue	20
13-	Conclusion	21
Chapitre 2 : Méthodes de diagnostic des défauts dans un système PV.		
1-	Introduction	23
2-	Défauts de fonctionnement d'un générateur PV	23
3-	Défauts du système photovoltaïque	23
3-1	Défauts dans le générateur PV	24
3-2	Défauts dans la boîte de jonction	26
3-3	Défaut dans le système de câblage	27
3-4	Défauts dans le système de protection	28

3-5 Défauts dans l'onduleur	29
3-6 Défauts dans le système d'acquisition des données	30
3-7 Classification de défauts d'un champ PV	31
4- Diagnostic des défauts dans un système photovoltaïque	32
4-1 Définition du diagnostic	32
4-2 Etapes du diagnostic	32
5- Méthodes de diagnostic d'un champ PV	33
5-1 Méthodes de diagnostic courantes industrialisées	33
5-1-1 Méthodes non-électriques	33
5-1-2 Méthodes électriques	34
5-2 Méthodes dans la littérature	34
5-2-1 Méthode de réflectométrie	35
5-2-2 Analyse de la puissance et de l'énergie produite	35
5-2-3 Analyse du point de fonctionnement	36
5-2-4 Analyse de la caractéristique statique	36
6- Conclusion	37
Chapitre 3 : Modélisation et simulation d'un système PV sans défauts	
1- Introduction	39
2- Modélisation d'une cellule photovoltaïque	39
2.1 Modèle électrique idéal à une diode	39
2.2 Modèle électrique réel à une diode	40
2.3 Système photovoltaïque connecté à une charge RL	42
2.4 Caractérisation du module PV	42
3- Modélisation du convertisseur DC-DC BOOST	44
3-1 Fonctionnement	45

3-2	Simulation du convertisseur DC-DC BOOST	46
4-	Commande MPPT	47
5-	Différentes techniques de contrôle d'un onduleur de tension	48
5-1	Commande par modulation sinus – triangle	49
5-2	Objectifs de la technique MLI	49
5-3	Simulation de Commande MLI par sinusoïdale à triangles multiples	50
6-	Onduleur à cinq niveaux de types NPC	54
6-1	Principe de fonctionnement	55
6-2	Simulation de l'Onduleur à cinq niveaux de types NPC	59
7-	Conclusion	61
Chapitre 4 : Diagnostic et classification des défauts par la méthode des réseaux de neurones		
1-	Introduction	63
2-	Historique	63
3-	Réseaux de neurones	64
3-1	Neurone biologique	64
3-2	Neurone formel	65
4-	Fonctions d'activation	65
5-	Architecture des réseaux de neurones	67
6-	Apprentissage des réseaux de neurones	68
6-1	Les types d'apprentissage	68
7-	Application des RNA pour la détection des défauts de l'onduleur	69
7-1	Construction des blocs RNA	70
8-	Résultats et interprétations	71
9-	Conclusion	79

ملخص:

ما زالت موثوقية وكفاءة أنظمة الطاقة المتجددة موضوعاً مهماً في الوقت الحالي. مثل جميع الأنظمة الصناعية، تتعرض أنظمة الطاقة المتجددة للأعطال والعيوب في تركيباتها أو في أدائها، مما قد يتسبب في فشل هذه الأنظمة وتدهورها خلال فترة التشغيل. ولذا، يتطلب الأمر تطوير نظام تشخيصي يهدف بشكل رئيسي إلى توفير مؤشرات لكشف الأعطال، وبالتالي الحفاظ على إنتاج الطاقة من النظام الكهروضوئي. يهدف هذا العمل إلى تقديم نظرة عامة حول الطرق المختلفة لتشخيص الأنظمة الكهروضوئية، بما في ذلك التشخيص باستخدام الذكاء الاصطناعي في قواطع المحول العاكس.

Résumé :

La fiabilité et l'efficacité des systèmes d'énergie renouvelable restent un sujet important à l'heure actuelle. Comme tous les systèmes industriels, les systèmes de production à base d'énergie renouvelable sont exposés à des pannes et des défauts dans leurs installations ou ces performances, ce qui peut entraîner leurs défaillances et la détérioration au cours de leurs fonctionnements. Ainsi, il est nécessaire de développer un système de diagnostic visant principalement à fournir des indicateurs pour la détection des pannes, permettant ainsi de maintenir la production d'énergie du système photovoltaïque. Ce travail vise à offrir un aperçu des différentes méthodes de diagnostic des systèmes photovoltaïques, y compris le diagnostic à l'aide de l'intelligence artificielle dans les bras d'onduleur.

Abstract:

The reliability and efficiency of renewable energy systems remain an important topic at present. Like all industrial systems, renewable energy systems are subject to failures and defects in their installations or performance, which can cause these systems to fail and degrade over the course of operation. Therefore, it is necessary to develop a diagnostic system primarily aimed at providing indicators for fault detection, thereby maintaining energy production from the photovoltaic system. This work aims to provide an overview of the different methods for diagnosing photovoltaic systems, including diagnosis using artificial intelligence.

Mots clés :

Énergie solaire, Cellules solaires, Panneaux solaires, Conversion d'énergie, Électricité
Durabilité, Installations, onduleur.

Symboles et abréviations

PV : Photovoltaïque.

MPPT: Maximum power point tracker.

AM : Air Mass.

Si : Silicium

Cdte : Le tellure de cadmium

Fj : Le sulfure de cadmium

CIS : Des alliages de cuivre indium et sélénium

WC : Watt Colomb.

I_{cc} : Tension de circuit ouvert.

N_s : Nombre des cellules en série.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

DC : Direct curent.

AC : Alternatif curent.

GPV : Générateur photovoltaïque.

V_{ref} : Tension de référence.

D : Rapport cyclique du convertisseur.

E : L'éclairement absorbé par la cellule.

PWM : Pulse Width Modulation.

RN : Réseau de neurones.

RNA : Réseau de neurones artificielle.

Introduction Générale

1. Introduction générale

L'énergie est un élément essentiel dans la vie humaine et l'un des moteurs du développement des sociétés, depuis des milliers d'années l'homme utilise l'énergie pour satisfaire ses besoins vitaux.

Depuis le premier choc pétrolier en 1973, et face à une demande croissante d'énergie et aussi l'augmentation de la pollution de l'environnement, les pays industrialisés s'orientent progressivement vers les énergies nouvelles et renouvelables.

Les sources essentielles des énergies renouvelables sont fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau et les marées. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie. L'énergie électrique est le poumon de la société moderne et industriel, et aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine photovoltaïque est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer afin de remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire.

Au cours des dix dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance très remarquable, grâce aux différents facteurs stimulants : réduction des coûts de production et politiques de soutien. Ces facteurs stimulants rendent le retour sur investissement d'une installation photovoltaïque de plus en plus intéressant.

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 voire même l'indisponibilité totale de celui-ci.

Toutes ces conséquences défavorables vont évidemment réduire la productivité de l'installation, et donc réduire son profit, sans compter le coût de maintenance pour remettre le système en état normal.

Cependant les installations photovoltaïques (comme le cas de tous les systèmes électriques et électroniques), tombent en panne et se dégradent pendant la durée de fonctionnement.

Permettre de diagnostiquer finement et de procéder à la détection et la localisation de défauts dans une installation PV augmente la productivité et réduit les coûts de maintenance en augmentant le taux de disponibilité des installations et en veillant à ce que leur rendement soit optimal. L'ajout de fonctions avancées de surveillance, de diagnostic et de supervision ne devra pas être ressenti par l'exploitant.

A la lumière de ce que nous venons d'avancer et afin de présenter une analyse concrète, nous présentons actuellement ce mémoire qui est divisé en quatre chapitres avec un objectif clair :

- On a fait une description détaillée des systèmes photovoltaïques. Il s'agit d'abord de relater l'effet photovoltaïque et plus précisément le phénomène physique exploité pour générer une énergie électrique tout en passant par la fabrication des cellules et module photovoltaïques, et les composants principaux qui le constituent.
- Le chapitre 2 est un exposé détaillé sur les méthodes de diagnostic des défauts dans les systèmes PV afin de connaître les défaillances qui peuvent existés dans la chaine de conversion de l'énergie photovoltaïque.
- Ensuite on a abordé la simulation de chaque élément constitutif de ce système : cellule PV, convertisseur DC/DC (Boost élévateur), contrôleur MPPT et l'onduleur multiniveaux de type NPC.
- En fin on a est consacré aux résultats de diagnostic de pannes sur un GPV dont nous avons choisis deux types de défauts sur les interrupteurs au niveau du 1^{er} bras du convertisseur DC/AC dans le cas de court-circuit et circuit-ouvert permanant des interrupteurs. Ce travail s'achèvera par une conclusion générale, et une bibliographie de chaque chapitre qui regroupe l'ensemble des documents consultés au cours du travail réalisé.

Chapitre 1

1-Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Le mot "photovoltaïque" vient de la grecque, "Photo" qui signifie lumière et de "Voltaïque" qui tire son origine du nom du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité ».

Ce chapitre présente des généralités sur le system PV, ainsi que des notions sur l'effet photovoltaïque, cellules photovoltaïques, Les Onduleurs et La Poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

2- Etat de l'art :

Voici quelques dates importantes dans l'histoire de l'énergie photovoltaïque :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est fabriquée ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace. [1]

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie.

3-L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre

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

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon. [2]

4- Rayonnement solaire :

4-1 Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales. [3]

4-1-1 Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère

4-1-2 Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère.

4-1-3 Rayonnement global :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lieu appelé Albédo (ρ) $0 \leq \rho \leq 1$.

5- Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque dont le terme souvent abrégé par les lettres P et V est un phénomène physique propre à certains matériaux communément appelés les semi-conducteurs (souvent le silicium). Il est composé à partir de 3 étapes qui se résument en l'absorption de lumière par le matériau de la cellule P.V. Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques et finalement la collecte de charge.

La puissance du champ photovoltaïque est directement proportionnelle aux nombres de cellules employées dans une installation. Seulement, une exposition au rayonnement homogène de l'ensemble de la surface est exigée pour une meilleure rentabilité. Pailleurs, l'obtention de puissance maximale peut être assurée par observation des 3 critères : l'orientation, l'inclinaison et la température. Cette dernière doit être maintenue à un niveau minimal au sein du dispositif par une ventilation importante.[4]

6- Cellule photovoltaïque :

6-1 Principe de fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.

Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. Une jonction (dite p-n) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de

conduction. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule. [5] (voir la figure 1.1)

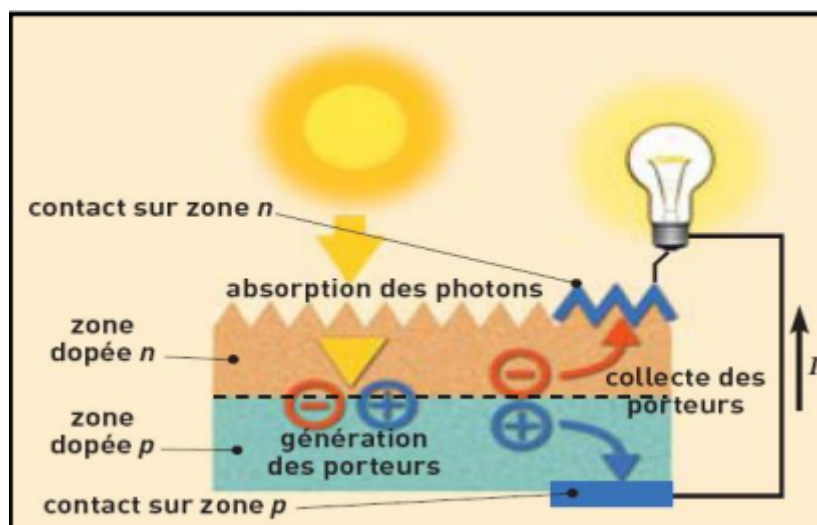


Figure 1.1 : Principe de la conversion photovoltaïque.

6-2 Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui lorsqu'il est exposé au spectre solaire génère une tension électrique par effet photovoltaïque. Toutes les cellules sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs. La plupart du temps, c'est le silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi le sulfure de cadmium (Cds), le tellure de cadmium (Cdte), des alliages de cuivre indium et sélénium (CIS),

6-2-1 1ère génération :

a) Cellules cristallines :

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pur, reste très énergivore et coûteuse. La limite théorique de rendement de ce type de cellule est de $\pm 27\%$. Les cellules les plus récentes s'approchent chaque année de plus en plus de cette limite.

Méthode de fabrication :

Le cristal formé par refroidissement du silicium en fusion dans des creusets parallélépipédiques est ensuite découpé en fines tranches appelées "wafers". Les cellules sont

alors obtenues après “dopage” et traitement de surface. On distingue deux types de cellules cristallines :

b) Les cellules polycristallines :

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l’aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.[6] (voir la figure 1.2)

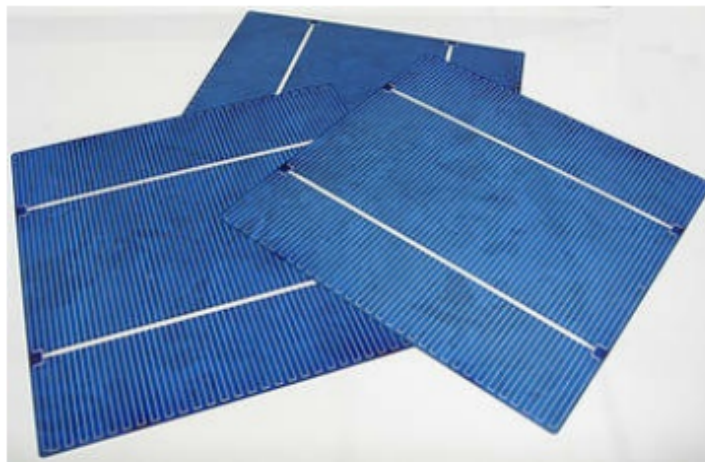


Figure 1.2 : Les cellules poly cristallines

Rendement :

16-18 % (On obtient ainsi une puissance de 160 à 180 WC par m²) Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins.

c) Les cellules monocristallines :

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. (voir la figure 1.3)

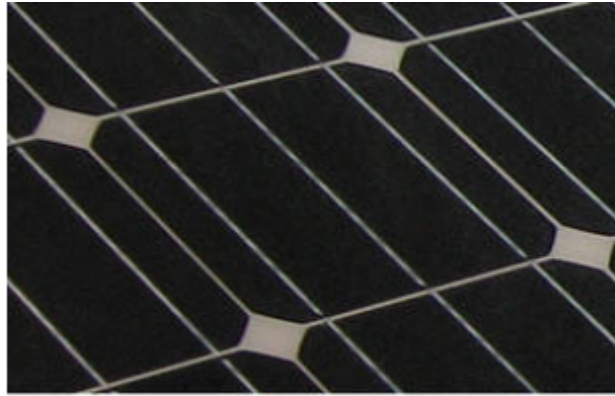


Figure 1.3 : Les cellules monocristallines

Rendement :

. 17-20 % (On obtient ainsi une puissance de 170 à 200 WC par m²). Sans entrer dans le détail, si aujourd'hui les cellules sont de type "Al-BSF" (aluminium back surface field) l'évolution vers des cellules "PERC" (passived emitter and rear cell) permettra prochainement de monter à ± 23 % tandis que les cellules à hétérojonctions promettent déjà d'atteindre les 26 %. (26.6 % déjà obtenu en laboratoire)

6-2-2 2ème génération : couches minces "thin films" :

Dans le cas de "couches minces", le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). Le silicium amorphe (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium, le di sélénium de cuivre indium font notamment partie de cette génération. Ce sont des cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les (montres, calculatrices, dites solaires.

a) Silicium amorphe :

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est grise très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites "solaires".

(voir la figure 1.4)

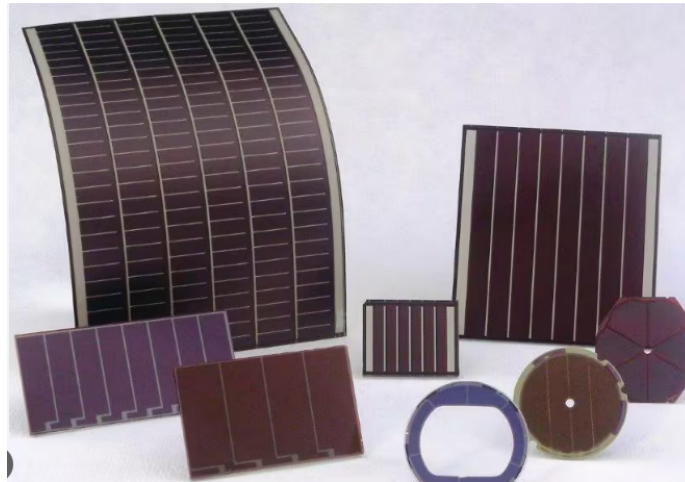


Figure 1.4: Les cellules amorphe

7- Module photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. (voir la figure 1.5 et 1.6)

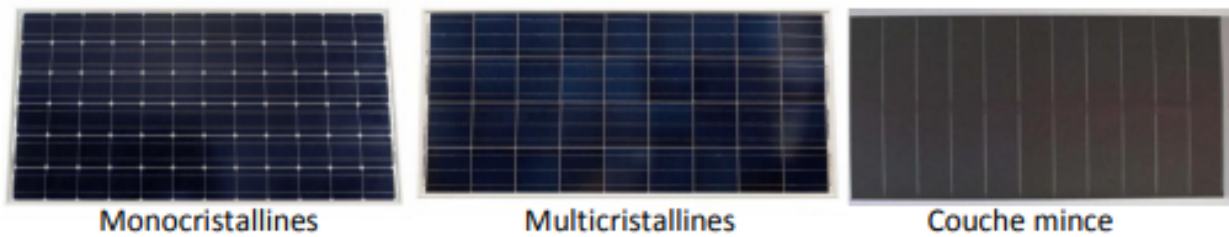


Figure 1.5 : Module photovoltaïque

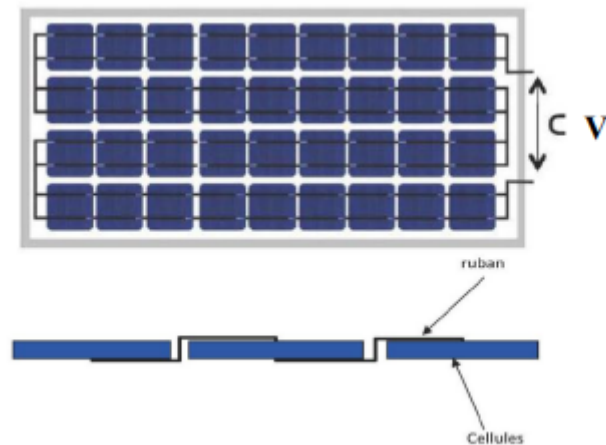


Figure 1.6 : Câblage des cellules dans un module

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.[2]

7-1 Association des modules :

a) Association série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même, mais la tension augmente proportionnellement au nombre des cellules /modules en série on explique par les équations suivantes : (voir la figure 1.7)

$$V_{co \text{ série}} = V_{co} \times N_s \quad (1.1)$$

$$I_{cc \text{ série}} = I_{cc} \quad (1.2)$$

N_s : nombre des cellules en série.

V_{co} : tension de circuit ouvert.

I_{cc} : courant de court-circuit.

