

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Département Ingénierie des Systèmes Electriques

Mémoire de Master

Présenté par

FARES Belynda & DELICI Nour el islam

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Machines Electriques**

Diagnostic des défauts des convertisseurs DC/DC pour systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux électriques

Soutenu le 16 Juillet 2019 devant le jury :

M. FELLAG Sid-Ali	Professeur	FSI/UMB Boumerdes	Président
M. AKROUM Hamza	MCB	FSI/UMB Boumerdes	Examineur
M. AIBECHE Abderrezak	MCB	FSI/UMB Boumerdes	Rapporteur

Année Universitaire : 2018/2019

الملخص : في السنوات الأخيرة ، زاد استخدام الطاقة الكهربائية الضوئية زيادة كبيرة وهذا يرجع إلى العديد من المزايا التي تقدمها ، ولكن أنظمتها لديها حساسية عالية للأعطال ذات نمط الدارة المفتوحة أو الدارة القصيرة في المحولات DC-DC ، هذه الأخيرة يمكن أن تؤدي إلى حدوث خلل كلي أو جزئي في التركيب الكهربائي.

الهدف من هذا العمل هو تطوير طريقة لتشخيص الأعطال لحماية النظام الكهروضوئي المتصل بشبكات الكهرباء وضمان استمرارية الخدمات.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الضوئية ، أعطال الدارة المفتوحة والقصيرة ، الخلل ، التشخيص

Abstract : In recent years, the use of photovoltaic energy has increased significantly and this is due to the many advantages it presents, however its systems have a high sensitivity to open-circuit or short-circuit faults type in converters DC-DC, these can lead to a total or partial failure of the installation.

The aim of this work is to develop a method of fault diagnosis to protect the photovoltaic system connected to the electrical networks and ensure the continuity of services.

Keywords: Photovoltaic Energy, Open-Circuit and Short-Circuit Faults, Failure, Diagnostic

Résumé : Ces dernières années, l'utilisation de l'énergie photovoltaïque a connue une augmentation considérable et cela est due aux nombreux avantages qu'elle présente, cependant ses systèmes présentent une grande sensibilité aux défauts de type circuit-ouvert ou court-circuit dans les convertisseurs DC-DC, ces derniers peuvent conduire a un dysfonctionnement totale ou partiel de l'installation électrique.

Le but de ce travail est de développée une méthode de diagnostic des défauts afin de protégé le système photovoltaïque raccordé aux réseaux électriques et d'assuré la continuité de services.

Mots clés : Énergie Photovoltaïque, Défauts Circuit-Oouvert et Court-Circuit, Dysfonctionnement, Diagnostic

Dédicace

Aux témoignages d'affection, d'amour et de Grande reconnaissances, je tenais à dédié se modeste travail aux êtres les plus chers que j'ai dans ma vie :

A mes parents.

A ma sœur CYNTHIA.

A mon frère ZINEDDINE.

A la mémoire de ma grand-mère.

A mes tentes RADIA, FOUZIA, NORA, SAMIA, NADIA.

A mes oncles KAMEL, MOUNIR.

A mon binôme NOUR EL ISLAM.

A mes amie SOUMIA et AFFAF.

A tous les membres de la famille FARES et DOUCENE.

BELYNDA

Dédicace

*J'ai toujours pensé faire ou offrir quelque chose à ma **mère** en signe de reconnaissance pour tout ce qu'elle a consenti d'effort rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.*

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et la reconnaissance.

Je dédie ce modeste travail :

- ❖ *A mes parents.*
- ❖ *A ma sœur.*
- ❖ *A mes cousins et cousines.*
- ❖ *A toute ma famille sans exceptions.*
- ❖ *A mon binôme Belynda*
- ❖ *A tous les membres de la famille FRAOUCENE.*

A mes cousins les plus chères : surtout Amira et ses enfants Rayan et Raouf, Mohamed Seri, Omar , Brahim , Mohamed Fraoucene, Amir, Chemsou , Khalil ,Mouad et Chicoco.

A mes amis : Cynthia, Dacine, Sabrina, Zinou, Yacine, Zaki, Ziko, Abdelmalek, Nassim, Rachid, Ultras Verde Leone section 35, et tout les BMists.

Nour El Islam

Remerciement

Nous tenons exprimé toute notre gratitude et reconnaissance à notre encadreur Monsieur ***AIBECHE Abderrezak*** Docteur à l'Université de Boumerdes-Faculté des Sciences de l'Ingénieur-Département Ingénierie des Systèmes Electriques, pour les précieux conseils qu'il a su nous donnés et l'attention et le sérieux avec lesquels il a suivi de près notre travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements au Président de Jury, ainsi qu'aux membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous exprimons nos plus sincères remerciements à tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation tout au long de notre parcours universitaire et sans oublier de remercier tous le personnel du Département Ingénieries des Systèmes Electriques.

Nous remercions également toute personne qui a contribué de prêt ou de loin à l'accomplissement de ce travail.

Nous remercions les membres de nos familles pour leur soutien et leur encouragement sans eux nous n'y serons jamais arrivés.

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Notations et Symboles	
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Généralité sur l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique sur l'énergie solaire.....	4
I.3 l'énergie solaire.....	4
I.3.1 Le soleil.....	4
I.3.2 Aspect géométrique.....	5
I.3.2.1 Coordonnées du soleil.....	5
A. Coordonnées équatorial.....	5
B. Coordonnées horizontales du soleil.....	6
I.3.2.2 Coordonnées terrestres.....	7
I.3.2.3 Orientation et inclinaison d'une surface.....	7
I.3.3 Le rayonnement solaire.....	7
I.3.3.1 Les différents types de rayonnement.....	8
a) Rayonnement direct.....	8
b) Rayonnement diffus.....	8
c) Rayonnement solaire réfléchi.....	8
d) Le rayonnement global.....	8
I.4 Les composants d'un système photovoltaïque.....	9
I.4.1 La cellule PV.....	9
I.4.2 Le module PV.....	9
I.4.3 Le panneau photovoltaïque.....	10
I.4.4 Le Générateur PV et ses performances.....	10
I.5. Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.6. Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque.....	11
I.6.1 Système PV autonome.....	11
I.6.2 Système PV connecté directement au réseau.....	12
I.6.3 Mode hybride.....	13
I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	13
I.7.1 Avantages.....	13
I.7.2 Inconvénients.....	14
I.8 conclusion.....	14