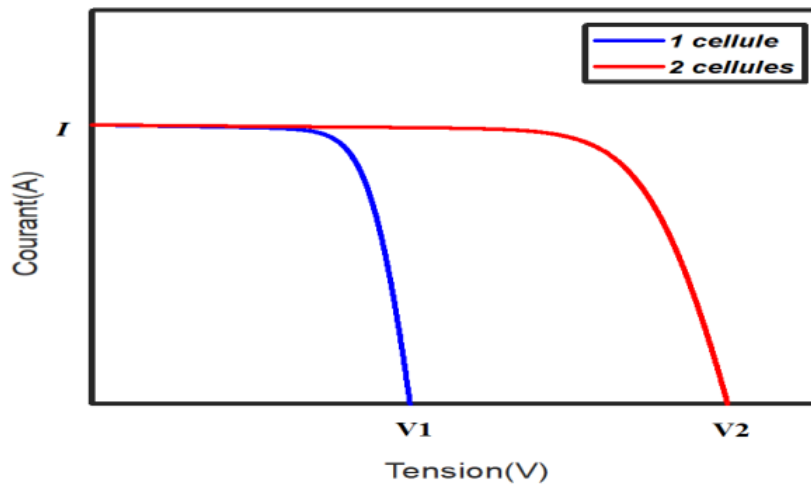


Figure 1.7 : Caractéristique I-V de l'association série des cellules.[7]

b) B- Association parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, mais l'intensité du courant augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche, on explique par les équations suivantes :

$$V_{c\text{parallèle}} = V_{c\text{branche}} \quad (1.3)$$

$$I_{cc\text{parallèle}} = \sum I_{cc\text{branche}} \quad (1.4)$$

V_{co} : tension de circuit ouvert.

I_{cc} : courant de court-circuit

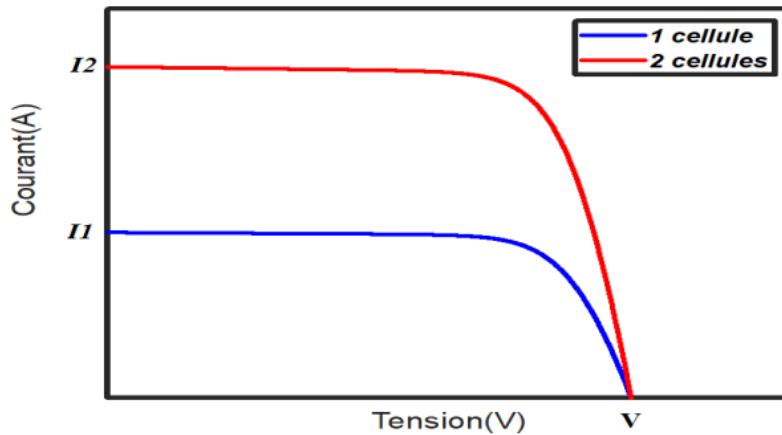


Figure 1.8 : Caractéristique de l'association parallèle des cellules

8- String PV :

Le string est un regroupement d'un ensemble des modules en série, il contient une diode anti-retour en série avec les modules, et une diode bypass en parallèle avec chaque module pour la protection de ces derniers, la tension de string est proportionnelle avec le nombre des modules.

(voir la figure 1.9)

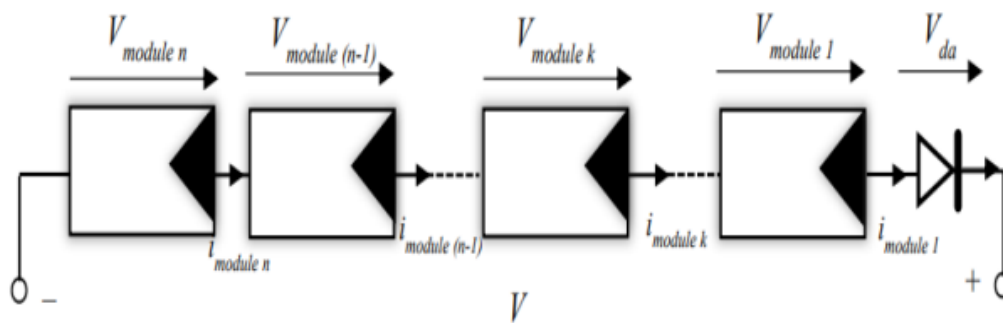


Figure 1.9: string PV

9- Champ PV:

Un champ PV est un ensemble de plusieurs string PV montés en parallèle, la tension de ce champ PV est la même tension de string et le courant de champ est la somme des courants de chaque string, donc pour augmenter la puissance il faut augmenter le nombre des strings parallèle (augmentation de courant, la tension est constante).[8]

10- Protection d'un générateur photovoltaïque :

Comme pour les autres centrales électriques, il existe plusieurs sortes de protection pour une installation photovoltaïque : protection des intervenants, protection contre la foudre, protection du générateur PV.

10-1 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les chocs électriques :

Ce type de protection inclue la protection contre les contacts directs, la protection contre les contacts indirects, comme il est expliqué dans les deux paragraphes suivants :

10-1-1 Protection contre les contacts directs :

Les matériels PV partie courant continu doivent toujours être considérés comme sous tension et disposer de protection par isolation des parties actives ou par enveloppe. [9]

10-1-2 Protection contre les contacts indirects :

Les modes de protection doivent intégrer les dispositions mises en œuvre côté DC et AC. Ainsi que la présence ou non d'une séparation galvanique par transformateur entre les parties DC et AC.

10 -2 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surtensions :

Les surtensions sont présentes de plusieurs manières dans une installation PV. Elles peuvent être ;

1. Transmises par le réseau de distribution et être d'origine atmosphérique (foudre) et/ou dues à des manœuvres,
2. Générées par des coups de foudre à proximité des bâtiments et des installations PV, ou sur les paratonnerres des bâtiments,
3. Générées par les variations de champ électrique dues à la foudre. En règle générale, un système de protection contre la foudre destinée à un générateur PV se compose des éléments suivants [4] :
 - a- Système extérieur de Protection contre la Foudre (SPF) ;
 - b- Installation de mise à la terre et équilibrage de potentiel ;
 - c- Blindage magnétique et câblage ;
 - d- Protection SPD (Surge Protection Device) coordonnée.

10-3 Protection d'un générateur photovoltaïque contre les surintensités :

Le générateur PV comme tout autre générateur d'énergie électrique doit être protégé contre les surintensités, et autre type de problèmes.[10]

10-3-1 Ombrage d'un générateur :

Ombrage partiel de la cellule se termine, forçant la cellule à fonctionner dans le quadrant Q3 c'est-à-dire inverser la polarité de la tension de l'élément et l'élever au seuil de la tension de jonction inverse ($U_C \approx -15 \text{ V}$ à -25 V). La puissance absorbée par les cellules à l'ombre dépasse très nettement la puissance normalement dissipée et provoque des points chauds.

10-3-2 Nécessité de protection contre les courants inverses :

Les concepts de courants admissibles pour protéger les canalisations contre les surcharges sont automatiquement satisfaits et ne nécessitent pas l'installation de protection pour assurer cette fonctionnalité, et le dimensionnement des câbles en série est fortement dépendant des chutes de tension.

Le principal critère de sélection d'un fusible est la valeur de l'IRM (Maximum Inverted Current PV) que l'unité peut temporairement supporter jusqu'à ce que le fusible de protection sélectionné interrompe le courant de défaut de sortie après un défaut. Nous concentrons notre attention sur les composants utilisés pour protéger le générateur photovoltaïque [10].

10-3-3 Diode de by-pass :

La diode by-pass est connectée en antiparallèle avec un groupe de cellules, afin de protéger les plus faibles entre eux contre la polarisation inverse

10-3-4 Diode anti-retour :

La tension produite par chaque string peut être différente. Lors de la mise en parallèle de ces strings pour former un champ PV, le string avec la tension la plus faible peut absorber un courant inverse provenant des autres strings. Cela conduit donc à une baisse de production, 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. [7] (voir la figure 1.10)

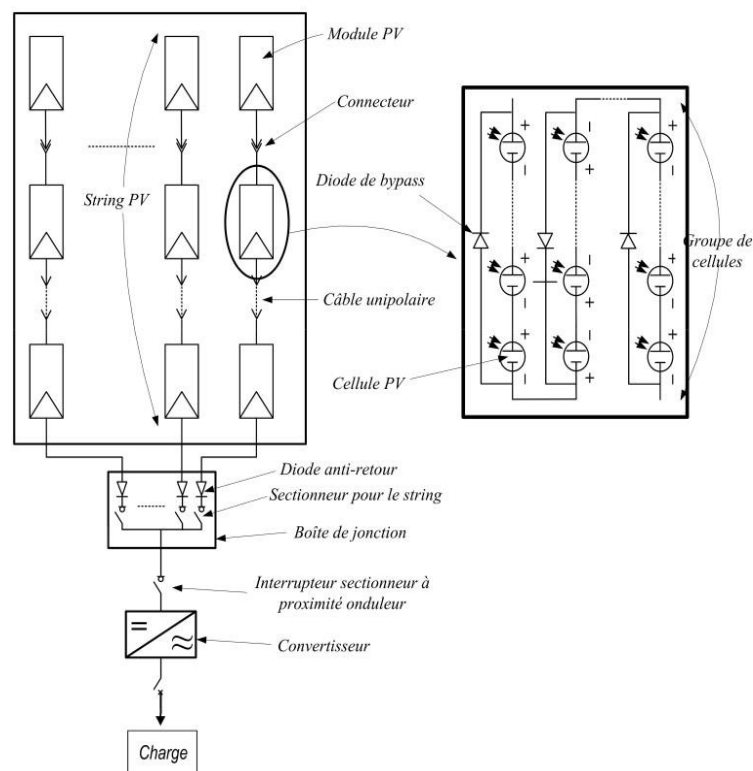


Figure 1.10 : Composantes d'un système PV alimentant une charge

11- Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques :

11-1 Définition :

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. Figure 1.11 représente schéma de principe de l'onduleur.[11] (voir la figure 1.11)

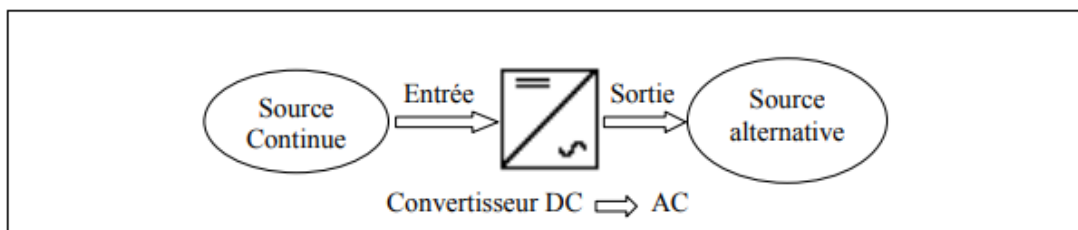


Figure 1.11 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

11-2 Technologies des onduleurs :

Pour les onduleurs utilisés dans les applications PV on distingue différentes topologies, selon l'importance de l'installation, le rendement et la puissance.[4]

11-2-1 Onduleurs modulaires (module inverter) :

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel (par ex. Soladin 120 de Mastervolt). Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant.

11-2-2 Onduleurs centralisés (central inverter) :

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série.[12]

11-2-3 Onduleurs "String" ou "de Rangée" :

L'onduleur String est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String. Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante.

(voir la figure 1.12)

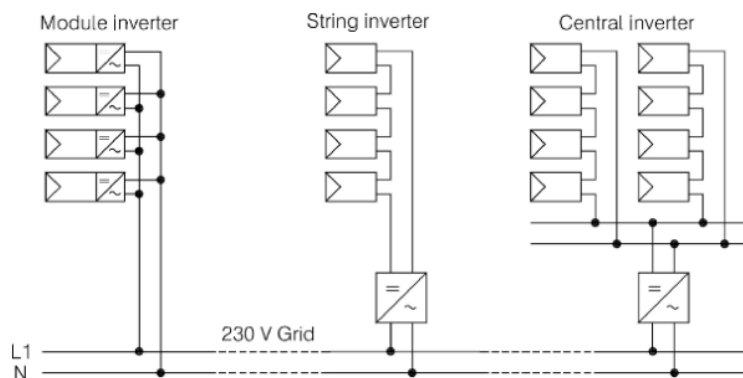


Figure 1.12 : Classification des onduleurs PV connectés au réseau

Ils sont toujours conçus en triphasé. La plupart du temps, les systèmes (PV) sont installés dans les réseaux de distribution basse tension avec une puissance allant jusqu'à 30 kVA. Le type du réseau choisi au raccordement détermine la possibilité du choix des systèmes de surveillance, et la détection en cas défaut.

12- Poursuite du point de puissance maximale (PPPM ou MPPT) :

Pour que le système photovoltaïque fonctionne à des points de puissance maximums de leurs caractéristiques, il existe des lois de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Cette commande est nommée dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou « Maximum Power Point Tracking » en Anglais (MPPT). Le principe de ces commandes est de chercher le point de puissance maximale (PPM) en gardant une bonne adaptation entre le générateur et sa charge pour assurer le transfert de la puissance maximale. [13]

12-1 Principe de la commande MPPT :

La figure 1.13 représente une chaîne de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT.

(voir la figure 1.13)

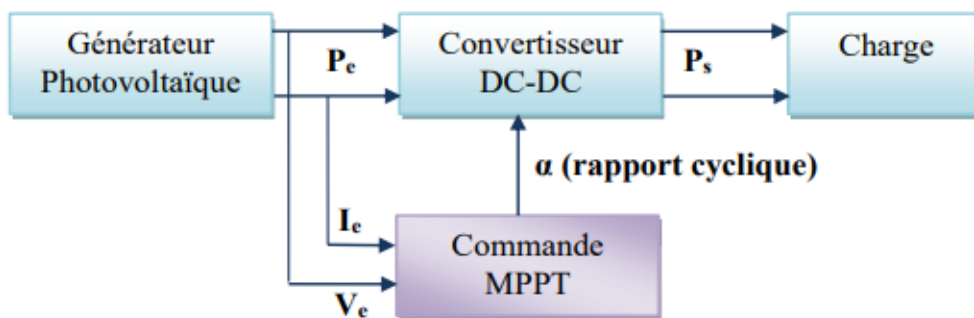


Figure 1.13 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La technique de contrôle MPPT consiste à agir sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC de manière automatique pour amener le GPV à sa valeur optimale de fonctionnement quelles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir (Variation de l'ensoleillement, de température ou de charge). [13]

12-2 Méthode Perturbation & Observation (P&O) :

a) - Définition :

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de α où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du Panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent.

b) - Le fonctionnement de l'algorithme P&O :

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. (voir la figure 1.14)

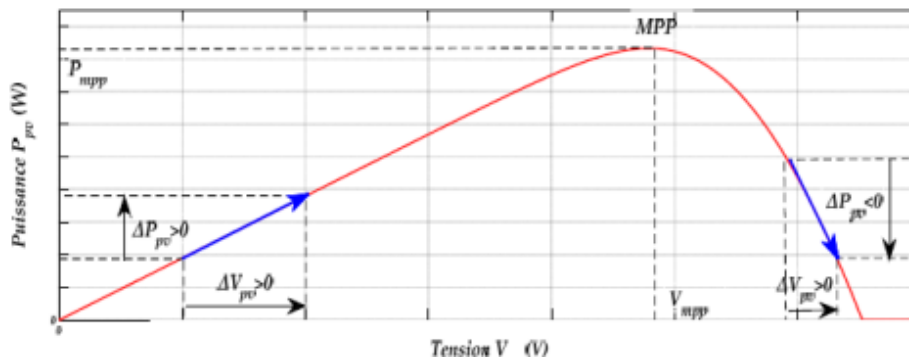


Figure 1.14: : Caractéristiques de fonctionnement de la méthode de P&O.

Ainsi, comme l'illustre la figure (1.11) pour différentes zones de fonctionnement, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande. [3]

12-3 Méthode Logique Floue :

La théorie du flou permet «la modélisation et le traitement rigoureux d'informations imprécises, incertaines et subjectives ». La démarche par logique floue repose sur l'observation en temps réel de deux critères que sont l'écart E de dP/dV par rapport à la valeur recherchée (c'est-à-dire 0) et la variation CE de cet écart. Pour ce faire, un convertisseur DC/DC est utilisé. Ces critères après inférence (explicitée dans le schéma ci-dessous) permettent de construire une valeur D qui est le rapport cyclique du convertisseur. Cette valeur D aboutit à la détermination de la valeur V_{MPPT} à chaque instant. (voir la figure 1.16)

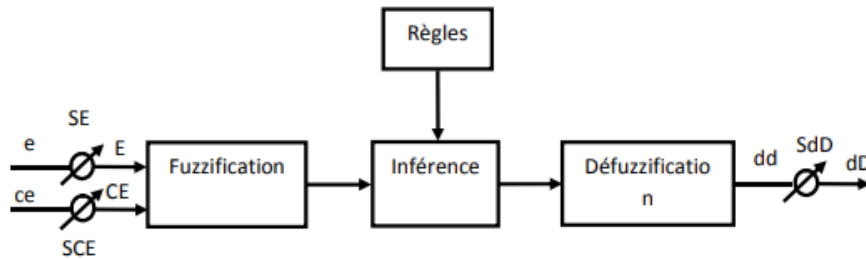


Figure 1.16 : Schéma explicatif de l'algorithme en logique floue (SE, SCE : gain d'entrées ; SdD : gain de sortie)

La fuzzification désigne le processus de détermination du degré d'appartenance à chaque partition floue. L'inférence désigne l'utilisation des règles déclenchées par les différentes entrées fuzzifiées. La défuzzification désigne le passage des valeurs floues de sorties à une valeur finale nette. [4]

13- Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons traité des informations générales sur les systèmes d'énergie photovoltaïque, par un premier pas on a commencé par un petit historique sur le photovoltaïque, l'énergie et le rayonnement solaires, généralités, définitions, et principe de fonctionnement des PV, Par la suite on a pu montrer les éléments essentiels qui constituent la chaîne de conversion de l'énergie solaire photovoltaïque.

Dans le chapitre suivant fait l'objectif de présentation des différents défauts et leurs diagnostique.

Chapitre 2

1- Introduction :

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 voir même à son indisponibilité. Dans ce chapitre, nous survolons ces défauts et leurs conséquences sur le système photovoltaïque et les différentes méthodes de diagnostic, industrialisées ou non, proposées pour détecter et/ou localiser des défauts dans un système photovoltaïque.

2- Défauts de fonctionnement d'un générateur PV :

Pour mieux comprendre, nous avons défini quelques notions dans les phrases suivantes :

Défaut : On appelle défaut tout écart entre la caractéristique observée sur le dispositif et la caractéristique théorique.

Symptôme : C'est le changement de la quantité ou la qualité de l'énergie produite par le système PV.

Détection : Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.[14]

Localisation : Elle consiste à déterminer les causes physiques ou fonctionnelles d'une panne, c'est-à-dire à déterminer le ou les éléments à l'origine du défaut.

3- Défauts du système photovoltaïque :

Les défauts que l'on peut retrouver sur une installation photovoltaïque, surviennent autant lors de sa conception, de son installation, que lors de son exploitation. Ils sont alors responsables d'une baisse voire d'un arrêt total de la production photovoltaïque. Une bonne connaissance des différents défauts possibles permet d'assurer une bonne maintenance du système photovoltaïque [15].

Les défauts sont classifiés selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV.

Ces groupes de défauts ont été formés :

- Défauts dans le générateur photovoltaïque.
- Défauts dans la boîte de jonction.
- Défauts dans le système de câblage.

- Défauts dans le système de protection.
- Défauts de l'onduleur.
- Défauts dans le système d'acquisition des données.

3-1 Défauts dans le générateur PV :

Défaut	Conséquence
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des Performances
Air marin, Couple galvanique dû au mélange de matériau de la Jonction module/support	Corrosion
Dégradation des modules par Vandalisme	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances
Module mal ou pas ventilé	Échauffement
Module mal fixé	Déplacement du module, diminution des Performances
Modules non câblés	Diminution des performances
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, Incendie
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules

Déformation du cadre des Modules	Infiltration d'eau
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des Cellules
Délaminage	Diminution des performances, échauffement
Foudre	Détérioration des modules
Tempête, Faiblesse au vent des Structures	Module arraché, cassé
Pénétration de l'humidité	Hot spot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre
Foudre sur l'installation	Destruction des modules
Modules de performances Différentes	Diminution des performances du champ
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossibles	Mauvais câblage
Support mécanique des modules inadéquat ou mal posé	Efforts mécaniques importants sur les Modules
Inclinaison des modules trop Faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité
Panneaux inaccessibles	Panneaux inaccessibles
Chaleur	Échauffement, détérioration des joints

Tableau 2-1 : Différents défauts dans le générateur photovoltaïque.[16]

3-2 Défauts dans la boîte de jonction :

Défauts	Conséquences
Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre
Boîte de jonction sans presse-étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Infiltration d'eau par les vis de Fixation	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et Maintenance
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution des performances
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique
Fourreaux non prévus pour usage extérieur	Destruction de la protection
Liaison sans protection	Destruction de la liaison
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie

Tableau 2-2 : Différents défauts dans la boîte de jonction.[15]

3-3 Défaut dans le système de câblage :

Défauts	Conséquences
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement
Connexion desserrée ou Cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit Electrique
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique
Câbles non fixés	Boucle de câblage, circuit ouvert
Mauvais câblage	Court-circuit, claquage des diodes anti- retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur
Toron	Boucle électromagnétique
Câbles d'arrivée des sous-champs entamés lors du dénudage	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Absence de graisse de Silicone	Humidité
Câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Câble rongé par des rats	Faux contacts, circuit ouvert, arc Electrique
Modification du câblage par l'usager non compétent	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique
Boîte de connexion décollée	Connexion des cellules en série Endommagée

Tableau 2.3: Défauts dans le système de câblage.