Chapitre II: Modélisation et caractérisation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction.....	15
II.2 La cellule photovoltaïque.....	15
II.2.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire idéale.....	15
II.2.2 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle.....	16
II.2.2.1 Modèle a diode unique.....	16
II.2.2.2 Modèle a double diode (Bishop).....	17
II.3 Association des cellules solaires photovoltaïques.....	18
II.3.1 L'association série des cellules PV.....	18
II.3.2 L'association parallèle des cellules PV.....	19
II.3.3 L'association mixte des cellules PV.....	20
II.4 Influence de l'éclairement.....	21
II.5 Influence de la température.....	22
II.6 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.....	22
II.7 Les convertisseurs statiques.....	24
II.8 Les convertisseurs DC/DC.....	24
II.8.1 Hacheur Buck.....	24
II.8.2 Hacheur Boost.....	25
II.8.3 Hacheur Buck-Boost.....	25
II.9 Composants électroniques utilisé dans les systèmes PV.....	26
II.9.1 Les IGBT.....	26
II.9.2. Les MOSFET.....	26
II.9.3 Thyristor GTO.....	26
II.10 l'onduleur de tension.....	26
II.10.1 Onduleurs modulaires.....	27
II.10.2 Onduleurs centralisés.....	27
II.10.3 Onduleurs "String".....	27
II.11 Conclusion.....	27

Chapitre III: Méthodes de diagnostic de défauts des systèmes photovoltaïque et leurs protections

III.1 Introduction.....	28
III.2 Défauts dans un système photovoltaïque.....	28
III.3 Différents défauts les plus fréquents rencontrés dans un système photovoltaïque et leurs conséquences.....	29
III.3.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque.....	30
III.3.2 Défauts dans la boîte de jonction.....	33
III.3.3 Défauts dans le système de câblage.....	33
III.3.4 Défauts dans le système de protection.....	35
III.3.5 Défauts de l'onduleur.....	36
III.3.6 Défauts dans le système d'acquisition des données.....	37
III.4 Système de protection.....	38

A. Diode de by-pass.....	38
B. Diode anti-retour.....	39
III.5 Méthodes de diagnostic d'un générateur PV.....	39
III.5.1 Méthodes utilisées dans l'industrie.....	39
A. Méthodes électriques.....	39
B. Méthodes non électriques.....	40
III.5.2 Méthodes utilisées dans littérature.....	41
A. Méthode de réflectométrie.....	41
B. Analyse de la puissance et de l'énergie produite.....	41
C. Analyse du point de fonctionnement.....	41
D. Analyse de la caractéristique statique.....	42
III.6 Conclusion.....	42

Chapitre IV : Tolérance aux défauts interrupteurs des convertisseurs DC/DC pour système photovoltaïque

IV.1 Introduction.....	44
IV.2 Synoptique d'un système photovoltaïque.....	45
IV.3 Simulation du fonctionnement du système PV.....	45
IV.3.1 Simulation du système PV en fonctionnement sain.....	46
IV.3.2 Simulation d'un système PV en fonctionnement défaillant.....	51
IV.3.2.1 Effet des défauts circuit-ouvert et court-circuit des interrupteurs (DC/DC).....	52
A- Effet de défaut circuit-ouvert.....	52
B- Effet de défaut court circuit.....	56
IV.4 Topologies tolérantes aux défauts des convertisseurs DC/DC pour les installations photovoltaïques.....	59
IV.4.1 Topologie boost classique non tolérante aux défauts.....	60
IV.4.2 Topologie tolérantes aux défauts.....	61
IV.4.2.1 Utilisation des convertisseurs à trois niveaux.....	61
IV.4.2.2 Utilisation des convertisseurs boost entrelacés à 2, 3, 4 phases.....	61
IV.5 Modélisation des convertisseurs tolérants aux défauts.....	63
IV.6 Application de la topologie entrelacée 3 phases pour une charge fixe.....	64
A- Cas de circuit-ouvert.....	64
B- Cas de court-circuit.....	65
IV.7 Méthode proposée pour l'isolation du défaut de type C-C.....	66
IV.8 Reconfiguration du système PV relié au réseau moyenne tension.....	70
IV.9 Conclusion.....	73

Conclusion générale et Perspectives.....	74
---	-----------

Bibliographie

Annexe

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur l'énergie photovoltaïque

Figure I.1: Répartition de l'énergie à travers le monde.....	3
Figure I.2: Principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire.....	4
Figure I.3: Relations géométriques entre la terre et le soleil.....	5
Figure I.4: Réponse spectrale d'une cellule PV.....	8
Figure I.5: Composantes du rayonnement solaire.....	9
Figure I.6: Structure basique d'une cellule solaire.....	9
Figure I.7: Panneau photovoltaïque.....	10
Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	11
Figure I.9: Installation photovoltaïque autonome.....	12
Figure I.10: Installation photovoltaïque couplée au réseau.....	12
Figure I.11: Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque.....	13

Chapitre II : Modélisation et caractérisation d'un système photovoltaïque

Figure II.1: Circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque.....	15
Figure II.2: Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle.....	16
Figure II.3: Circuit équivalent à double diodes d'une cellule photovoltaïque réelle.....	17
Figure II.4: Association de N_s modules solaires en série.....	18
Figure II.5: Caractéristique de variation du courant en fonction de la tension. (Cas de montage en série des cellules $N_s5 > N_s4 > N_s3 > N_s2 > N_s1$).....	19
Figure II.6: Caractéristique de variation de la puissance en fonction de la tension (Cas de montage en série des cellules $N_s5 > N_s4 > N_s3 > N_s2 > N_s1$).....	19
Figure II.7: Association de N_p modules solaires en parallèle.....	19
Figure II.8: Caractéristique de variation du courant en fonction de la tension (Cas de montage en parallèle des cellules $N_p5 > N_p4 > N_p3 > N_p2 > N_p1$).....	20
Figure II.9: Caractéristique de variation de la puissance en fonction de la tension (Cas de montage en parallèle des cellules $N_p5 > N_p4 > N_p3 > N_p2 > N_p1$).....	20
Figure II.10: Association mixte N_s et N_p modules solaires.....	20
Figure II.11: Caractéristique de variation du courant en fonction de la tension Cas de cellule en série et parallèle.....	21
Figure II.12: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	21
Figure II.13: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	21

Figure II.14: L'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$	22
Figure II.15: L'influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$	22
Figure II.16: Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension.....	23
Figure II.17: principe de base d'un hacheur.....	24
Figure II.18: Structure d'un hacheur Buck.....	25
Figure II.19: Structure d'un hacheur Boost.....	25
Figure II.20: Structure d'un hacheur buck-Boost.....	26
Figure II.21: Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC/AC).....	27

Chapitre III : Méthodes de diagnostic de défauts des systèmes photovoltaïque et leurs protections

Figure III.1: Synoptique électrique d'un système PV connecté au réseau.....	29
Figure III.2: Exemples de défauts rencontrés dans les générateurs photovoltaïques (Ombrage, Salissure).....	32
Figure III.3: Exemples de défauts rencontrés dans les boites de jonction.....	33
Figure III.4: Exemples de défauts rencontrés dans les câbles.....	35
Figure III.5: Exemples de défauts de diodes by-pass.....	36
Figure III.6: Module PV avec deux diodes de by-pass qui se chevauchent (overlapped) (a) Mode adjacent (b) mode overlapping.....	38
Figure III.7: Méthodes de diagnostic de défauts d'un générateur PV.....	39
Figure III.8: Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV.....	41
Figure III.9: Allure de la caractéristique I - V d'un champ PV en fonctionnement défaillant.....	42

Chapitre IV : Tolérance aux défauts interrupteurs des convertisseurs DC/DC pour système photovoltaïque

Figure IV.1: Synoptique d'un système photovoltaïque.....	45
Figure IV.2: Synoptique d'un système photovoltaïque série et parallèle.....	45
Figure IV.3: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté PV).....	47
Figure IV.4: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté convertisseur DC/DC).....	47
Figure IV.5: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté charge1).....	48
Figure IV.6: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté charge2).....	48
Figure IV.7: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté primaire du transformateur de puissance).....	49

Figure IV.8: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté primaire du transformateur de puissance).....	49
Figure IV.9: Puissance produite par le système PV et la puissance coté transformateur de puissance.....	50
Figure IV.10 : Synoptique d'un système photovoltaïque étudié pour le cas défauts.....	51
Figure IV.11: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté PV).....	52
Figure IV.12: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté convertisseur DC/DC).....	53
Figure IV.13: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (charge1).....	53
Figure IV.14: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (charge2).....	54
Figure IV.15: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté sortie onduleur).....	54
Figure IV.16: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté réseau).....	55
Figure IV.17: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté PV).....	56
Figure IV.18: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté convertisseur DC/DC).....	57
Figure IV.19: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (charge1).....	57
Figure IV.20: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (charge2).....	58
Figure IV.21: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté après onduleur).....	58
Figure IV.22: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté réseau).....	59
Figure IV.23: Architecture de la topologie boost.....	60
Figure IV.24: Convertisseur boost trois niveaux tolérant aux défauts pour un système photovoltaïque (PV).....	61
Figure IV.25: Convertisseur DC/DC boost avec l'inductance et diode placée sur le rail positive.....	61
Figure IV.26: Convertisseur DC/DC boost avec l'inductance et diode placée sur le rail négatif.....	61
Figure IV.27: Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé 2 phases.....	62
Figure IV.28: Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé 3 phases.....	62
Figure IV.29: Topologies de convertisseur DC/DC boost entrelacé 4 phases.....	63

Figure IV.30: Évolution des grandeurs électriques pendant de défaut C-O dans la phase 1.....	64
Figure IV.31: Évolution des grandeurs électriques pendant de défaut court-circuit dans la phase 1.....	66
Figure IV.32: Algorithme de la méthode de reconfiguration.....	67
Figure IV.33: Schéma de reconfiguration.....	67
Figure IV.34: Évolution des grandeurs électriques pendant le défaut C-C dans la phase 1.....	68
Figure IV.35: Évolution des grandeurs électriques pendant de défaut C-C dans la phase 2.....	69
Figure IV.36: Évolution des grandeurs électriques pendant le défaut C-C dans la phase 3.....	69
Figure IV.37: Évolution des grandeurs électrique pendant le défaut C-C dans la phase 1.....	71
Figure IV.38: Évolution des grandeurs électrique pendant le défaut C-C dans la phase 2.....	72
Figure IV.39: Évolution des grandeurs électrique pendant le défaut C-C dans la phase 3.....	73

Liste des tableaux

Tableau.III.1: Défaits et leurs conséquences dans un générateur.....	32
Tableau.III.2: Les défauts dans la boîte de jonction.....	33
Tableau.III.3: Les défauts dans le système de câblage.....	34
Tableau III.4: Les défauts dans le système de protection.....	35
Tableau.III.5: Les défauts de l'onduleur.....	36
Tableau.III.6: Les défauts du système d'acquisition des données.....	37
Tableau IV.1: Caractéristiques des composants de la chaîne de conversion du système PV.....	46
Tableau IV.2: Bilant énergétique du système étudié.....	51
Tableau IV.3: Caractéristiques des charges du système PV.....	51
Tableau IV.4: Temps de détection et de reconfiguration de défaut C-C.....	73

Notions et Symboles

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

UV : Ultra violet.

IR : Infra rouge.

CC : Courant continue (DC : Direct Curent).

CA : Courant alternatif (AC : Alternative Curent).

Ns : Nombre de cellule en série.

Np : Nombre de cellule en parallèle.

MPP : Point de puissance maximale.

FF : Facteur de forme.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolé).

MOSFET : Transistor à effet de champ d'oxyde de métal (FET : Field Effect Transistor).

GTO : Gate-Turn-Off Thyristor.

D : Diode.

L : Inductance.

C : Capacité.

K1 : Interrupteur.

MPPT : Maximum Power Point Tracking (pour suite du point de puissance maximale).

C : Conception.

I : Installation.

E : Exploitation.

C-O : Circuit ouvert.

C-C : Court-circuit.

Symboles

δ : Déclinaison solaire.

H : Angle horaire du soleil.

λ : La longitude d'un lieu.

φ : L'angle de latitude.

α : L'orientation.

β : L'inclinaison.

I_{pv} : Le courant de sortie de la cellule.

V_p : Tension de sortie de la cellule.

I_{ph} : Le courant photonique.

I_s : courant de saturation inverse de la diode modélisé par l'équation suivant

T : La température absolue en Kelvin.

q : La constante de charge d'électron, $q=1.602 \cdot 10^{-23}$ C.

K : La constante de Boltzmann, $K= 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

V_t : La potentielle thermodynamique.

n : Le facteur de pureté de la diode.

R_s : La résistance série.

R_{sh} : La résistance parallèle.

I_{ph} : Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule.

I_o : Courant de saturation inverse de la diode.

V_t : Tension thermique de la diode. Elle dépend de température de la cellule T_c .

k : Coefficient de réglage de Bishop.

n : Coefficient de réglage de Bishop.

V_b : Tension de claquage de la cellule.

I_{cc} : Le courant de court circuit.

V_{co} : La tension de circuit ouvert.

I_m : Courant maximal.

V_m : Tension maximal.

P_{mpp} : Puissance maximal extraite du PV.

η : Rendement énergétique.

Introduction générale

Aujourd'hui, les énergies renouvelables deviennent progressivement des énergies à part entière, rivalisant avec les énergies fossiles du point de vue coût et performance de production. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables : l'énergie solaire ou photovoltaïque, l'énergie éolienne, la biomasse ...etc.

Le marché du photovoltaïque est celui qui a connu la croissance la plus élevée ses dix dernières années, grâce aux différents facteurs stimulants : politiques de soutien mondiale, absence de pollution, absence de bruit, facilité d'installation, et courte période de construction. Cette croissance, et aussi due principalement aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution d'électricité, qui se traduisent par d'importantes innovations technologiques, et une baisse de coût des modules photovoltaïques mais aussi à des efforts importants de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance et de l'informatique.