3-4 Défauts dans le système de protection :

Défauts	Conséquences
Protections inappropriées ou mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation
Interrupteur, disjoncteur Inapproprié	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture
Disjoncteur différentiel non conforme à la norme	Non déclenchement, tension entre neutre et terre
Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur	Dysfonctionnement en cas de pluie
Parafoudre non connecté à la Terre	Pas de protection
Impossibilité de déconnecter les modules par branche	Problème de sécurité
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret	
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes	Échauffement
Sous dimensionnement des diodes de bypass	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction
Absence de protection contre les courants inverses	
Diode mal connectée	Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses
Inversion de la polarité des diodes au montage	Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot
Phénomènes de résonance	Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension

Dégradation à cause de la Lumière	Non fonctionnement des diodes de Bypass
Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé	Température de destruction atteinte
Vieillessement des Disjoncteurs	Non fonctionnement des disjoncteurs

Tableau 2-4 : Différents défauts dans le système de protection.

3-5 Défauts dans l'onduleur :

Défauts	Conséquences
Dégradation à cause de la chaleur	Détérioration de l'onduleur, des Connexions
Faux contact, Fusible fondu, Bobine des filtres, thyristors, Capacités en défaut	Arrêt de l'onduleur
Surtension	Déconnexion de l'onduleur
Foudre sur le réseau	Surtension, destruction de l'onduleur
Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur	Déconnexion de l'onduleur
Onduleur sous dimensionné	Destruction de l'onduleur
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur
Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur
Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances
Onduleur installé dans un lieu non Etanche	Panne de l'onduleur
Onduleur mal fixé	Chute de l'onduleur
Onduleur surdimensionné	Perte de puissance, diminution des performances
Visserie et bouton de commande Oxydés	Réglage impossible
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances

Pile de sauvegarde HS	Perte de données
Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence	Mauvaise information sur l'intensité
Onduleur non mis à la terre	Disjoncteur différentiel non Actif
Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Perte de données
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible	Pas d'information sur le Fonctionnement

Tableau 2-5 : Différents défauts dans l'onduleur.

3-6 Défauts dans le système d'acquisition des données :

Défauts	Conséquences
Coupure de courant	Perte de données
Sonde de température non câblée	Mesure impossible
Sonde d'ensoleillement non câblée	Mesure impossible
Défaut de paramétrage	Enregistrement de fausses Données
Mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou Erronée
Afficheur de données mal placé (trop haut)	Données non visibles
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives, défaut de Commande
Non configuré pour l'acquisition des Données	Pas de donnée enregistrée
Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court-circuit
Acquisition de données vierge	Aucune information Enregistrée
Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Données non fiables

Tableau 2-6 : Différents défauts dans le système d'acquisition des données.[10]

3-7 Classification de défauts d'un champ PV :

Composant du champ	Nature des défauts	Dénomination des défauts
Cellule	<ul style="list-style-type: none"> • Module arraché ou cassé • Pylônes, cheminée, sable, neigeetc. • 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 d'ombrage
Groupes de cellules	<ul style="list-style-type: none"> • Destruction des diodes • Absence de diodes, • Inversion de la polarité des diodes • Diode mal connectée • Diode court-circuitée 	Défaut de diode by-pass
Module	<ul style="list-style-type: none"> • Modules court-circuités, • Modules shuntés 	Défaut de module
String	<ul style="list-style-type: none"> • Rupture du circuit électrique • Destruction de la liaison • Corrosion des connexions • Corrosion des contacts 	Défaut de connexion

Tableau 2-7 : Classification de défauts d'un champ PV. [17]

4- Diagnostic des défauts dans un système photovoltaïque :

4-1 Définition du diagnostic :

Le diagnostic était à l'origine utilisé dans le domaine médical. Ce terme signifie le raisonnement conduisant à l'identification de la cause (origine) d'une défaillance, d'un problème ou d'une maladie sur la base de caractéristiques ou de symptômes constatés par des observations, des contrôles ou des tests (il s'agit donc d'acquérir des connaissances par des signes observables), comme dans son sens médical, le diagnostic des systèmes industriels est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant ou un élément défectueux dans un système dynamique. Il a pour objet de trouver la cause d'une défaillance. Nous adopterons la définition qui a été retenue par les instances de normalisation : (L'Association Française de Normalisation (AFNOR) et la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) ont défini avec précision les vocabulaires à utiliser dans les différents secteurs industriels.[18]

4-2 Etapes du diagnostic :

Le terme diagnostic correspond à la caractérisation du défaut, pour effectuer ce dernier il faut passer par un certain nombre d'étapes qui s'enchaînent :

➤ Acquisition des données :

Cette fonction doit fournir une image du procédé. Les fonctions suivantes doivent être réalisées :

- Conditionnement et prétraitement du signal ;
- Validation du signal de mesure.[18]

➤ Détection :

La procédure de détection vise à déterminer précocement et sans erreur l'apparition d'une défaillance. Cette étape nécessite un bon modèle de fonctionnement du système.

Un écart entre le comportement observé et un autre normal de référence donné par un modèle analytique ou numérique peut être dû à un défaut ou à des erreurs de modélisation. Il faut veiller à déclencher une alarme si le dysfonctionnement est causé par un défaut et non une perturbation.

➤ **La localisation :**

Dire quel élément physique à causer le défaut. Parfois il est impossible de localiser les interactions entre les composants du système et l'instrumentation. La solution est d'isoler un sous-système comportant des composants susceptibles de contenir le ou les défauts [KHEN15].

➤ **L'identification :**

L'objectif de l'identification est de caractériser plus finement le défaut et détermine les causes qui ont engendré la défaillance constatée.[19] (voir la figure 2.1)



Figure 2-1 : différentes étapes de diagnostic

5- Méthodes de diagnostic d'un champ PV :

5-1 Méthodes de diagnostic courantes industrialisées :

On peut distinguer deux catégories de méthodes de diagnostic courantes : des méthodes reposant sur l'analyse du courant et de la tension (que nous appellerons méthodes électriques) et des méthodes reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V (que nous appellerons méthodes non-électriques). [19]

5-1-1 Méthodes non-électriques :

Il existe plusieurs méthodes non-électriques, destructives ou non destructives, pour diagnostiquer le défaut au niveau de cellule PV. Le défaut principal qui peut avoir lieu 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, tests de thermographie.

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. [17] (voir la figure 2.2)

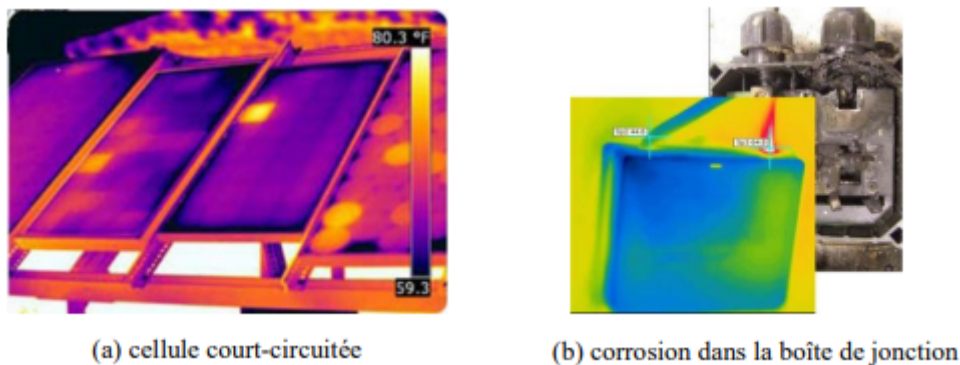


Figure 2-2 : Quelques exemples de la localisation de défauts par la caméra thermique

5-1-2 Méthodes électriques :

Les systèmes de monitoring actuels d'un GPV sont essentiellement intégrés aux onduleurs.

Dans ce cadre, les données mesurées sont souvent les mêmes d'un système à l'autre.

Les grandeurs mesurées les plus courantes sont :

- Le courant et la tension coté DC du champ PV.
- Le courant et la tension coté AC du champ PV.

Il est aussi possible d'ajouter les grandeurs complémentaires que sont la température ambiante du site et l'ensoleillement aux mesures électriques. Ces données nécessitent un capteur spécifique. Les informations peuvent être traitées localement ou à distance, sur une ou plusieurs installations.[20]

5-2 Méthodes dans la littérature :

De nombreuses méthodes de diagnostic ont été proposées pour détecter et localiser les défauts dans un système PV. Nous résumons dans cette partie les différentes méthodes proposées. [17]

5-2-1 Méthode de 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. (voir la figure 2.3)

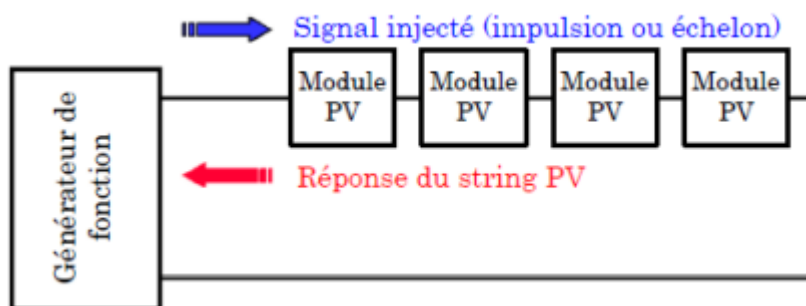


Figure 2-3 : Principe de réflectométrie pour localiser un défaut dans un string PV. [21]

5-2-2 Analyse de la puissance et de l'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. [21]

5-2-3 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. [22]

5-2-4 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 2.4. 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 (voir la figure 2.4)

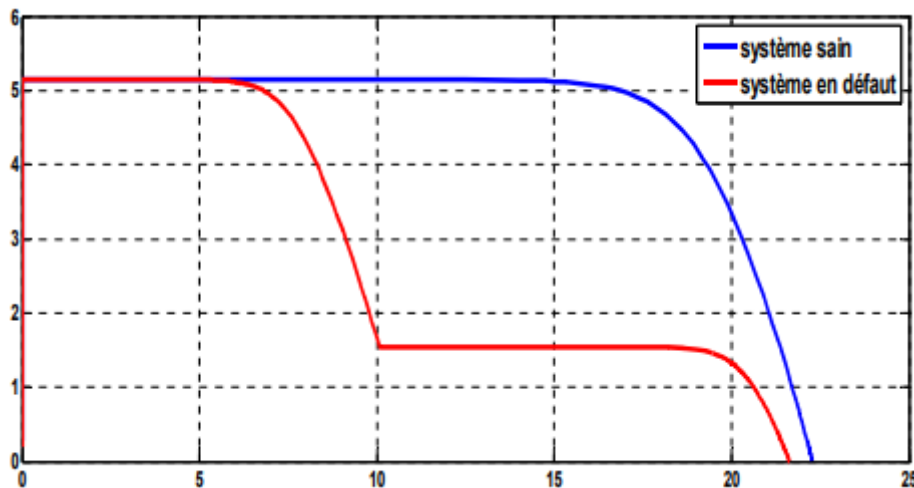


Figure 2-4 : Allure de la caractéristique statique en présence d'un défaut.[21]

6- Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les différents défauts qui peuvent subir un système PV, ainsi que les méthodes de diagnostic de défauts proposées industrialisées ou non. Ces méthodes montrent une limitation de discrimination entre les défauts, pour cela la méthode basée sur l'exploitation des données est identifiée comme la plus prometteuse.

Le chapitre suivant fait l'objectif de la modélisation et la simulation de la chaîne de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique dans un système PV.

Chapitre 3

1-Introduction :

Toute opération d'étude de fonctionnement d'un système photovoltaïque requiert la modélisation mathématique du système PV. Cette étude se base principalement sur les équations électriques et les circuits équivalents. Pour cela nous nous intéressons à la simulation de chaque élément constitutif de ce système : cellule PV, convertisseur DC/DC (Boost élévateur), contrôleur MPPT et l'onduleur multiniveaux de type NPC.

2- Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Généralement, la simulation du comportement des modules photovoltaïques est basée sur leur caractéristique $I - V$. Pour cet objectif, plusieurs études ont été présentées utilisant différents modèles mathématiques. Cette section présente deux principaux modèles : modèle idéal, le modèle réel à une diode que nous allons utiliser.

2.1-Modèle électrique idéal à une diode :

Une cellule photovoltaïque est une diode de grandes dimensions, son illumination provoque la génération d'un photo-courant I_{ph} . En effet, une partie de ce courant est dissipée dans la jonction, ce qui conduit au modèle simplifié de la cellule photovoltaïque qui est équivalente à une source de courant shuntée avec une diode. (voir la figure 3.1)

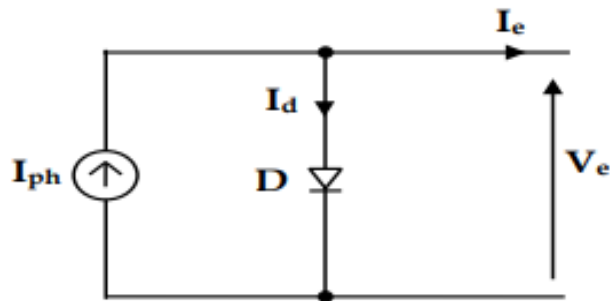


Figure 3.1 : Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale à une diode. [13]

Le courant de sortie I_e est obtenu à partir du circuit équivalent :

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

Avec :

$$I_d = I_{sat} (\exp (V_e / nVT) - 1) \quad (3.2)$$

$$VT = \frac{kT}{q} \quad (3.3)$$

I : Courant fourni par la cellule

I_h : Photo-courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation

I_d : Courant qui traverse la diode

I_{sat} : Courant de saturation inverse de la diode d'une cellule, dépendant de la température

V : Tension aux bornes de la cellule

n : Facture de non idéalité de la jonction compris entre 1 et 5 dans la pratique

k : Tension thermique

k : Constante de Boltzmann $K = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T : Température effective de la cellule en kelvin

q : Charge d'électron $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

2.2- Modèle électrique réel à une diode :

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule, elle principalement la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

- la résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. (voir la figure 3.2)

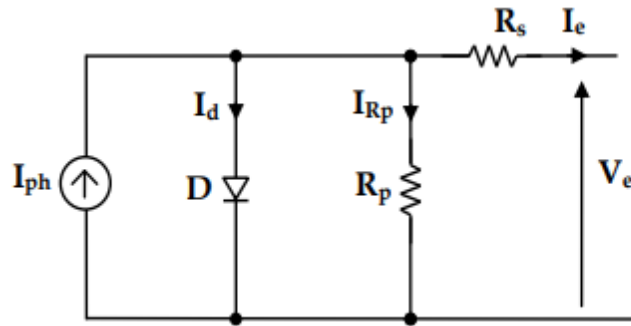


Figure 3.2 : Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle à une diode. [23]

En se basant sur le circuit de la figure 3.2, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante :

$$I_e = I_{ph} - I_d - I_{Rp} \tag{3.4}$$

Ainsi, et à partir des équations données précédemment, le courant fourni par une cellule est donné par la relation suivante :

$$I_e = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp\left(\frac{V_e + I_e R_s}{nVT}\right) - 1 \right) - \frac{V_e + I_e R_s}{R_p} \tag{3.5}$$

2.3-Système photovoltaïque connecté à une charge RL :

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la figure 3.3

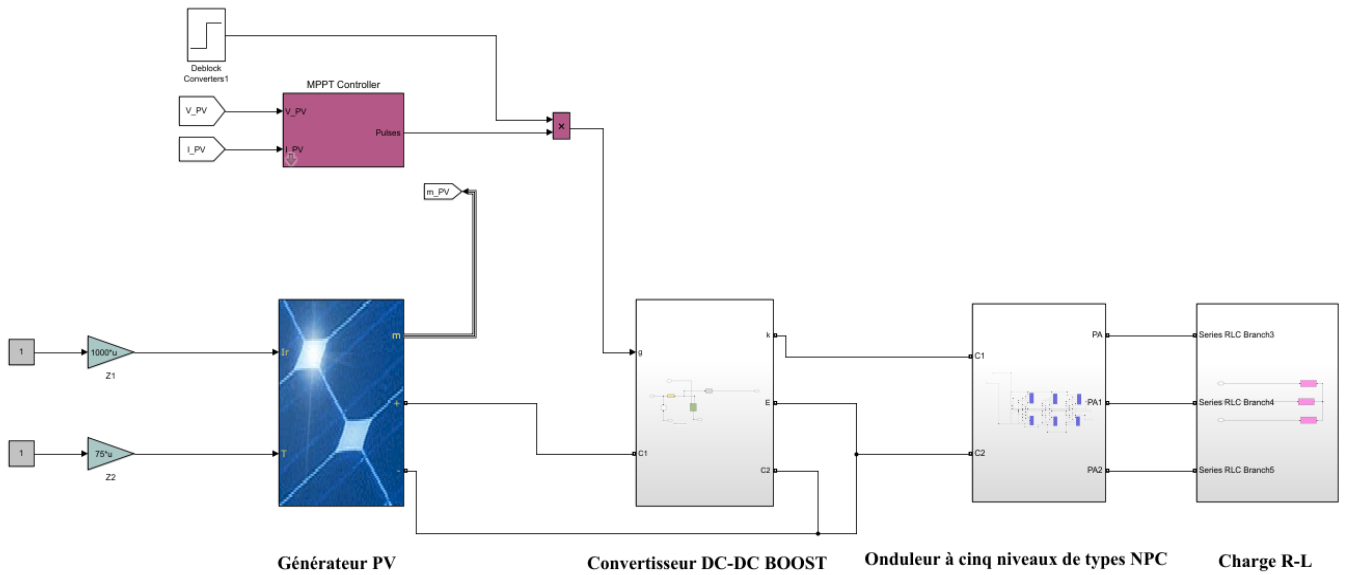


Figure 3.3 : Schéma de système photovoltaïque connecté à charge

2.4- Caractérisation du module PV :

Dans ce travail, nous avons simulé le module photovoltaïque Sunpower SPR-305-WHT-D qui comporte 96 cellules solaires de silicium monocristallin connectées en série.

Le module PV Sunpower SPR-305-WHT-D peut produire une puissance maximale de 305.226 watts à 54.7 volts. Ceci nous a permis de déterminer la puissance en fonction de la tension et le courant en fonction de la tension du module étudié pour un éclairement $E=1000 \text{ W/m}^2$.

Les caractéristiques électriques du module Photovoltaïque Sunpower SPR-305-WHT-D en conditions de test standards sont représentées sur le tableau 3.1 :

Grandeurs	Valeur
Caractéristiques électriques à :	E=1000 W/m ² , T=25 °C
Puissance maximale (W)	305.226
Cellules par module (Ncell)	96
Tension de circuit ouvert Voc (V)	64.2
Courant de court-circuit Isc (A)	5.96
Tension au point de puissance maximale Vmp (V)	54.7
Courant au point de puissance maximale Imp (A)	5.58
Fréquence F(Hz)	50

Tableau 3.1 : Caractéristiques électriques du module PV Sunpower SPR-305-WHT-D en condition de test standard.