Dans les grandes installations, une station solaire PV peut comprendre des centaines voir des milliers de panneaux photovoltaïques, ou la stabilité et la qualité d'énergie générée sont en corrélation avec l'état de fonctionnement de chaque composant. Le défi soulevé, dans ce type d'installation, est comment surveiller l'immense réseau de cellules photovoltaïques afin de maintenir le bon fonctionnement de la station PV.

Malgré les nombreux avantages que présentent les systèmes photovoltaïques il présente également quelques inconvénients. On notera parmi ses inconvénients la sensibilité aux différents défauts et anomalies au cours de son fonctionnement. Aussi, ces derniers peuvent conduire à une baisse de la performance du système et voire à son indisponibilité totale.

Le système photovoltaïque raccordé au réseau électrique moyenne tension a besoin d'un ensemble des équipements importants pour assurer une meilleure adaptation des grandeurs électriques aux consommateurs ou au raccordement vers le réseau électrique.

Les convertisseurs de puissance DC/DC sont considérés parmi les composants les plus sensibles aux défauts électriques et mécaniques dans la chaîne de conversion.

La présence d'un défaut dans cette chaîne de conversion conduit à des dysfonctionnements et ainsi réduire les performances dans le système PV.

Ce travail de PFE se focalise principalement sur la détection et la localisation des défauts interrupteurs d'électronique de puissance dans les convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes PV raccordés au réseau électrique et ainsi de présenté une topologie tolérante aux défauts de types circuit-ouvert et court-circuit de ces convertisseurs.

Pour mener à bien notre travail, nous l'avons réparti en quatre chapitres selon les étapes suivantes :

- **Chapitre I** est donné un aperçu général sur l'énergie photovoltaïque et sa conversion en énergie électrique, puis nous avons décrit ses différents composants, à la fin nous avons exposé les avantages et les inconvénients de ce type d'installation.
- **Chapitre II** dans la première partie de ce chapitre on traitera la modélisation d'un système photovoltaïque et ses caractéristiques, ainsi que l'influence des paramètres température et Irradiation sur la production énergétique des PV, la deuxième partie sera consacrée à la description des composants de l'électronique de puissance vu l'importance de leurs rôle dans les installations photovoltaïque.
- **Chapitre III** est dédié à la présentation des défauts et anomalies qui peuvent apparaître dans les installations photovoltaïques, et la description des éléments de protection, et les méthodes de diagnostic utilisées pour la localisation et la détection des défauts.
- **Chapitre IV** est consacré à l'étude des topologies des convertisseurs DC/DC et un focus est fait sur la topologie entrelacée tolérante aux défauts circuit-ouvert et court-circuit des interrupteurs. Aussi la topologie proposée a été validée par simulation numérique dans l'objectif de vérifier ses performances à la présence des défauts interrupteurs.

Ce travail sera bien évidemment finalisé par une conclusion générale suivi des perspectives à envisager dans le but d'améliorer ce travail.

Chapitre I

Généralité sur l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles [1].

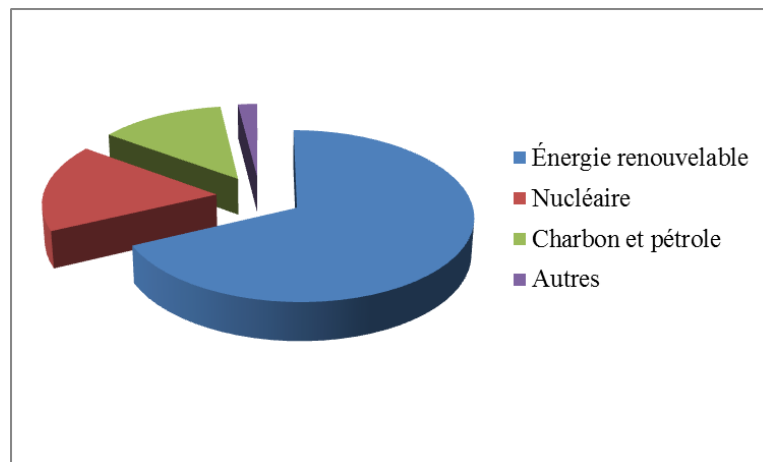


Figure I.1: Répartition de l'énergie à travers le monde

L'augmentation du coût des énergies fossiles d'un côté et la limitation de ses ressources de l'autre côté a conduit à l'apparition d'autres formes d'énergie dites énergies renouvelables comme une solution prometteuse parmi d'autres [2].

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée et se sont des énergies non polluantes se qui encourage leurs développement [1], [2].

Dans ce chapitre nous nous intéresserons plus particulièrement à l'étude des caractéristiques de l'énergie solaire.

I.2 Historique sur l'énergie solaire

La transformation de la lumière du soleil en énergie électrique date de 1839. Elle a été découverte par Antoine-César Becquerel au XIX^e siècle, quelques moteurs à miroirs ont été construits. Mais même malgré la découverte de l'effet du sélénium photovoltaïque en 1877 il faudra attendre jusqu'en 1955 que les chercheurs de Bell Telephone Laboratories (aux Etats-Unis) soient capables de produire la cellule qui avait le rendement de conversion énergétique au moins 6%(ratio entre l'énergie utilisée pendant la fabrication et l'énergie que le système soit capable de produire). Enfin pour pouvoir annoncer la naissance de la photopile solaire. Cet effet a surtout été utilisé pendant les exploitations dans l'univers qui elles aussi commençaient à se développer. Mais en exploitant toujours de plus en plus le charbon, le pétrole et développant l'énergie nucléaire les industriels ne se sont pas sérieusement intéressés aux possibilités de l'énergie solaire avant la crise pétrolière de 1973. Les années 70 peuvent être considérées comme le berceau de l'énergie solaire (photovoltaïque) [3].

I.3 l'énergie solaire

Décrit par le physicien français Antoine Becquerel l'effet photovoltaïque est simple dans son principe. Les panneaux solaires se composent de photopiles constituées de silicium, un matériau semi-conducteur qui abrite donc des électrons. Excités par les rayons du soleil, les électrons entrent en mouvement et produisent de l'électricité [4].



Figure I.2: Principe de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire

I.3.1 Le soleil

L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14×10^5 km de diamètre, sa masse est de l'ordre de 2×10^{30} kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments. Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [5].

I.3.2 Aspect géométrique

La terre décrit un tour complet autour de son axe en approximativement 24 heures. La caractéristique la plus importante de cette rotation est le fait que son axe de rotation est incliné de $23^{\circ}27'$ par rapport au plan de l'elliptique. Cette inclinaison fait que le jour et la nuit n'ont pas une durée identique en différents points de la terre et c'est à elle que l'on doit les 4 saisons [6].

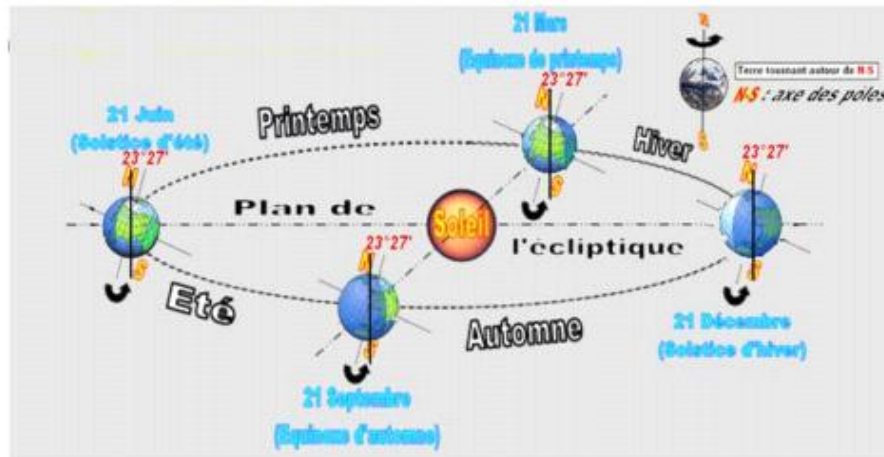


Figure I.3: Relations géométriques entre la terre et le soleil

I.3.2.1 Coordonnées du soleil

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

A. Coordonnées équatorial

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles.

Déclinaison solaire (δ)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation

$$\delta = \text{Arcsin} \left[0.389 \times \sin \left[\frac{360}{365} (J - 82) + 2 \times \sin \frac{360}{365} (J - 2) \right] \right] \quad (\text{I.1})$$

J : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c.-à-d. varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année.

Angle horaire du soleil H

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu,

l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation suivante :

$$H = 15(TSV - 12) \quad (I.2)$$

avec :
$$TSV = TL - TU + \left(\frac{\Delta t + \Delta \lambda}{60}\right) = TL - \left(TU - \frac{\lambda}{15}\right) + \frac{\Delta t}{60} \quad (I.3)$$

$$\Delta t = 9.87 \times \sin^2\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) - 7.35 \times \cos\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) - 1.5 \times \sin\left(\frac{360}{365}(J - 81)\right) \quad (I.4)$$

TU : Temps universel : est le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

Pour l'Algérie : TU = +1.

TL : Temps légal : temps donné par une montre.

Δt : correction de l'équation du temps.

B. Coordonnées horizontales du soleil

La position du soleil à un instant considéré est donnée par l'azimut du soleil a et son élévation h .

Azimut (a)

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction du Sud. L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \times \sin H}{\cos h} \quad (I.5)$$

a : varie entre -180° et 180° .

On prend

$a > 0$: vers l'ouest.

$a < 0$: vers l'est.

$a = 0$: direction du sud.

Hauteur (h)

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan d'horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante

$$\sin h = \cos \delta \times \cos \varphi \times \cos H + \sin \varphi \times \sin \delta \quad (I.6)$$

La hauteur du soleil varie entre -90° et $+90^\circ$.

- $h = 0$ aux lever et coucher,

- $h > 0$ le jour.

- $h < 0$ la nuit.

I.3.2.2 Coordonnées terrestres

Tout point sur la surface terrestre peut être repéré par ses coordonnées géographiques qui sont la longitude, la latitude, ainsi que par son altitude.

- **Longitude** : La longitude (λ) d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude d'un lieu peut être comprise entre -180 et 180° . A tout écart de 1° de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps. On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'Ouest.
- **Altitude** : L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer).
- **Latitude** : L'angle (φ) de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur et est indiquée en tant que latitude de 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° . Par convention, le signe (+) est affecté à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude d'un lieu peut être comprise entre -90° et $+90^\circ$.

I.3.2.3 Orientation et inclinaison d'une surface

- **Azimute α** : C'est l'angle que fait la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction du Sud et il désigne l'orientation de la surface de telle sorte que
 - $\alpha = -90^\circ$ pour une orientation Est
 - $\alpha = 0$ pour une orientation Sud
 - $\alpha = 90^\circ$ pour une orientation Ouest
 - $\alpha = 180^\circ$ pour une orientation Nord
- **Angle d'inclinaison β** : C'est l'angle que fait la surface avec le plan horizontal. L'inclinaison de la surface est désignée par la variable β , choisie de telle sorte que
 - $\beta = 0$ pour une surface horizontale
 - $\beta = 90^\circ$ pour un plan vertical
 - $\beta = 180^\circ$ pour un plan horizontal tourné vers le bas [7].

I.3.3 Le rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie

quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm [4], l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit

9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4\mu\text{m}$)

47 % dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$).

44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8\mu\text{m}$) [8].

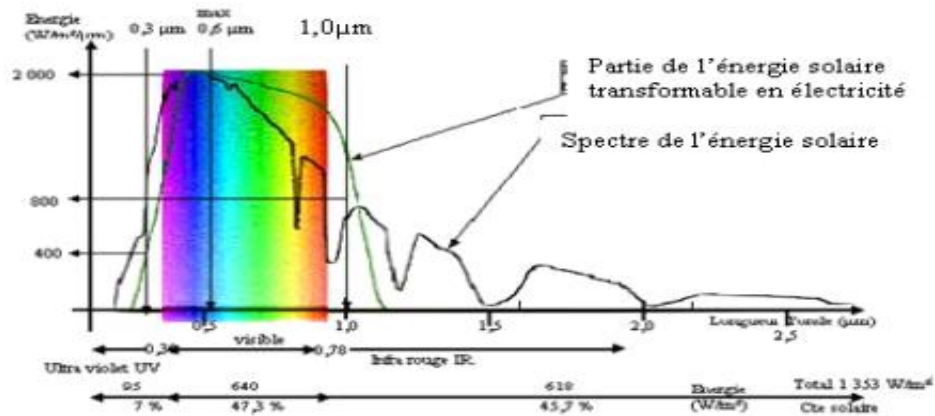


Figure I.4: Réponse spectrale d'une cellule PV

I.3.3.1 Les différents types de rayonnement

a) Rayonnement direct : Le rayonnement direct est reçu directement du soleil, sans diffusion de l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peuvent par des modules être concentré et être mesuré par un pyheliometre.

b) Rayonnement diffus : C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable ...).

c) Rayonnement solaire réfléchi : L'albédo est la partie réfléchi par le sol. Il dépend de l'environnement du site. Il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur le plan incliné.

d) Le rayonnement global : Le rayonnement global désigne l'intensité globale de flux solaire sur une surface réceptrice. $RG = RD + Rd$ [9].