La simulation d'un générateur PV sous les conditions standard (E=1000 w/m² et T=25°), a donné les courbes présentés dans les figures 3.4 et 3.5

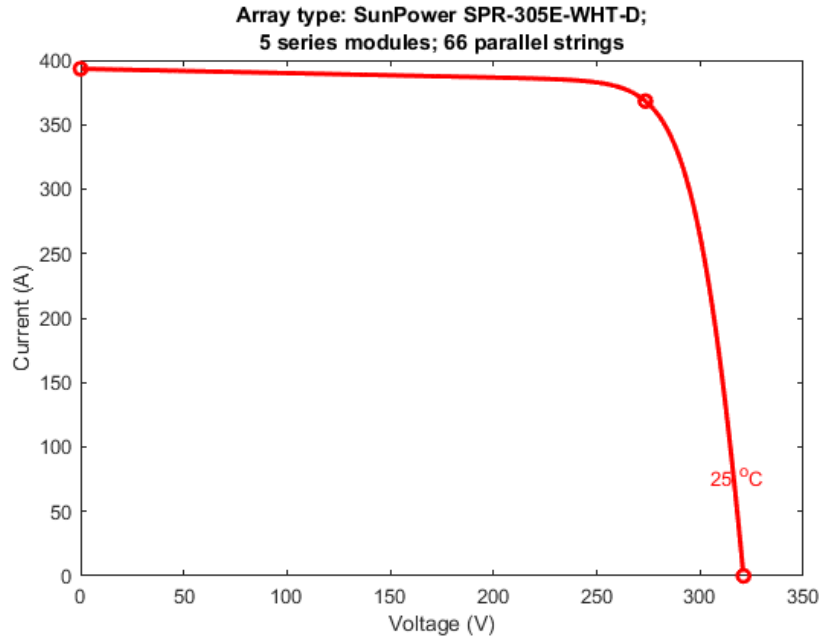


Figure 3.4 : caractéristique (V-I) du générateur PV

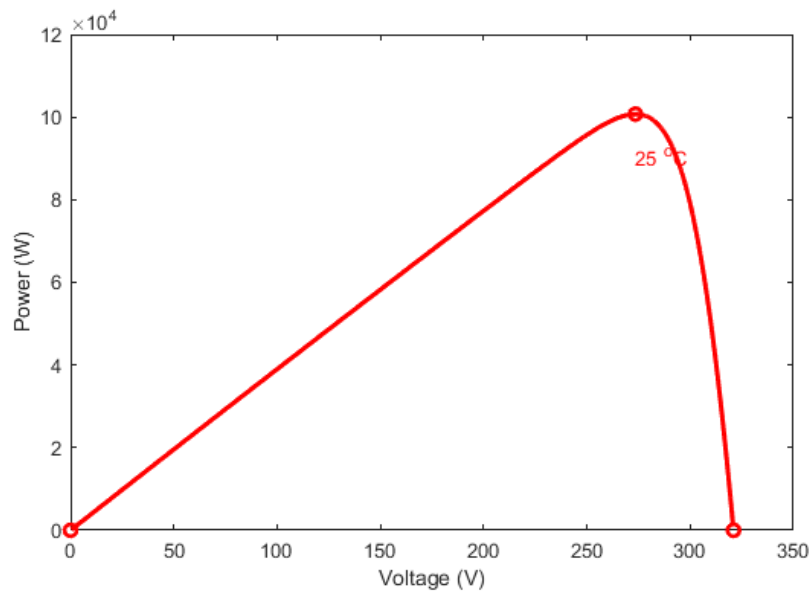


Figure 3.5 : caractéristique (P-V) du générateur PV

3- Modélisation du convertisseur DC-DC BOOST :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). (voir la figure 3.6)

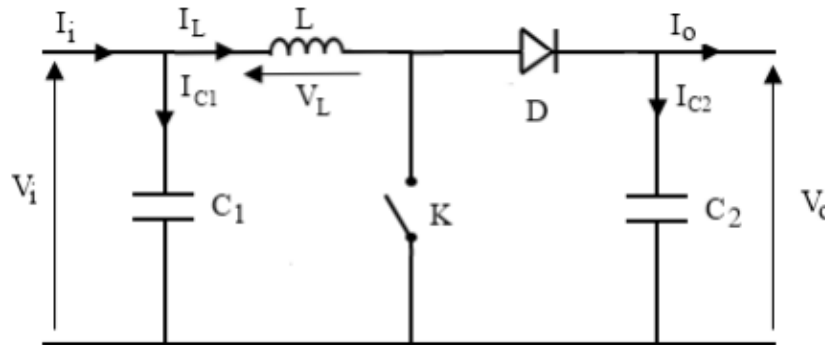


Figure 3.6 : Schéma électrique d'un hacheur boost.

3-1 Fonctionnement :

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée $\alpha \cdot T_e$, le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha \cdot T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D. On a alors $V_k = V_o$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_o (1 - \alpha) = V_i \quad (3.6)$$

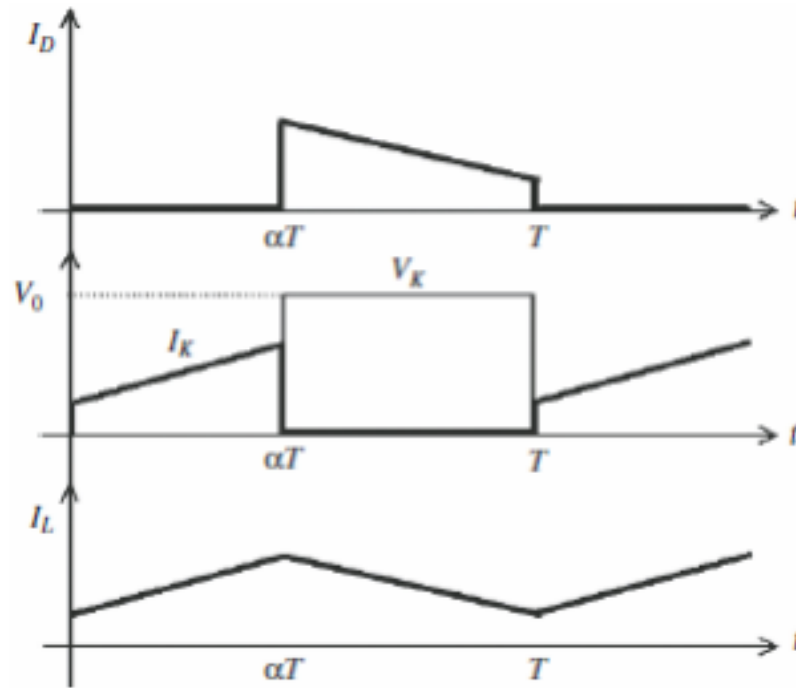
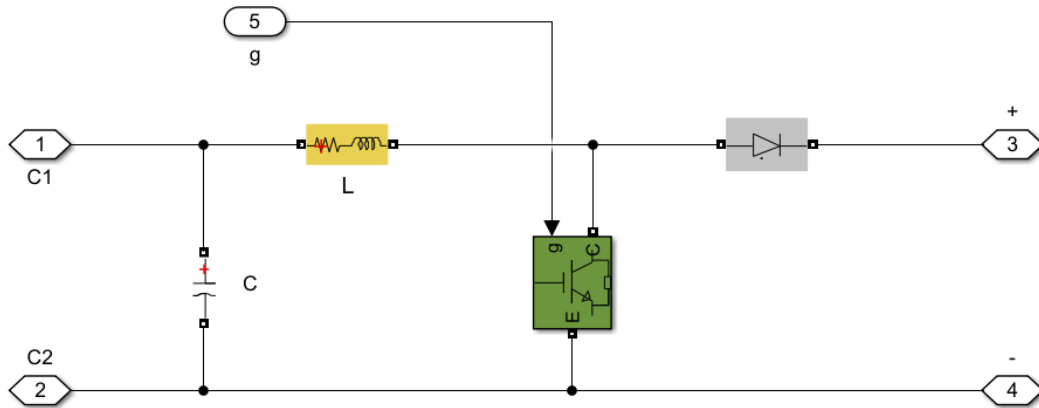


Figure 3.7 : Chronogrammes de courant et tension d'un hacheur boost. [2]

3-2 Simulation du convertisseur DC-DC BOOST :

Le convertisseur DC-DC BOOST que nous proposons pour la simulation est schématisé par la figure 3.8 :



convertisseur DC-DC BOOST

Figure 3.8 : Schéma du convertisseur DC-DC BOOST élévateur.

Le résultat de la simulation de la tension à la sortie du convertisseur DC-DC BOOST de notre système est présentée par la courbe suivante :

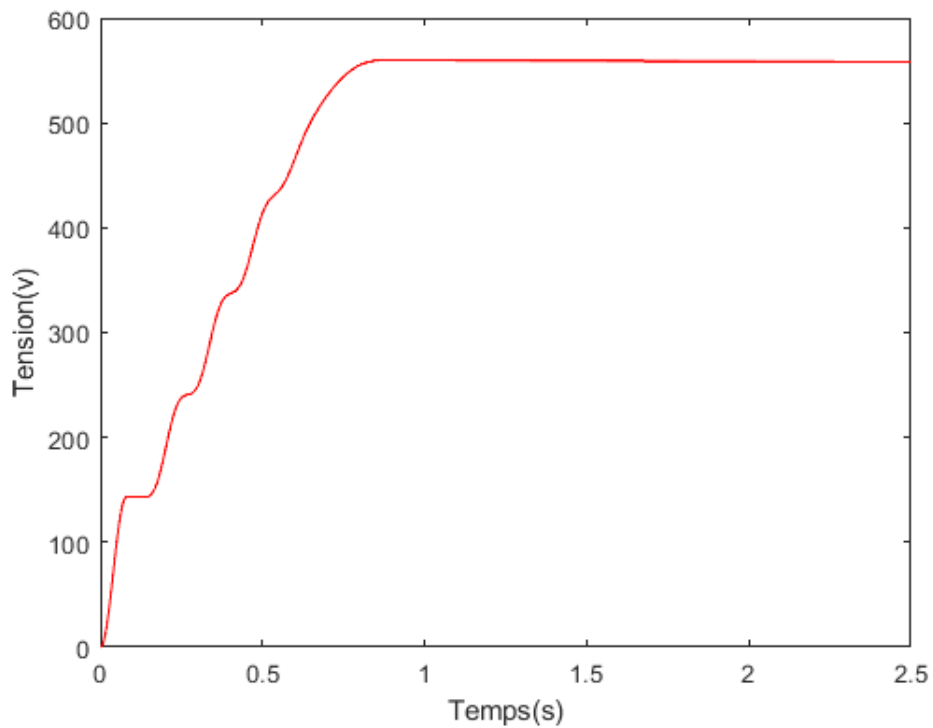


Figure 3.9: Courbe de tension générée par convertisseur DC-DC BOOST

4- Commande MPPT :

La commande en MPPT se fait selon le schéma synoptique suivant : (voir la figure 3.10)

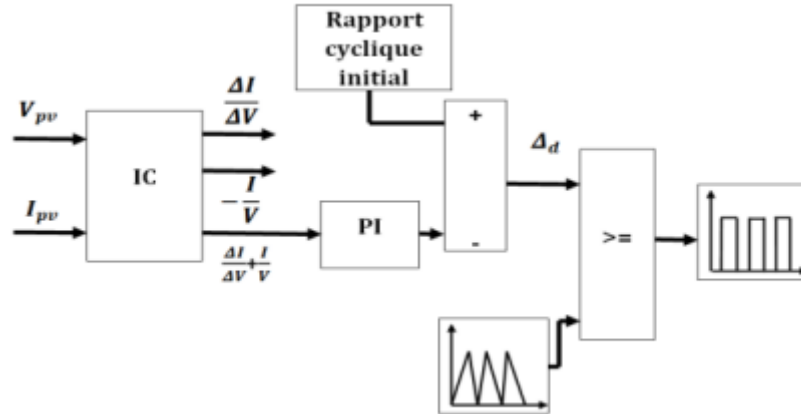


Figure 3.10 : L'MPPT avec incrémentation de la conductibilité

Au point de puissance maximale du générateur PV on doit avoir :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{d(V.I)}{dV} = 0 \Rightarrow I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \Rightarrow \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

(3.7)

Erreur $= \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V}$: doit tendre vers 0.

Sortie du régulateur PI= correction du rapport cyclique (CRC) de façon que :

$$-5.10^{-3} < CRC < 5.10^{-3}$$

Qui représente le pas de changement du rapport cyclique :

Avec $0 < \Delta \square < 1$.

Le signal de commande MPPT est représenté dans la figure 3.11:

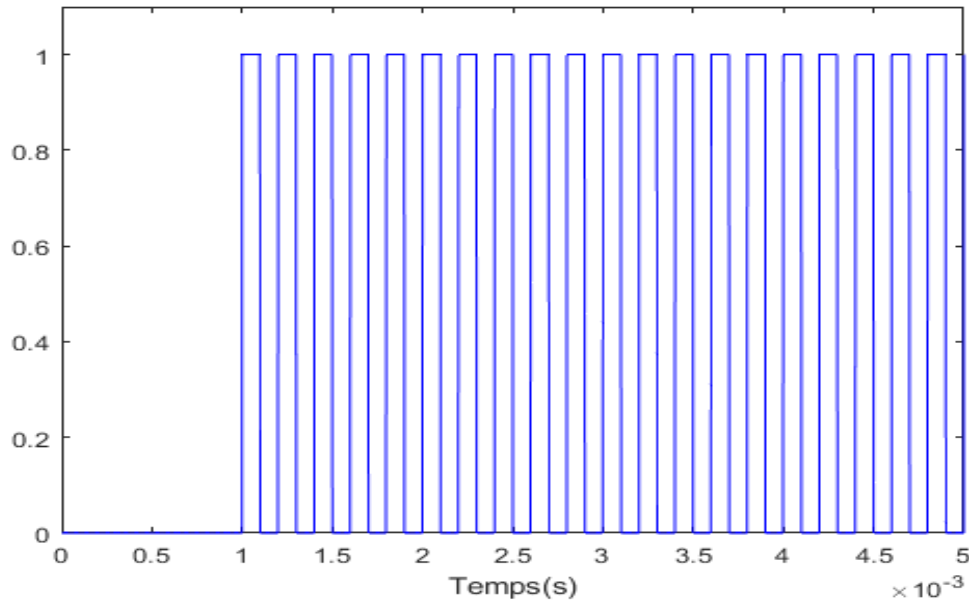


Figure 3.11 : Signal de commande MPPT.

5- Différentes techniques de contrôle d'un onduleur de tension :

Les récents progrès technologiques dans le domaine des dispositifs à semi-conducteur ont élargi le domaine d'application des techniques de modulation à largeur d'impulsions dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques. Afin de générer une source de tension la plus sinusoïdale possible, différentes stratégies de modulation à largeur d'impulsions ont été proposées, on distingue :

- **Commande par modulation sinus – triangle :** est basée sur la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal à une porteuse en général triangulaire.
- **Commande par MLI Vectorielle :** La modulation vectorielle appelée encore MLI régulière symétriques dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne. Le choix d'une technique dépend du type de machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettent d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques de MLI.

5-1 Commande par modulation sinus – triangle :

La technique de génération des signaux de commande appelée PWM (Pulse Width Modulation, ou Modulation à Largeur d'Impulsion) consiste juste en la comparaison, ou sens électronique du terme, d'un signal sinusoïdal avec une triangulaire de fréquence supérieur permettant de fixer par là même la fréquence de commutation, et ainsi la bande de fréquence occupée par le contenu harmonique. Dans le cadre d'onduleur triphasé, la commande PWM n'est pas vraiment plus compliquée. Le signal triangulaire qui constitue la porteuse reste unique et les trois signaux de commande sont simplement obtenus par sa comparaison à trois sinusoïdes de consigne déphasées de 120° .

5-2 Objectifs de la technique MLI :

Les objectifs principaux d'une MLI sont les suivants :

- Obtenir dans la charge électrique des courants dont la variation est proche de la sinusoïdale par le contrôle de l'évolution des rapports cycliques et grâce à une fréquence élevée des commutations des interrupteurs par rapport à la fréquence des tensions de sortie.
- Imposer à l'entrée de l'onduleur un courant de type continu avec des composants alternatifs d'amplitudes réduites et de fréquences élevées.
- Permettre un contrôle fin de l'amplitude du fondamentale des tensions de sortie généralement sur la plus grande plage possible et pour une fréquence de sortie larges variables. [24]

5-3 Simulation de Commande MLI par sinusoïdale à triangles multiples :

La Commande MLI par sinusoïdale à triangles multiples que nous proposons pour la simulation est schématisé par la figure 3.12 :

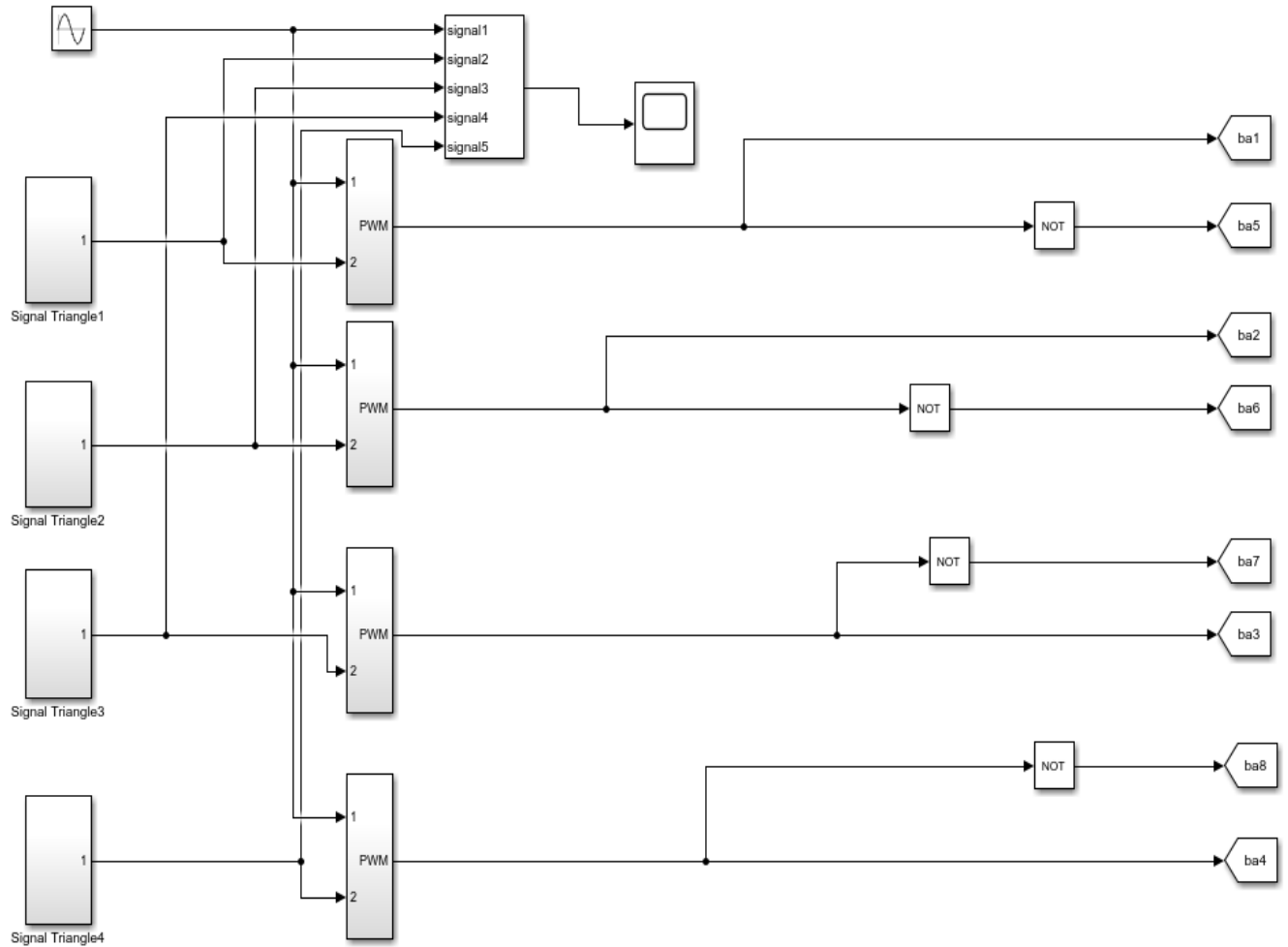


Figure 3.12 : Commande MLI par sinusoïdale à triangles multiples pour un seul bras

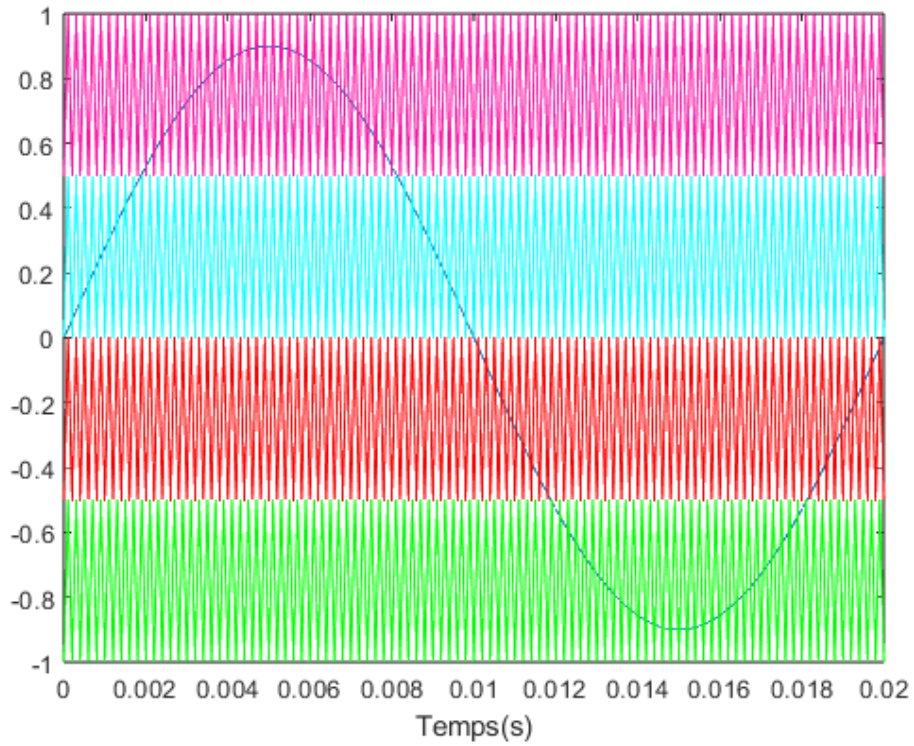


Figure 3.13 : Signal de commande MLI par la modulation sinusoïdale à triangles multiples pour 1 bras

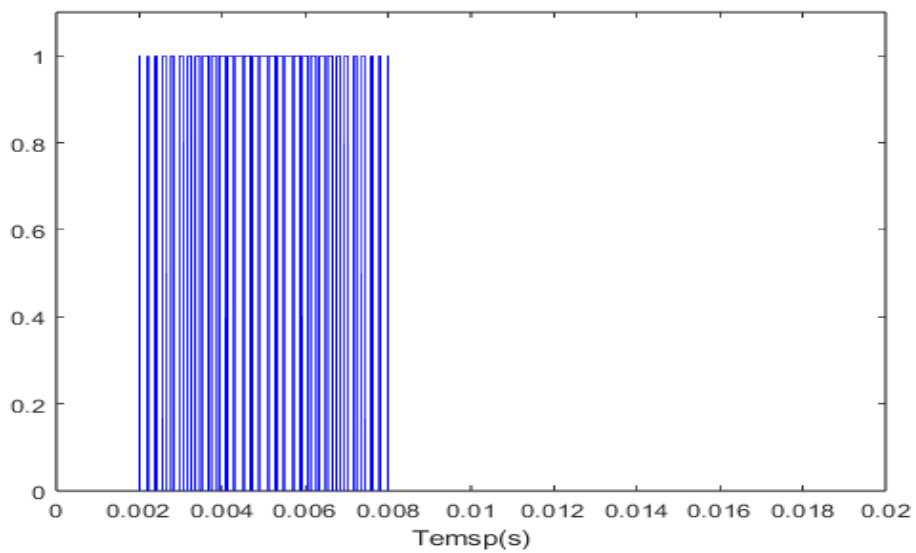


Figure 3.14 : Signal de commande du 1er interrupteur dans le 1er bras

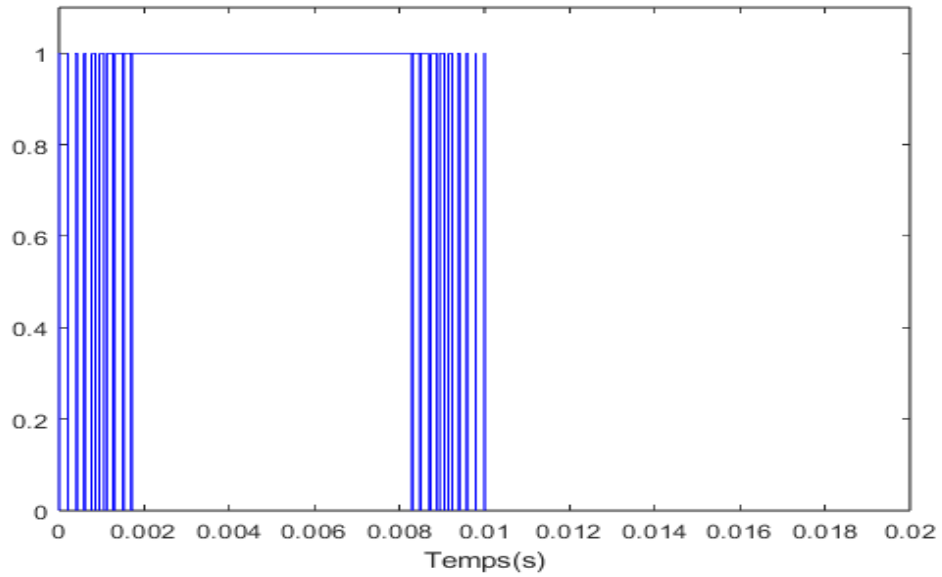


Figure 3.15 : Signal de commande du 2eme interrupteur dans le 1er bras

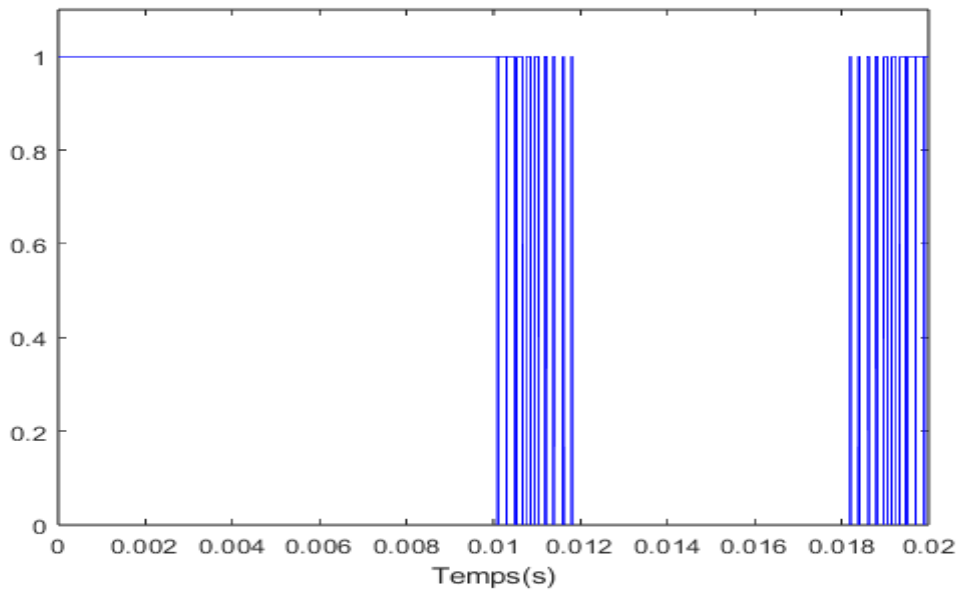


Figure 3.16 : Signal de commande du 3eme interrupteur dans le 1er bras

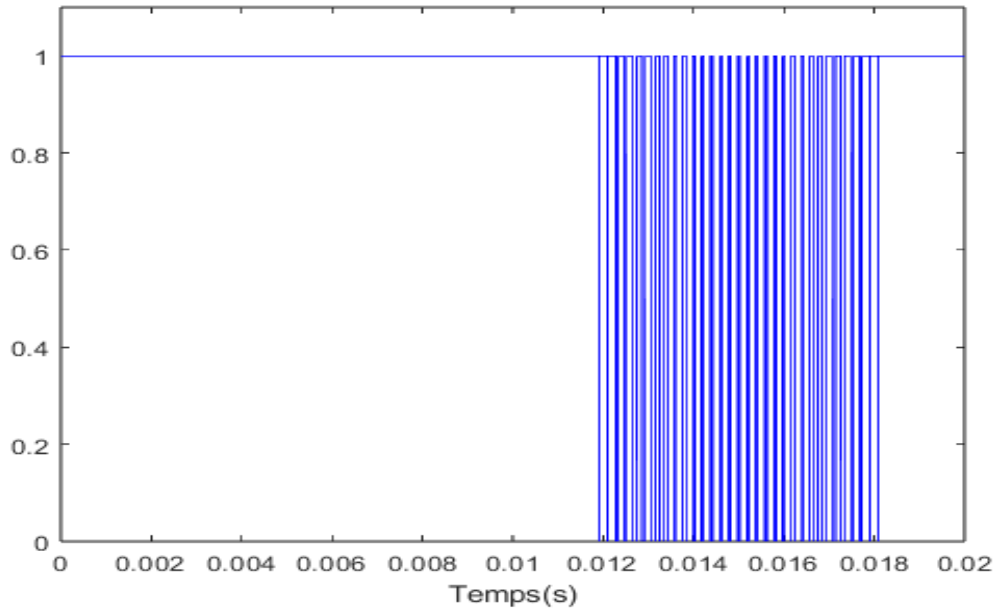


Figure 3.17 : Signal de commande du 4eme interrupteur dans le 1er bras

6- Onduleur à cinq niveaux de types NPC :

L'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure NPC se compose de trois bras symétriques constitué chacun de six interrupteurs en série et de deux autres en parallèles. Chacun de ces interrupteurs est composé d'un semi-conducteur bi commandable IGBT et d'une diode montée en tête bêche. La source de tension continue se compose de quatre groupes de condensateurs formant ainsi le bus continu. Dans ce mode de fonctionnement, chaque semi-conducteur est soumis à l'état ouvert au quart de la tension de la source continue, d'où l'utilité de cette structure d'onduleur pour les applications de haute tension. Pour l'obtenir on d'une tension de N-niveaux, N-1 capacités sont nécessaires. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à $E/(N-1)$. Chaque couple d'interrupteurs forme une cellule de commutation, ces deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire la figure (3.18) donne une représentation schématique d'un bras de cet onduleur.

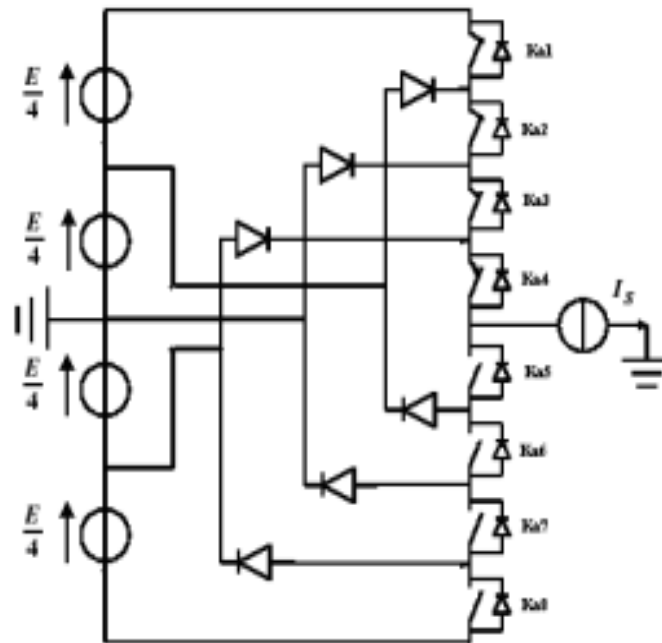


Figure 3.18 : Bras d'un onduleur NPC à cinq niveaux. [25]

6-1 Principe de fonctionnement :

Pour définir les séquences de fonctionnements de l'onduleur à cinq niveaux, définissant d'abord les différents états que peut prendre la tension simple (la tension entre le bras de l'onduleur et le point milieu fictif). Les états possibles d'un seul bras d'interrupteur sont de $2^5=32$ états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et 1. Pour ce type d'onduleur, seules cinq configurations sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme Suit :

A-Première configuration [11110000] :

Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont passants et Ka5, Ka6, Ka7 et Ka8 sont bloqués), on a la valeur de la tension simple de sortie est : (voir la figure 3.19)

$$V_{ao} = + E/2 \tag{3.9}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka5} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = + E/4 \tag{3.10}$$

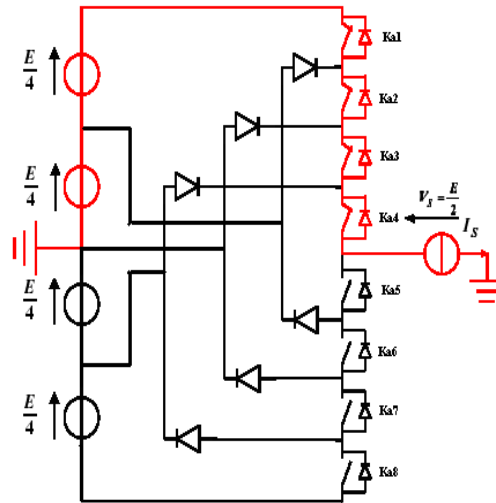


Figure 3.19 : 1^{ère} configuration du 1^{er} bras

B-Deuxième configuration [01111000] :

Ka2, Ka3, Ka4, et Ka5 sont passants et, Ka6, Ka7, Ka8 et Ka1 sont bloqués, on a la tension de sortie est : (voir la figure 3.20)

$$V_{ao} = + E/4 \tag{3.11}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka6} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = + E/4 \tag{3.12}$$

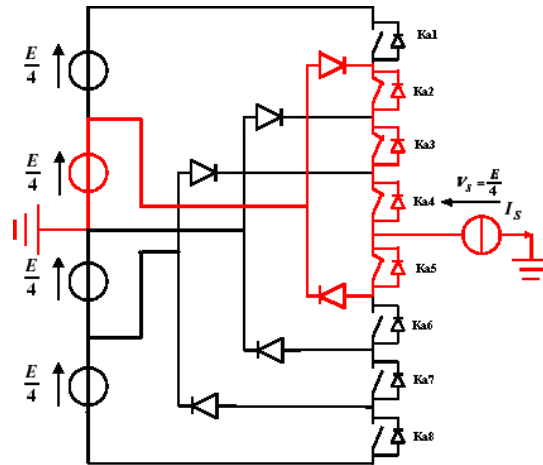


Figure 3.20: 2^{ème} configuration du 1^{er} bras

C-Troisième configuration [00111100] :

Ka3, Ka4, Ka5, et Ka6 sont passants et, Ka7, Ka8, Ka1 et Ka2 sont bloqués, on a la tension de sortie est : (voir la figure 3.21)

$$V_{ao} = 0 \tag{3.13}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka7} = V_{Ka8} = + E/4 \tag{3.14}$$

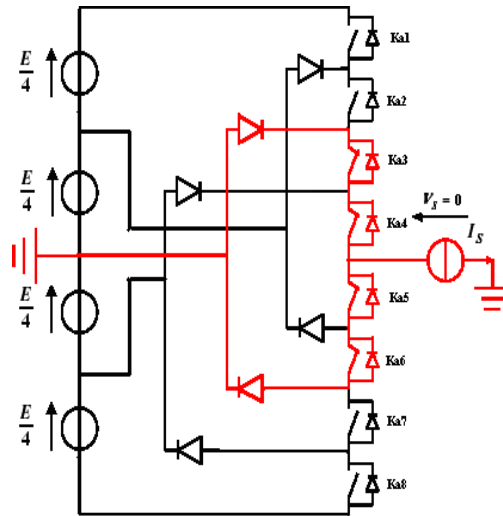


Figure 3.21 : 3^{ème} configuration du 1^{er} bras

D-Quatrième configuration [00011110] :

Ka4, Ka5, Ka6, et Ka7 sont passants et, Ka8, Ka1, Ka2 et Ka3 sont bloqués, on a la tension de sortie est : (voir la figure 3.22)

$$V_{ao} = - E/4 \tag{3.15}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka8} = + E/4 \tag{3.16}$$

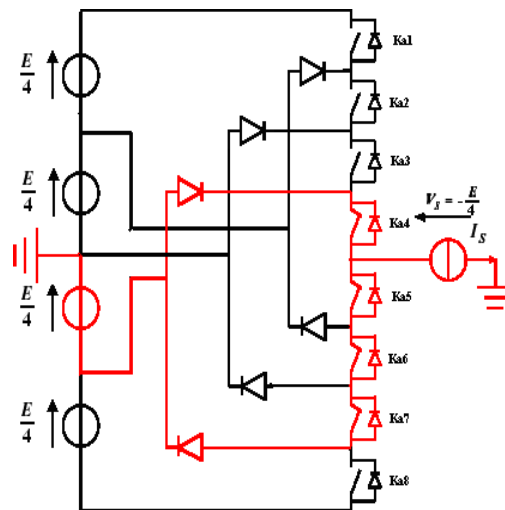


Figure 3. 22 : 4^{ème} configuration du 1^{er} bras

E-Cinquième configuration [00001111] :

Ka5, Ka6, Ka7, et Ka8 sont passants et, Ka1, Ka2, Ka3 et Ka4 sont bloqués, on a la tension de sortie est : (voir la figure 3.23)

$$V_{ao} = - E/2 \tag{3.17}$$

La tension inverse appliquée aux bornes des interrupteurs bloqués est :

$$V_{Ka1} = V_{Ka2} = V_{Ka3} = V_{Ka4} = + E/4 \tag{3.18}$$

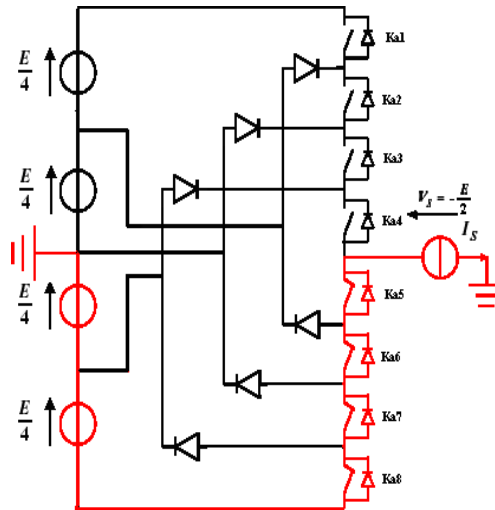
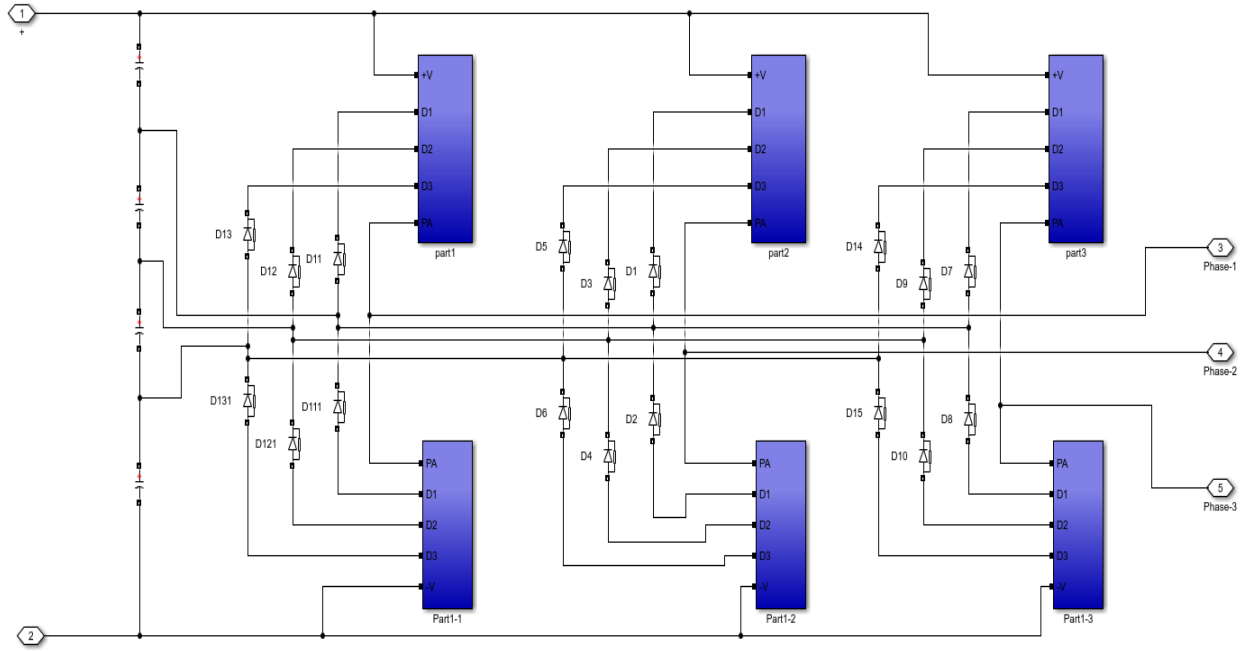