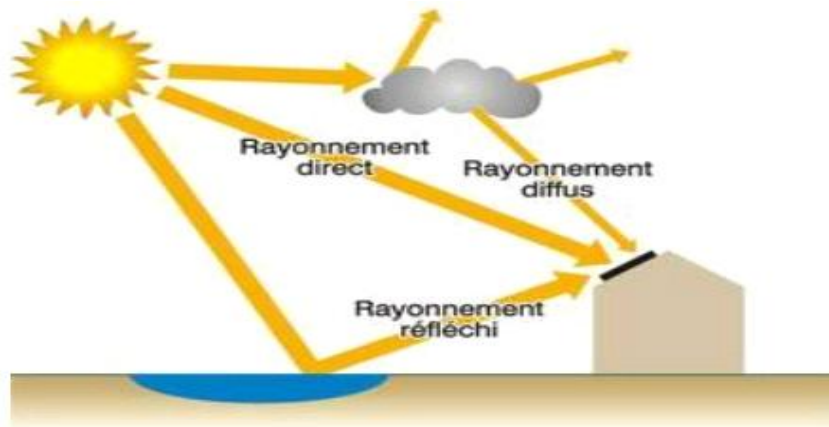


Figure I.5: Composantes du rayonnement solaire

I.4 Les composants d'un système photovoltaïque

I.4.1 La cellule PV

Une cellule photovoltaïque est constituée par un matériau semi-conducteur de type P-N. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm^2 ou plus. Sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries. Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être reprise par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V [4].

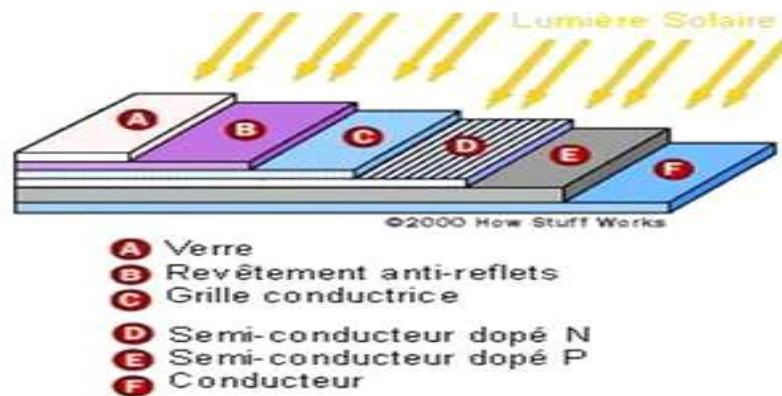


Figure I.6: Structure basique d'une cellule solaire

I.4.2 Le module PV

Un module PV est le plus petit ensemble de cellules solaires interconnectées et complètement protégées contre l'environnement. Généralement il contient également des protections pour protéger les cellules PV d'un fonctionnement qui peut être destructif. Les connexions peuvent être réalisées en parallèle ou en série. Nous allons présenter le comportement de cellules PV lors de ces différentes connexions [10].

I.4.3 Le panneau photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique (courant continu CC). On parle aussi de modules photovoltaïques. Ils sont composés de cellules photovoltaïques encapsulées dans un support souple ou rigide. On les distingue généralement par la technologie de cellules dont ils sont composés

- Panneaux au silicium cristallin (monocristallins ou polycristallins)
- Panneaux au silicium amorphe
- Panneaux multi-jonctions

Les panneaux sont en général reliés en série entre eux de façon à augmenter la tension du système, puis ces séries de panneaux sont reliées entre elles en parallèles de façon à augmenter le courant. Ces groupes de chaînes sont ensuite connectés à un chargeur DC/DC et à des batteries, ou à un onduleur pour convertir directement l'énergie continue en courant alternatif pour l'usage courant [11].



Figure I.7: Panneau photovoltaïque

I.4.4 Le Générateur PV et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [4].

I.5. Description du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsque le soleil frappe une cellule photovoltaïque, les photons de la lumière transmettent leurs énergies aux électrons qui sont arrachés des atomes dans lesquelles ils laissent des trous. Les électrons et les trous ainsi formés vont avoir tendance à se recombiner, mais lorsque le phénomène a lieu dans un voisinage de la jonction PN le champ électrique va au contraire contribuer à séparer les charges positives et négatives, les électrons sont repoussés vers la couche

N et les trous vers la couche P.

Les électrons cherchant à se recombiner avec les trous sont alors obligés de passer par un circuit extérieur pour rejoindre les trous créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle le photo courant. Les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN que l'on appelle la photo tension. Le produit des deux correspond à la puissance électrique délivrée par la cellule qui convertit directement une partie de l'énergie lumineuse en énergie électrique [5].

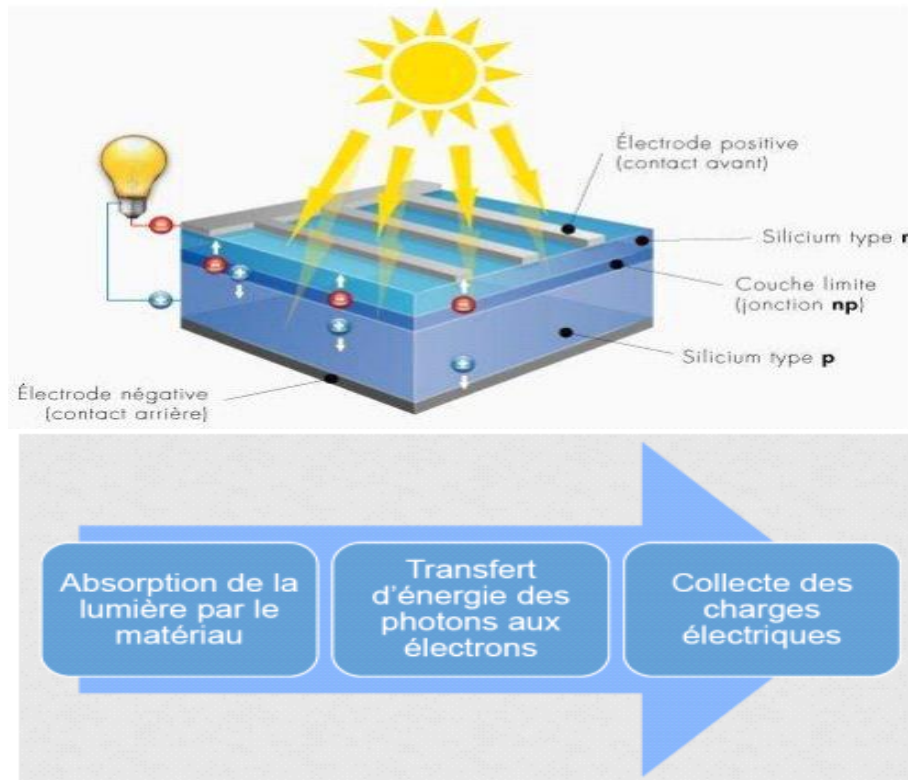


Figure I.8: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.6. Mode de fonctionnement d'un système photovoltaïque

On distingue trois modes d'exploitation d'un panneau PV : autonome, connecté au réseau et hybride.

I.6.1 Système PV autonome

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

- ✓ Un ou plusieurs modules PV.
- ✓ Le système de régulation.

- ✓ Une ou plusieurs batteries.
- ✓ L'onduleur.