Figure 3.23 : 5^{ème} configuration du 1^{er} bras

Etat des interrupters								Tension de sortie V_{ao}
K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	K_{a5}	K_{a6}	K_{a7}	K_{a8}	
1	1	1	1	0	0	0	0	$E/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$E/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-E/4$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-E/2$

Tableau (3-2) : Table de commutation de l'onduleur NPC 5 niveaux. [26]**6-2 Simulation de l'Onduleur à cinq niveaux de types NPC :**

Le convertisseur DC-AC que nous proposons pour la simulation est schématisé dans Matlab Simulink par la figure 3.24 :

**Figure 3.24 :** L'onduleur NPC 5 niveaux

Les résultats de simulation pour l'onduleur cinq niveaux commandé par la Modulation sinusoïdale à triangles multiples sont illustrés dans les figures 3.25 ,3.26 et 3.27 :

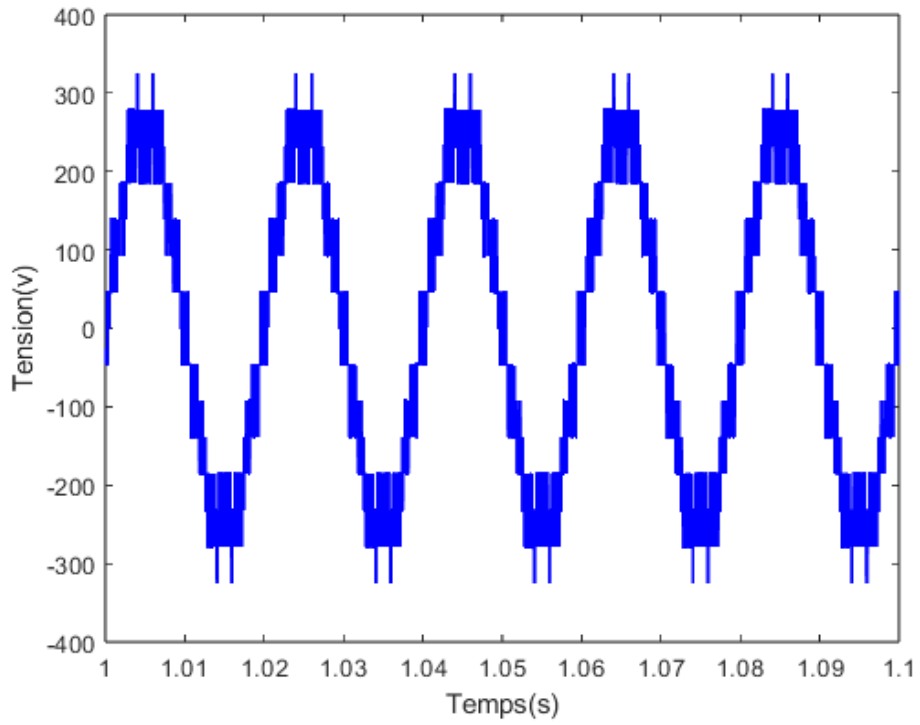


Figure 3.25 : Tension d'une phase de l'onduleur

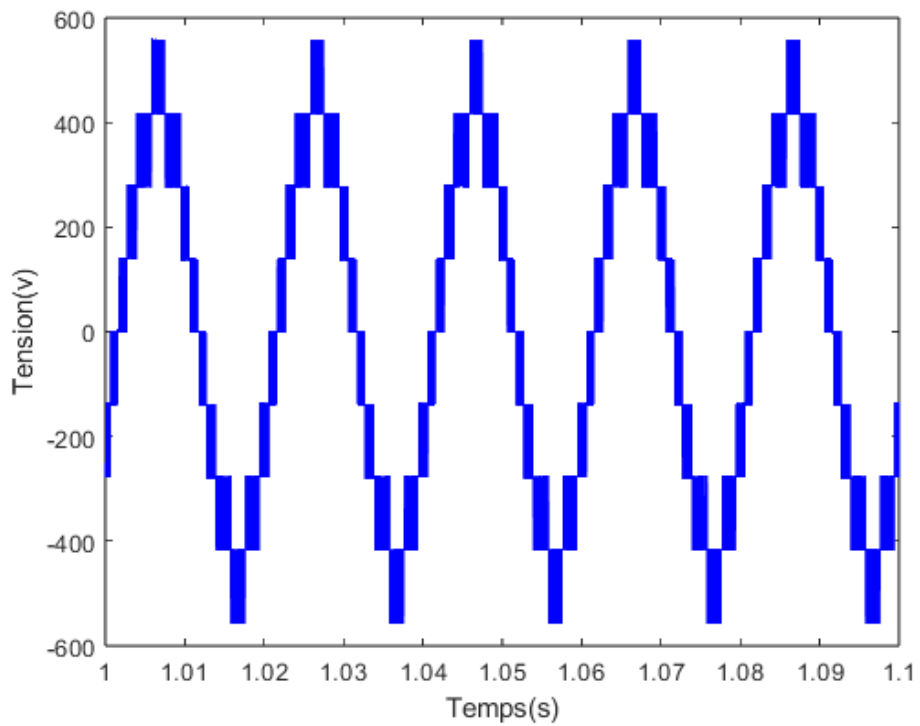


Figure 3.26 : Tension entre phase V_{13} de l'onduleur

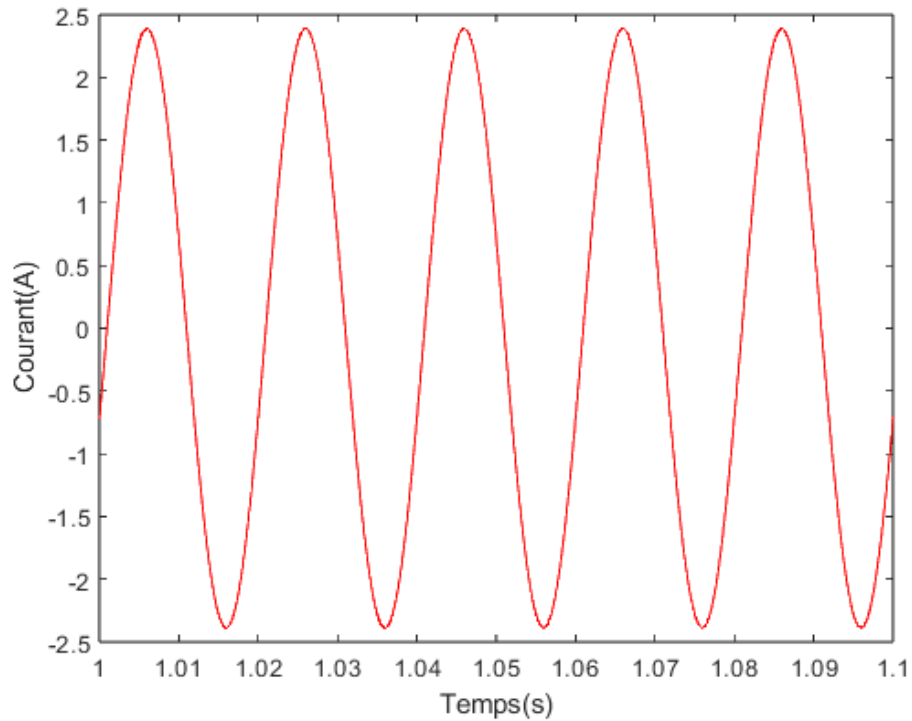


Figure 3.27 : Courant d'une phase de l'onduleur i_l .

7- Conclusion :

Dans ce chapitre on a étudié les modèles qu'on a utilisé dans notre système PV ; tel que le convertisseur DC/DC Boost, le MPPT et L'onduleur de type NPC à cinq niveaux de tension. Les résultats de simulation obtenus du système globale nous permet de introduire la méthode de diagnostic des défauts au niveau des interrupteurs constituant l'onduleur multiniveaux.

Le chapitre quatre est dédié au diagnostic des pannes au niveau du convertisseur DC-AC.

Chapitre 4

1- Introduction :

Ce chapitre présente le contexte de notre étude sur les défauts dans le convertisseur DC/AC, pour cela nous présentons tout d'abord la simulation des défauts au niveau des interrupteurs du premier bras de l'onduleur NPC.

Un historique sur les systèmes des réseaux de neurone est présenté en premier lieu, nous présenterons ensuite les définitions essentielles du RNA, par la suite, nous allons appliquer les RNA pour la détection et la localisation des différentes défaillances qui peuvent subir les interrupteurs constituant l'onduleur NPC à cinq niveaux de tension.

2- Historique :

En 1890 Le concept de mémoire associative a été introduit par W. James, ce dernier proposa une loi connue sous le nom de loi de Hebb

En 1943 J. Mc Culloch et W. Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ce sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).

En 1949 D. Hebb, physiologiste américain démontre à partir d'une expérience le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes ;

En 1958 Apparition du premier réseau de neurone artificiel (le perceptron), grâce aux travaux de Rosenblatt.[27]

En 1969 M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations théoriques du perceptron, ce qui entraîne alors un abandon financier des recherches dans le domaine.

Début des années 80 l'intérêt de ce domaine raviva grâce aux travaux de Hopfield qui démontra l'intérêt d'utiliser les réseaux récurrents (feedback) pour la modélisation des processus, et la création en parallèle d'un algorithme de rétro propagation par Werbos qui ne sera popularisé qu'en 1986 par Rumelhart.

3- Réseaux de neurones :

Un réseau de neurones est un ensemble d'éléments de traitement de l'information, avec une topologie spécifique d'interconnexions entre ces éléments et une loi d'apprentissage pour adapter les poids de connexions

3-1 Neurone biologique :

Des neurones un réseau de neurone artificiel est un modèle de calcul inspiré du modèle biologique, c'est-à-dire du cerveau humain. Ce dernier est composé d'un grand nombre de cellules nerveuses appelées neurones, et formées d'une partie cellulaire et d'une partie de noyau. La partie cellulaire, nommée Somme, se ramifie pour former les dendrites par lesquelles l'information s'achemine vers le corps du neurone (le Somme). L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone (unique) pour être transmise aux autres neurones. Les neurones ne sont pas directement connectés entre eux. La jonction ou l'espace qui sépare l'axone d'un neurone et les dendrites du neurone voisin est appelé « Synapse ». [27] (voir la figure 4.1)

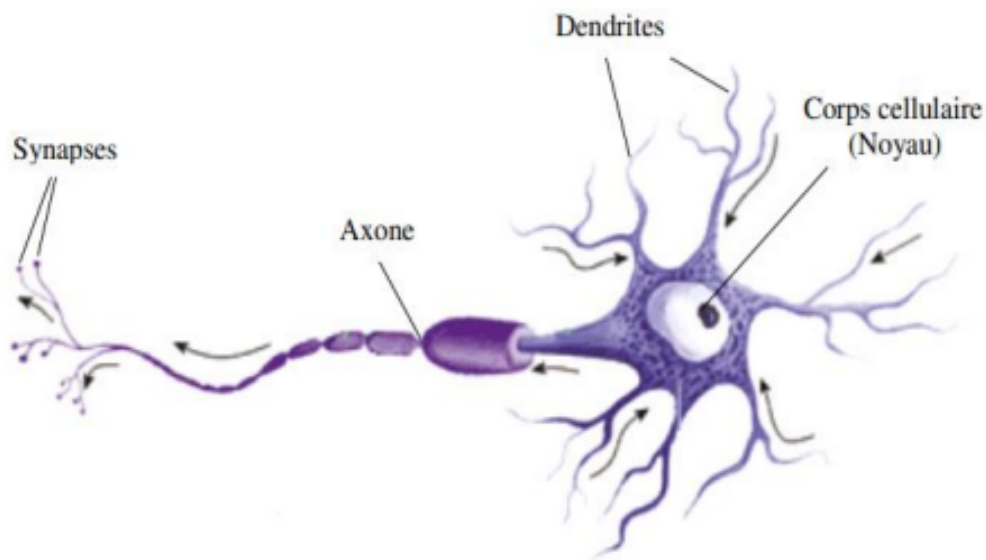


Figure 4.1 : Neurone biologique.

Les synapses possèdent une sortie de « mémoire » qui leur permet d'ajuster leur fonctionnement en fonction de leur historique d'activation entre deux neurones. Cette plasticité est à l'origine des mécanismes d'apprentissage.

3-2 Neurone formel :

Un neurone artificiel dit formel est un modèle théorique inspiré de neurone biologique, il contient plusieurs entrées, chacune de ces entrées associée un poids, fonction de transfert et élément de sortie, pour inventer un raisonnement intelligent d'une façon artificiel (Figure 4.2). [28]

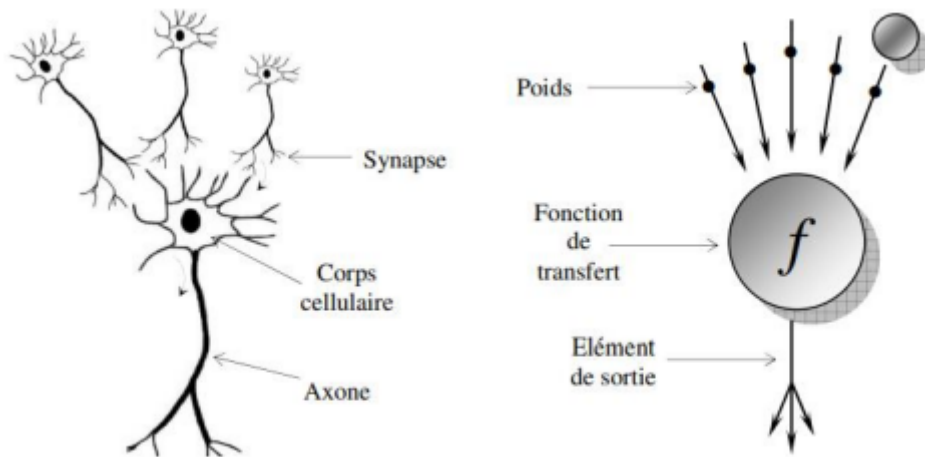


Figure 4.2 : Neurone formel.

4- Fonctions d'activation :

La fonction d'activation est une fonction mathématique qui permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée, cette fonction est caractérisée par sa monotonie, son seuillage, et sa saturation. Le tableau 4.1 suivant représente les différentes fonctions d'activation :

Chapitre 4 : Diagnostic et classification des défauts par la méthode des réseaux de neurones


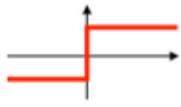
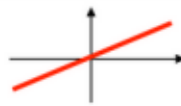

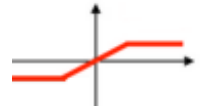

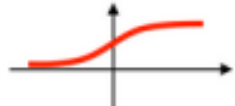
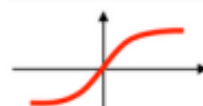
La fonction d'activation	Equation	Graphes
Echelon (unipolaire)	$\begin{cases} f(x) = 0 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Echelon (bipolaire)	$\begin{cases} f(x) = -1 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Linéaire	$f(x) = x$	
Linéaire saturée	$\begin{cases} f(x) = 0 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = x & \text{si } 0 \leq x \leq 1 \\ f(x) = 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Linéaire saturée symétrique	$\begin{cases} f(x) = -1 & \text{si } x < -1 \\ f(x) = x & \text{si } -1 \leq x \leq 1 \\ f(x) = 1 & \text{si } x > 1 \end{cases}$	
Rampe	$\begin{cases} f(x) = 0 & \text{si } x < 0 \\ f(x) = x & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$	
Sigmoïde	$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$	
Tangente hyperbolique	$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$	

Tableau 4.1: Fonctions d'activation.[29]

5- Architecture des réseaux de neurones :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle. Elles peuvent être quelconque, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité.

a) Réseaux multicouches :

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau, et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. (voir la figure 4.3)

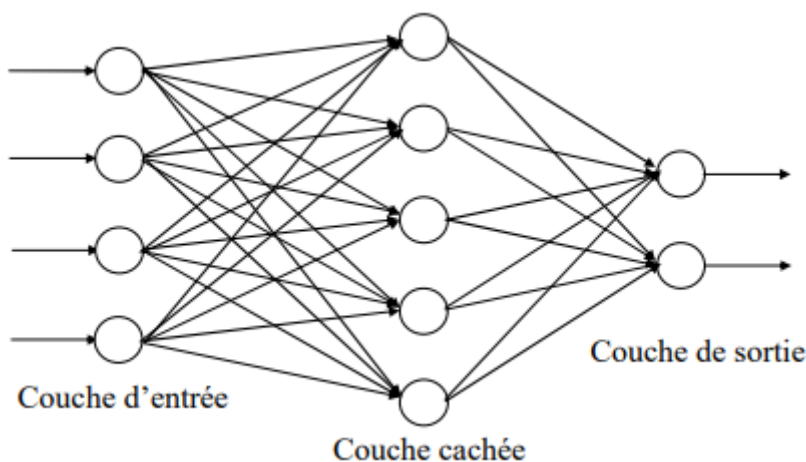


Figure 4.3: Architecture d'un réseau multicouche.

b) Réseaux récurrents :

Ce type de structure possède une ou plusieurs sorties de neurones d'une couche aval connectée aux entrées des neurones de la couche amont ou de la même couche. Ces connexions récurrentes ramènent l'information à l'arrière du sens de propagation définie dans un réseau multicouche. Ces réseaux sont assez puissants car leur fonctionnement est séquentiel.[30] (voir la figure 4.4)

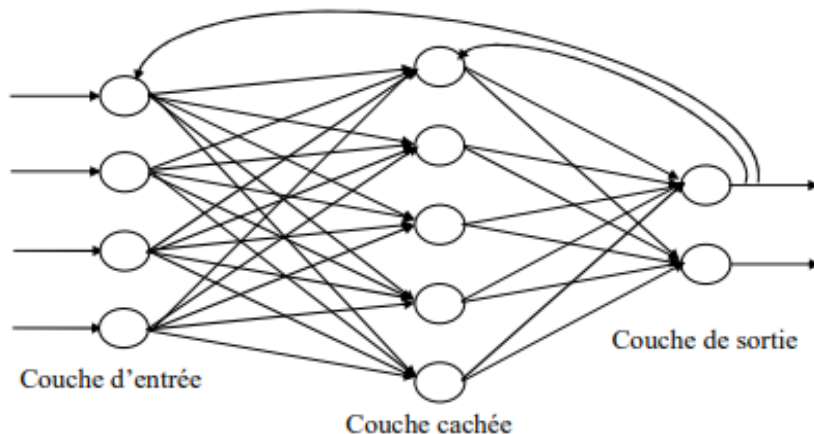


Figure 4.4: Architecture des réseaux récurrents.

6- Apprentissage des réseaux de neurones :

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle les valeurs des poids synaptiques du réseau sont ajustées pour remplir au mieux la tâche à laquelle le réseau est destiné.

6-1 Les types d'apprentissage :

On peut distinguer trois types d'apprentissage :

- **L'apprentissage est supervisé :** Dans ce type d'apprentissage, on cherche à imposer au réseau un fonctionnement donné en forçant les sorties des réseaux à prendre des valeurs bien données (choisie par l'opérateur) et ce en modifiant les poids synaptiques. Le réseau se comporte alors comme un filtre dont les paramètres de transfert sont ajustés à partir des couples entrée-sortie présentés
- **L'apprentissage non supervisé :** Dans ce cas, seules les entrées de la base d'apprentissage sont présentées au réseau et c'est l'algorithme qui va, durant l'apprentissage et à l'aide de propriétés statistiques, déterminer le nombre de classes du problème, c'est à dire les différentes réponses possibles du réseau. Il n'y a pas de connaissance à priori, le réseau va construire sa propre représentation des données. Une fois cette phase terminée, le réseau

Chapitre 4 : Diagnostic et classification des défauts par la méthode des réseaux de neurones

pourra être utilisé sur des entrées inconnues. Ceci Constitue la phase de rappel ou de la généralisation.[31]

- **L'apprentissage par renforcement** : est une approche utilisée dans les problèmes de planification à travers le temps. Elle utilise deux réseaux : un réseau d'action et un réseau d'évaluation qui joue le rôle d'un superviseur et qui génère un signal d'avertissement à chaque fois que les actions prises sont mauvaises. Ce signal sert à entraîner le réseau d'action. Les poids du réseau d'évaluation sont altérés dans le sens de renforcer les bonnes actions et de sanctionner les mauvaises.

7- Application des RNA pour la détection des défauts de l'onduleur :

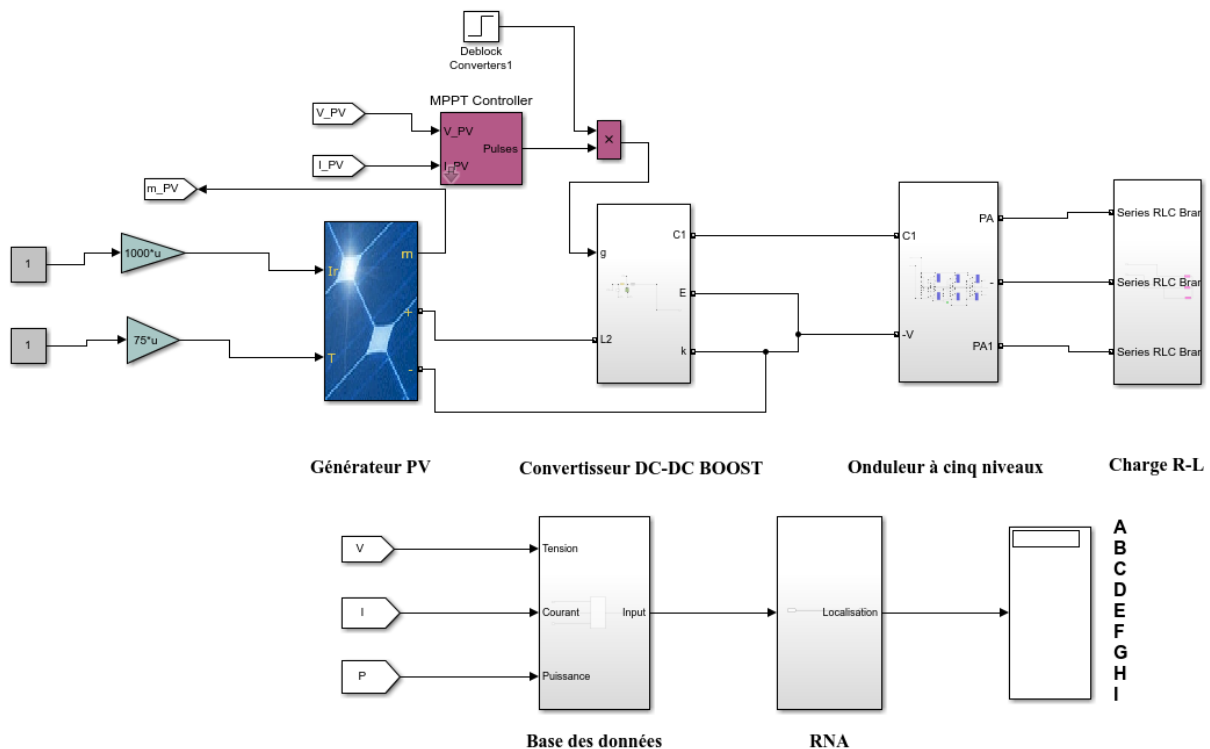


Figure 4. : Schéma de système PV avec RNA

7-1 Construction des blocs RNA :

La structure du RNA prend la forme suivante : (voir la figure 4.5)

- Réseau à 3 couches : 1 seule couche cachée
- 10 neurones dans la couche cachée
- Le nombre de nœuds à l'entrée est égal à 50037
- Le nombre de nœuds dans la couche de sortie est 9 sorties pour la détection de défaut.

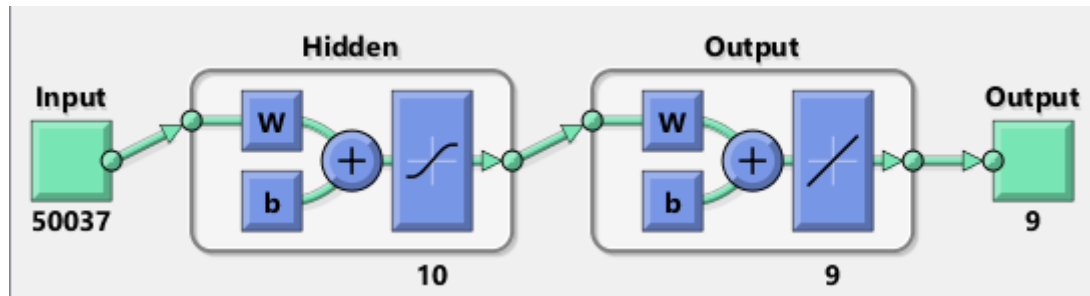


Figure 4.5: Construction des blocs RNA.

Les étapes de construction et de validation des réseaux de neurones sont réparties en deux phases :

A-Choix des entrées des réseaux :

Les entrées du RNA sont la tension, le courant et la puissance avec des différentes températures (25°, 35°, 45°, 55°, 65°, 75°).

B-Choix des sorties du réseau :

Lors de la détection d'un défaut, le réseau doit indiquer un nombre binaire quelconque sa sortie qui correspond à un défaut du composant. Dans notre travail on a :

- Le nombre de sorties de réseau est égal à 9

Chapitre 4 : Diagnostic et classification des défauts par la méthode des réseaux de neurones

- Les différents défauts aux niveaux des composants constituant l'onduleur sont représentés sur le tableau (4.2), avec leurs codes associés.

Class de system	Codes des sorties
System sain	000000001
Défaut ouverture permanente d'interrupteur 1	000000010
Défaut ouverture permanente d'interrupteur 2	000000100
Défaut ouverture permanente d'interrupteur 3	000001000
Défaut ouverture permanente d'interrupteur 4	000010000
Défaut court-circuit d'interrupteur 1	000100000
Défaut court-circuit d'interrupteur 2	001000000
Défaut court-circuit d'interrupteur 3	010000000
Défaut court-circuit d'interrupteur 4	100000000

Tableau 4.2: Classification des défauts avec leurs codifications

C- Choix de fonction d'activation :

Comme les sorties sont binaires et les entrées réelles, la fonction d'activation adoptée est une

fonction sigmoïde $f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$.

8- Résultats et interprétations :

Les figures suivantes montrent les différentes formes de tensions à la sortie de l'onduleur à cinq niveaux de tensions pour chaque défaut au niveau des interrupteurs constituant le convertisseur DC-AC : (voir les figures 4.6 jusqu'à 4.13)

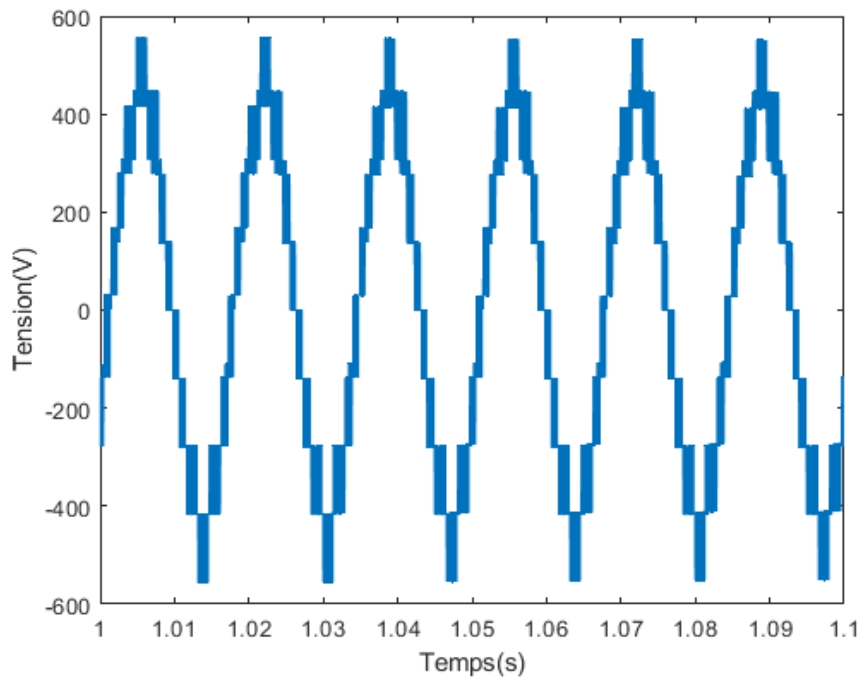


Figure 4.6: Défaut ouverture permanente d'interrupteur 1.

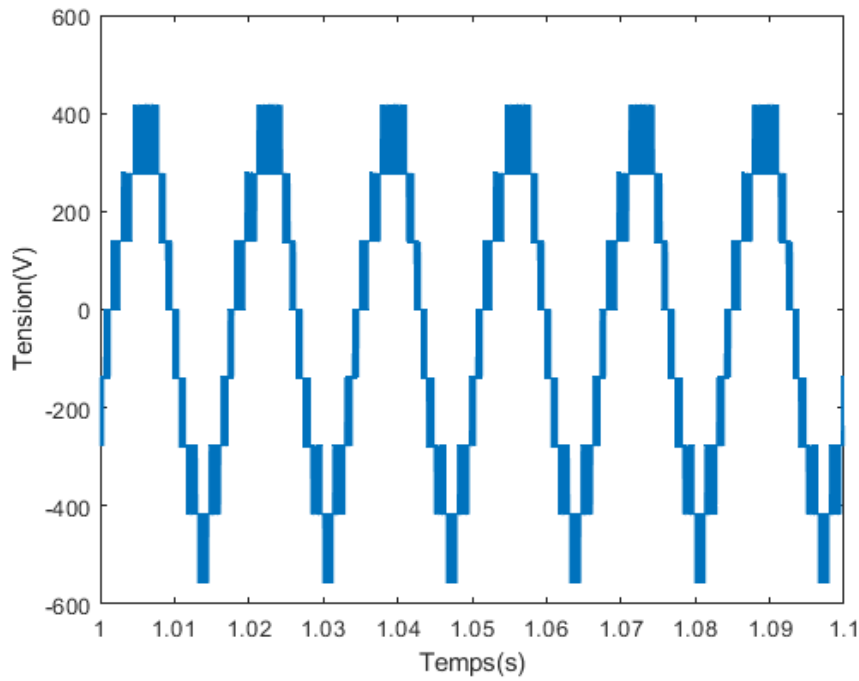


Figure 4.7: Défaut court-circuit d'interrupteur 1

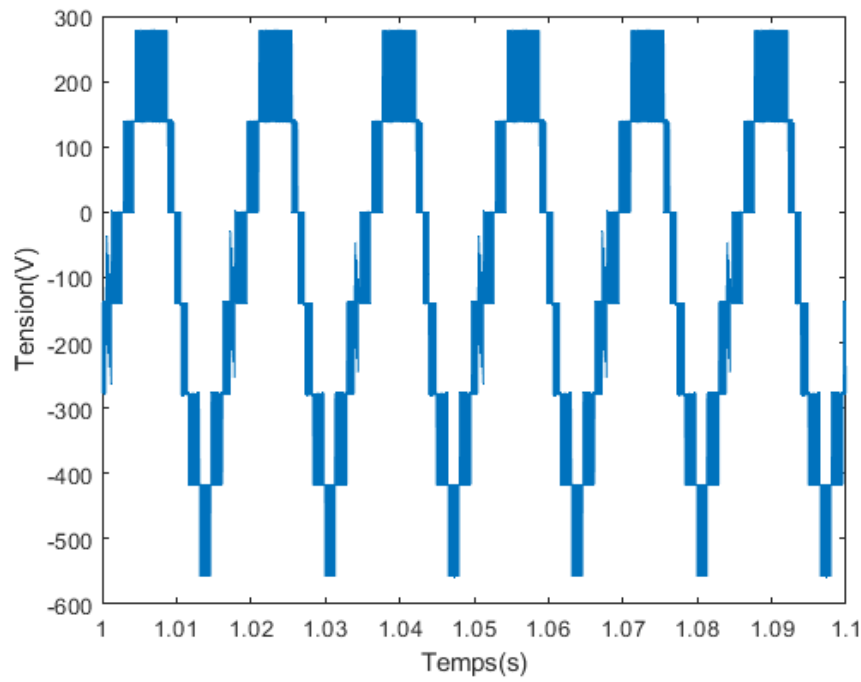


Figure 4.8: Défaut ouverture permanente d'interrupteur 2.

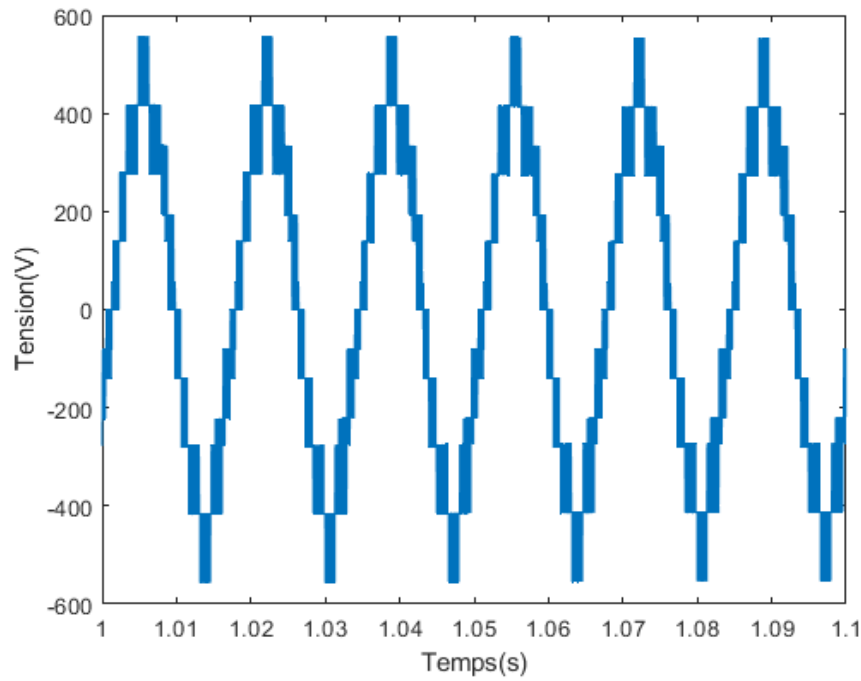


Figure 4.9: Défaut court-circuit d'interrupteur 2

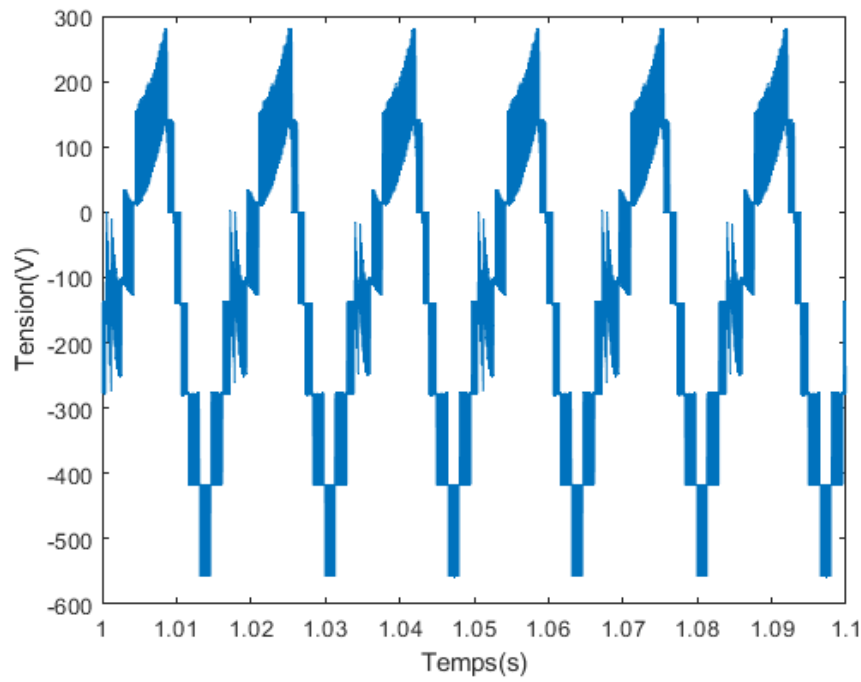


Figure 4.10: Défaut ouverture permanente d'interrupteur 3.

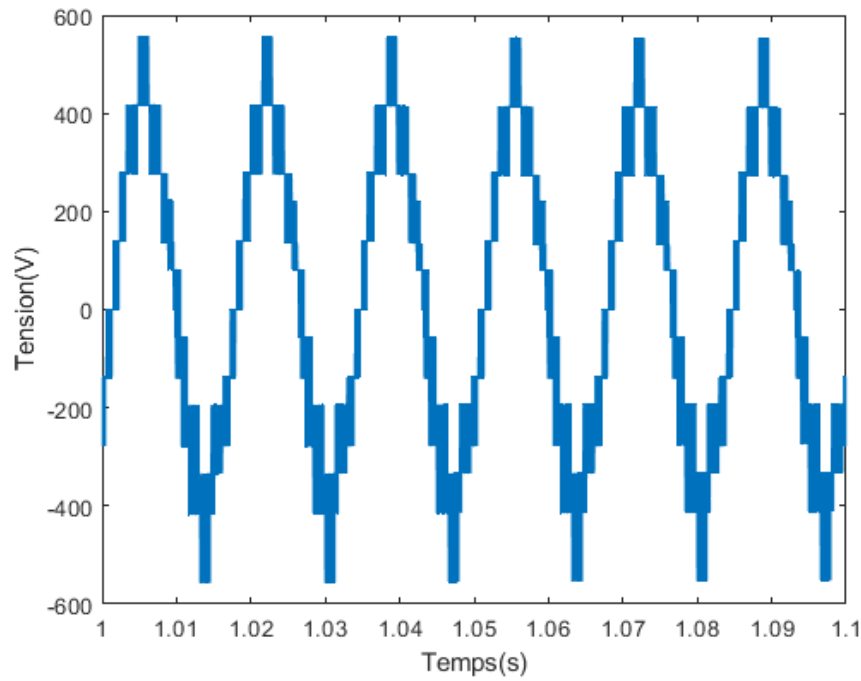


Figure 4.11: Défaut court-circuit d'interrupteur 3

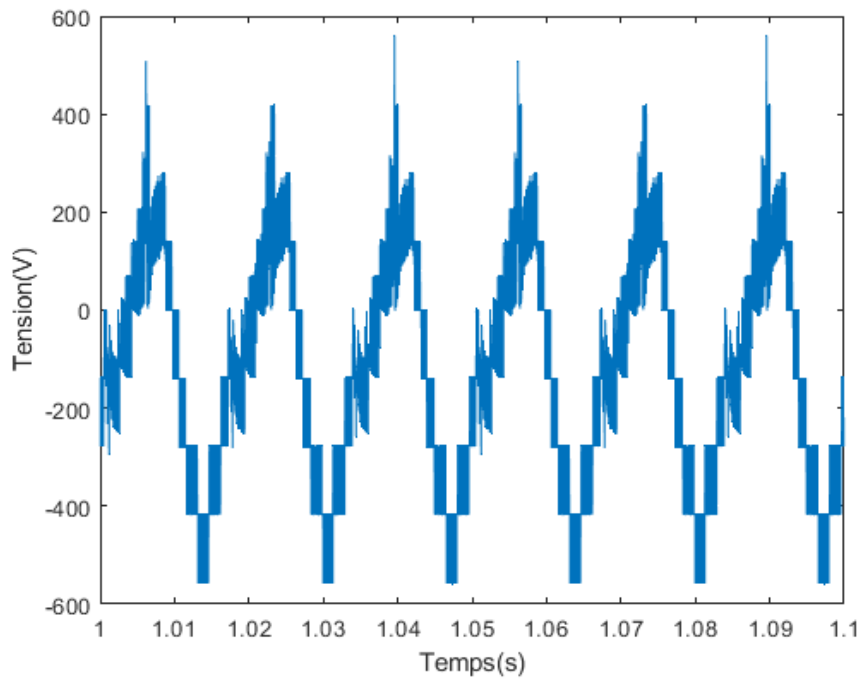


Figure 4.12: Défaut ouverture permanente d'interrupteur 4.