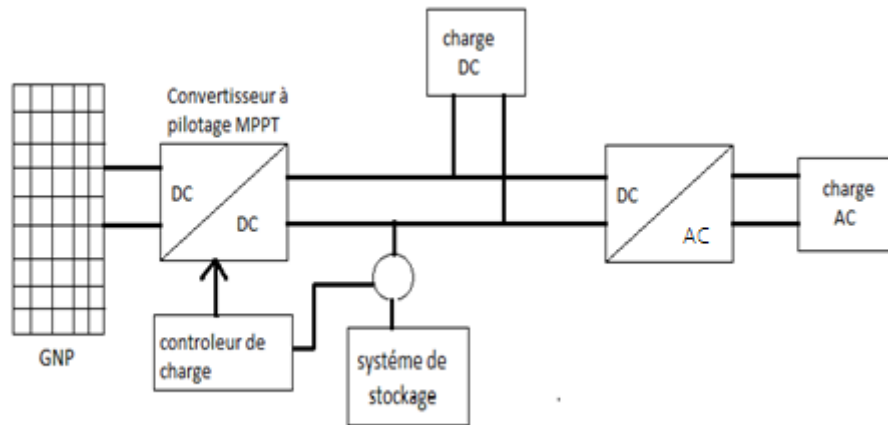


Figure I.9: Installation photovoltaïque autonome

I.6.2 Système PV connecté directement au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau permettent la décentralisation de la production sur ce réseau électrique (Figure I.9). L'énergie est produite plus près des lieux de consommation et pas seulement par de grandes centrales nucléaires, thermiques ou hydroélectriques. Au fil du temps, les systèmes PV connectés au réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution en ayant besoin d'acheminer uniquement son excédent d'énergie vers les zones en manque de production. Cette mise en commun des productions permet aussi un sous-dimensionnement des équipements de production complémentaire. Ces transferts éliminent la nécessité d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau [12].

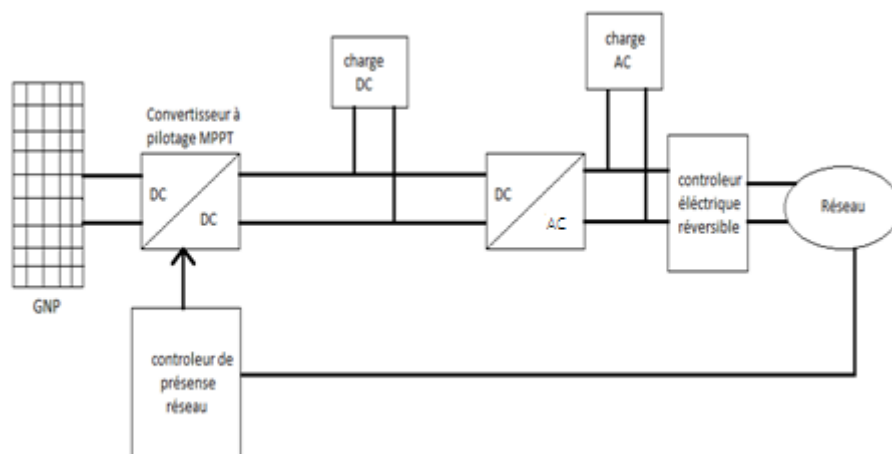


Figure I.10: Installation photovoltaïque couplée au réseau

I.6.3 Mode hybride

Un système d'énergie hybride comporte plus qu'une source d'électricité tel que les panneaux photovoltaïques, les cellules à combustible, les générateurs éoliens, les batteries de stockage, les groupes électrogènes, etc. Ce type d'installation est utilisé pour l'électrification des régions loin du réseau. Il existe plusieurs configurations de ces systèmes : PV/thermique, PV/batterie, PV/cellules à combustible, PV/éolienne/batterie, PV/éolienne, PV/groupe électrogène. Le choix se base essentiellement selon les caractéristiques météorologiques du site d'implantation [13].

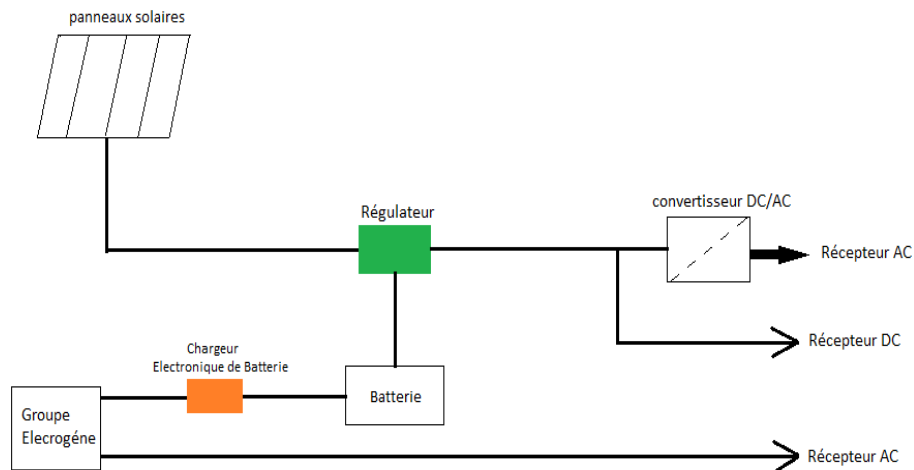


Figure I.11: Systèmes d'alimentation autonome hybride Photovoltaïque

I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

I.7.1 Avantages

Les avantages des systèmes photovoltaïques sont :

- ✓ Ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ✓ Ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ✓ Ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- ✓ Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité des systèmes énergétiques.
- ✓ Ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ✓ Ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- ✓ Une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins

spatiaux.

- ✓ Le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du Milliwatt au Mégawatt.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ✓ Ils ont une longue durée de vie.
- ✓ Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

I.7.2 Inconvénients

Comme tous systèmes possédant des avantages les systèmes PV possèdent aussi des inconvénients [8] :

- ✓ La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- ✓ Le rendement réel d'un module photovoltaïque est de l'ordre de 10 à 15 %,.
- ✓ Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- ✓ L'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue et de faible voltage $< 30V$ donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- ✓ Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec du 230 V alternatif.

I.8 conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art sur l'énergie solaire a été présenté. Tout d'abord nous avons discuté sur les ressources solaires et la possibilité de convertir le rayonnement solaire en électricité, grâce à l'effet photovoltaïque. Nous avons décrit les éléments constitutifs du système et nous avons cité les avantages et les inconvénients de ce dernier.

Chapitre II

Modélisation et caractérisation d'un système photovoltaïque

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant de photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant-tension $I(V)$ non linéaire. Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. Le point de fonctionnement du GPV peut donc varier entre les points extrêmes correspondant au courant de court-circuit I_{cc} et la tension en circuit ouvert V_{oc} . Dans ce chapitre nous nous intéresserons à la détermination des composants importants installés dans les systèmes PV et de démontrer l'impact de la variation de la température et l'irradiation sur les caractéristiques de ces systèmes.