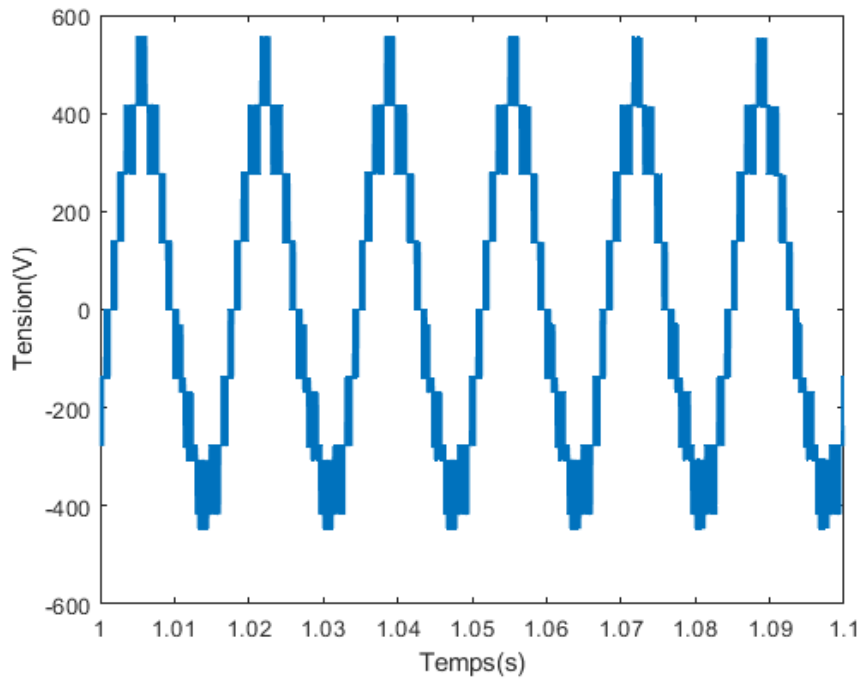


Figure 4.13: Défaut court-circuit d'interrupteur 4

La figure 4.14 montre la fenêtre de performance du réseau neuronal pour la classification des défauts du système solaire photovoltaïque. Dans ce total, 862 itérations sont nécessaires pour une formation complète du RNA. Le gradient pour cette formation était mesuré jusqu'à $8.20e-07$.

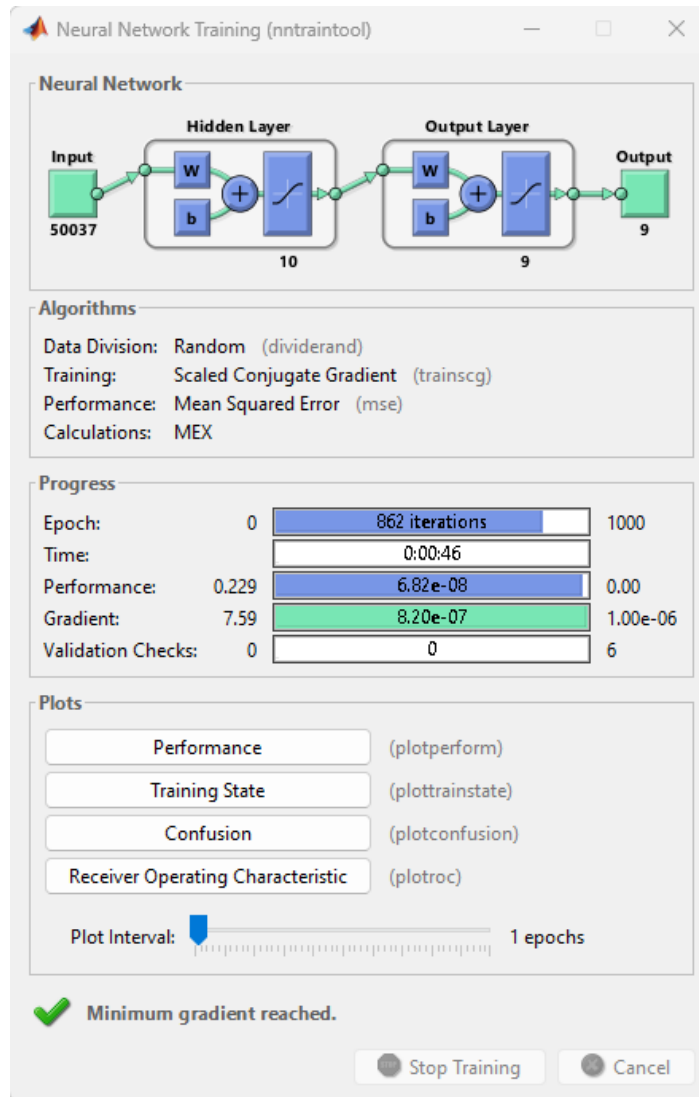


Figure 4.14: Fenêtre d'entraînement du RNA.

Les Figures (4.15) et (4.16) montrent l'état d'apprentissage et la phase de performance du RNA pour gérer l'ensemble de données sélectionnées. Sur la figure 4.15, le gradient et le contrôle de validation de l'ensemble de données formées sont représentés à 862 itérations. Selon la simulation,

Chapitre 4 : Diagnostic et classification des défauts par la méthode des réseaux de neurones

le gradient est de $8.1999e-07$ à l'itération 862, ce qui représente l'écart négligeable des données formées avec une fonction de perte minimale.

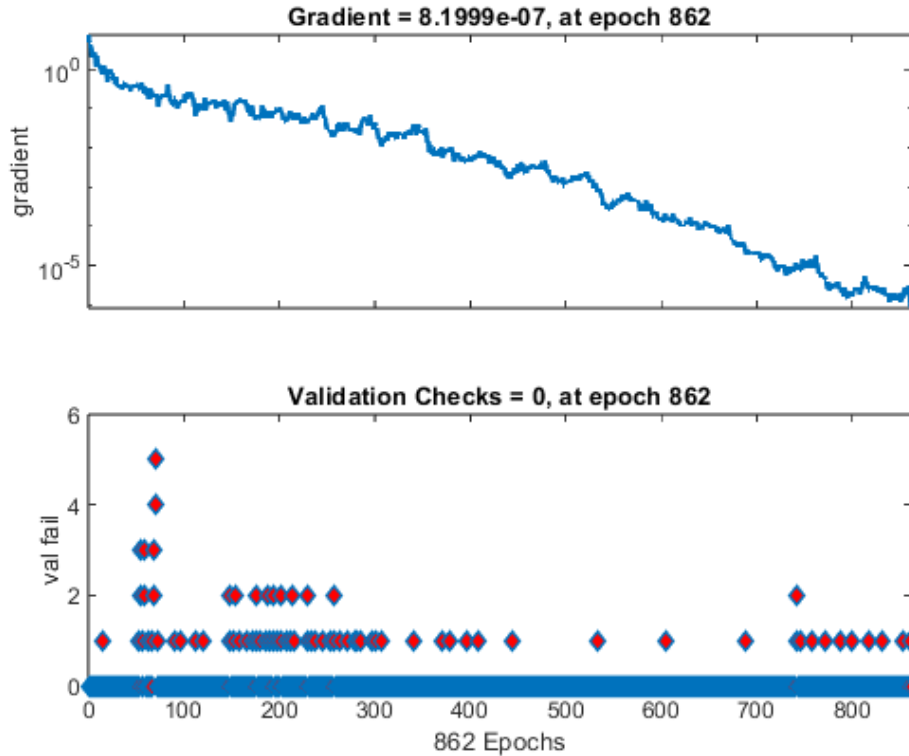


Figure 4.15: Courbes de gradient et la valeur d'échec.

Sur la figure 4.16, l'erreur quadratique moyenne est représentée pour différentes itérations où les échantillons de l'ensemble formé de données sont convergés avec le meilleur résultat d'apprentissage à 862 itérations. Les meilleures performances de validation de l'ensemble formé de données sont atteintes à 862 itérations. Selon le résultat de la simulation, la meilleure performance de validation est de $8.7428e-08$. Les données d'apprentissage en bleu, les données de validation en vert, les données de test en rouge.

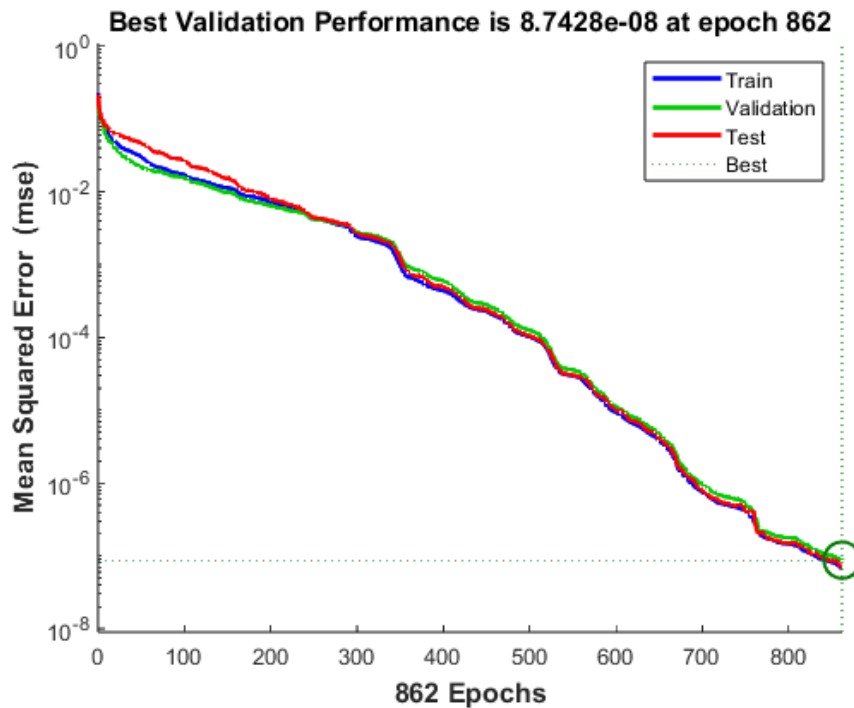


Figure 4.16: Graphe de l'erreur d'apprentissage, de test et de validation.

Lors de la lecture de la matrice de confusion (Figure 4.17), les cellules vertes et rouges représentent respectivement le nombre de classifications correctes et incorrectes par le RNA. Les cellules grises représentent la précision de détection totale par rapport à chaque ligne et colonne. Les chiffres 1,2,3,4,5,6,7,8 et 9 signifient respectivement état sain et nos défauts. La précision globale de l'algorithme utilisé, comme en témoigne la matrice de confusion, était de 100 %.

Confusion Matrix

1	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
6	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
7	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
8	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	0 0.0%	100% 0.0%
9	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	6 11.1%	100% 0.0%
	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%	100% 0.0%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Target Class									

Figure 4.17: Matrice de confusion.

9- Conclusion:

Dans ce chapitre, un système de diagnostic et de localisation des défauts de l'onduleur est proposé, il est basé sur l'utilisation des outils avancés à base des réseaux de neurones. Les défauts qui peuvent être détectés sont les défauts interrupteurs CC (court-circuit en permanence) et interrupteurs CO (circuit-ouvert permanence).

Après une mise en œuvre et des tests réussis de la technique proposée, il est conclu que les résultats de détection et de diagnostic de panne proposés sont satisfaisants. En outre, l'algorithme d'extraction de caractéristiques proposé est simple, La simplicité du système augmente le temps de réponse, raison pour laquelle le système proposé peut détecter les défauts avec une rapidité et une précision élevée. Les résultats de test obtenu nous montrent que l'obtention de bon modèle qui permettraient de prendre la bonne décision nécessitent l'utilisation de base de données de taille importante et couvrant toutes les modes de fonctionnement de l'installation photovoltaïque.

Conclusion générale :

Ce travail entre dans le cadre de diagnostic des défauts des systèmes photovoltaïques à base des réseaux de neurones. Alors que les technologies photovoltaïques sont devenues l'une des ressources d'énergie renouvelable les plus prometteuses dans les environnements urbains, la surveillance et la maintenance de ces systèmes ont gagné en importance, afin de soutenir un fonctionnement fiable du système pendant la durée de vie prévue du fonctionnement sur le terrain.

Nous avons présenté le principe de fonctionnement du système PV, les modèles électriques équivalents (modèle idéal à une diode et modèle réelle à une diode), ainsi que les différents modèles mathématiques existants. Nous avons présenté la modélisation mathématique de notre système photovoltaïque, et utilisé le logiciel MATLAB/Simulink pour étudier dans un premier temps le comportement d'un module photovoltaïque dans les conditions standard ($E=1000 \text{ W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$). Nous avons étudié aussi l'influence de la température et de l'éclairement sur l'énergie produite par le PV.

La deuxième étape consiste à établir une base de données sur le comportement sain et comportement défaillant du système PV. On a obtenu des résultats satisfaisants par simulations du fonctionnement sain du système PV vis-à-vis des variations de température.

Après une mise en œuvre et des tests réussis de la technique proposée, il est conclu que les résultats de détection et de diagnostic de panne proposés sont satisfaisants. En outre, l'algorithme d'extraction de caractéristiques proposé est simple, La simplicité du système augmente le temps de réponse, raison pour laquelle le système proposé peut détecter les défauts avec une rapidité et une précision élevée.

Les résultats de test obtenu même avec une variation de température et radiation, le système peut identifier et classifier le type de défaut, donc la base de données proposée est fiable pour tous les cas possibles.

Perspectives :

Comme perspectives nous proposons :

- D'améliorer la capacité de diagnostic pour le plus grand nombre des défauts possibles au niveau du système PV.

- D'augmenter la base des données l'algorithme de diagnostic proposé pour faire la détection et la localisation de d'autres types de défauts pour un système GPV.

Bibliographie

- [1] Laribi Moustafa, mémoire de master, « Etude d'un système photovoltaïque. », Université de Guelma, 2018.
- [2] Mechalikh Med Nadjib, mémoire de master, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau.», Université de Ouargla, 2013.
- [3] Bouchareb Khalil et Touati Ayoub, mémoire de master, « modélisation et simulation d'un système PV adapté par une commande MPPT basée sur un mode glissant. », Université de Guelma, 2021.
- [4] Mr. Belaout Abdeslam, mémoire pour magister, «Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension.» Université de Sétif-1, 2014.
- [5] Dr. BELAID LALOUNI Sofia, Cours, « Energie Solaire Photovoltaïque. », Université de Bejaïa, 2015.
- [6] <https://energieplus-lesite.be/techniques/photovoltaïque3/types-de-cellules/>.
- [7] Sakhri Riadh et Mettouchi Ahmed Sedik, mémoire de master, « Diagnostique d'un champ solaire photovoltaïques par réseaux de neurones artificiels.», Université de Blida, 2018.
- [8] Oussama Bounefour et Sofiane Boukendir, mémoire de master, «Diagnostic des défauts d'un système Photovoltaïque.», Université de Jijel, 2022.
- [9] KIATI Yacine, Bouta Souhieb et Korichi Mohammed Laid, mémoire de master, «Contribution au diagnostic des défauts dans les systèmes photovoltaïques.», Université d'El Oued, 2022.
- [10] Messaoud Ghrissi, Zendah Ahmed Alsalem et Bela Baci Oussama, mémoire de master, « Méthode intelligente de diagnostic de défaut pour les systèmes photovoltaïques basée sur les réseaux de neurones. », Université d'El Oued, 2022.
- [11] Boukaroura Abdelkader, mémoire de magister, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph. », Université de Stif, 2009.
- [12] Abbassen Lyes, mémoire de magister, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque.», Université de Tizi ouzou, 2011.

[13] Bouchama Messaoud et Laouar Mohammed Islam, mémoire pour master, « Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques. », Université de Jijel, 2018.

[14] Drif Mahmoud, mémoire de master, « Etude d'identification et localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque. », Université de Msila, 2016.

[15] Zaiour Meriem, mémoire de master, « Détection et Localisation de Défauts dans un système photovoltaïque. », Université de Annaba, 2020.

[16] Lahlou Samir, mémoire de master, « Détection et localisation des défauts convertisseurs statiques dans un système Photovoltaïque raccordé au réseau moyenne tension.», Université de Boumerdes, 2016.

[17] Long BUN, thèse de doctorat, « Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque. », Université de Grenoble, 2011.

[18] Amar Fatima et Abde Latif Abdel Raouf, mémoire de master, « Détection et localisation des défauts d'un système PV. », Université de Medea, 2020.

[19] Mr. Khenfer Riad, thèse de doctorat, « Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques. », Université de SETIF 1, 2015.

[20] Sabri Nassim et Benkercha Rabah, mémoire de master, « Contribution au détection et diagnostique des défauts dans les systèmes photovoltaïques par l'intelligence artificielle. », Université de Blida, 2013.

[21] CHIBANE Lydia, Mémoire de projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état, « Diagnostic des défauts des panneaux photovoltaïques en utilisant le modèle SANDIA.» Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2017.

[22] Ayad Abdel Madjid et Benazize Zakaria, mémoire de master, « Détection et localisation des défauts d'un système PV. », Université de Medea, 2017.

[23] Hananou Fatiha et Rouabah Aicha, mémoire de master, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. », Université de Ouargla, 2014.

[24] Battane Hanane et Benaissa Zohra, mémoire de master, « Détection et Diagnostic de Défauts d'Un Onduleur par la Technique des Réseaux de Neurones. », Université de Tiaret, 2019.

- [25] Badhbouda Khadidja, mémoire de master, « mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en physique énergétique. » Université de Adrar, 2015.
- [26] Brighen Haroun et Halaimia Safouane, mémoire de master, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale. », Université de Tébessa, 2016.
- [] Lattoui Mohamed et Zellouta Bahous, mémoire de master, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution.», Université de Tiaret, 2018.
- [27] H. Abdi. « Les Réseaux de neurones », édition presses universitaires de Grenoble, 1994.
- [28] Radwan Sadouni, « cours commande intelligente », Université de ghardaia, Janvier 2020.
- [29] A. Djokhrab, "Planification et Optimisation de Trajectoire d'un Robot Manipulateur à 6 D. D. L. par des Techniques Neuro-Floues," Thesis.UnivBiskra.Dz, 2015.
- [30] Madjid BOUDJEDAIMI mémoire de magister, « : Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels », université mouloud mammeri tizi ouzou,2009.
- [31] NAJMI KHAYRA,mémoire de master, « : Une approche hybride d'optimisation pour l'estimation de l'énergie solaire», université d'adrar,2019.