II.2 La cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

II.2.1 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire idéale

Le Schéma du circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque est représenté dans la figure suivante [14].

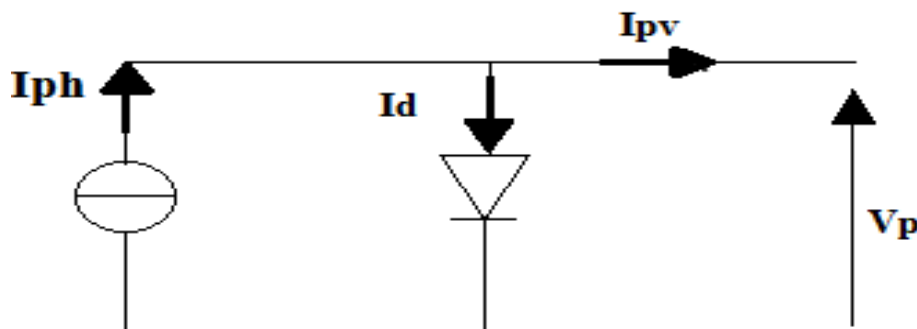


Figure II.1: Circuit équivalent simplifié d'une cellule photovoltaïque

En appliquant la loi de Kirchhoff sur ce circuit on obtient le modèle mathématique suivant:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV_p}{2KT}} - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

avec : I_{pv} : Le courant de sortie de la cellule.

V_p : Tension de sortie de la cellule.

I_{ph} : Le courant photonique.

I_s : courant de saturation inverse de la diode modélisé par l'équation suivant :

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV_p}{2KT}} - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

avec T : La température absolue en Kelvin.

q : La constante de charge d'électron, $q=1.602 \cdot 10^{-19}$ C.

K : La constante de Boltzmann, $K= 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

II.2.2 Circuit équivalent et modèle mathématique d'une cellule solaire réelle

II.2.2.1 Modèle a diode unique

Il existe plusieurs modèles qui ont été proposés pour représenter une cellule PV. Parmi eux, le modèle à une diode a été largement utilisé grâce à sa simplicité et sa précision convenable pour la plupart des applications.

Ce modèle contient une source de courant (I_{ph}) qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule et une diode pour modéliser la jonction PN de la cellule. La résistance série (R_s) et la résistance shunt (R_{sh}) représente l'état non idéal de la cellule. La résistance série représente la résistivité du matériau dans lequel est fabriquée la cellule, la résistance de contact entre métal et semi-conducteur et la résistance d'interconnexion entre cellules. La résistance parallèle représente tous les chemins traversés par le courant de fuite, que ce soit en parallèle de la cellule ou au bord d'elle-même. Il résulte généralement des dommages dans le cristal ou d'impuretés dans ou à côté de la jonction [15].

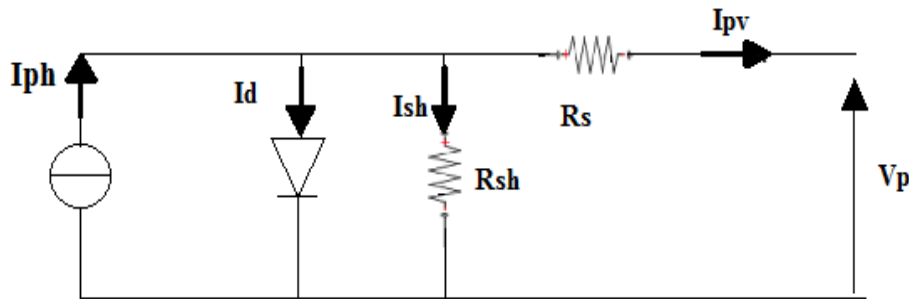


Figure II.2: Circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque réelle

La figure II.2 est une représentation du circuit équivalent pour une cellule photovoltaïque avec une seule diode, d'où on peut écrire l'équation suivant [16], [17].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.3)$$

avec:
$$I_d = I_s \left[e^{\frac{q(V_p + I_{pv} \times R_s)}{nKT}} - 1 \right] \quad (II.4)$$

$$I_{sh} = \frac{(V_p + I_{pv} \times R_s)}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

donc
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{q(V_p + I_{pv} \times R_s)}{nKT}} - 1 \right] - \frac{(V_p + I_{pv} \times R_s)}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

avec : V_t = La potentielle thermodynamique.

n : Le facteur de pureté de la diode.

R_s et R_{sh} : Sont respectivement la résistance série et la résistance parallèle.

II.2.2.2 Modèle a double diode (Bishop)

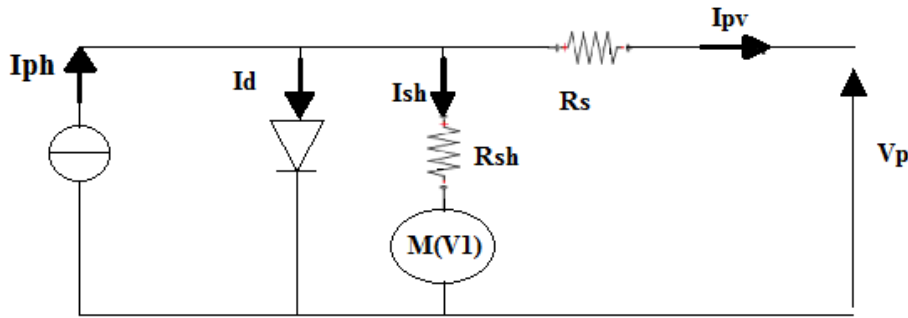


Figure II.3: Circuit équivalent à double diodes d'une cellule photovoltaïque réelle

L'effet d'avalanche de la cellule est pris en considération dans le modèle de Bishop en ajoutant au modèle à une diode un multiplicateur non linéaire $M(V1)$ en série avec la résistance shunt comme on peut le voir dans la figure II.3. Ce multiplicateur correspond au dernier terme de l'équation (II.3) qui donne la relation entre le courant (I_{pv}) et la tension (V_{pv}) d'une cellule PV [15].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{(V_p + R_s \times I_o)}{V_t}} - 1 \right] - \frac{(V_p + I_{pv} \times R_s)}{R_{sh}} \left[1 + k \left(1 - \frac{V_p + R_s \times I_{pv}}{V_b} \right) \right] n \quad (II.7)$$

$$V_t = \frac{akbTc}{q} \quad (II.8)$$

C'est une équation à 2 inconnues (I et V) et 8 paramètres. Ces paramètres sont :

- I_{ph} : Courant équivalent proportionnel à l'ensoleillement reçu par la cellule.
- I_o : Courant de saturation inverse de la diode.

- V_t : Tension thermique de la diode. Elle dépend de température de la cellule T_c . Tandis que a , k_b et q sont respectivement le facteur d'idéalité de diode (1 à 2), la constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$) et la charge de l'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
- R_s : Résistance série de la cellule.
- R_{sh} : Résistance shunt de la cellule.
- k : Coefficient de réglage de Bishop (3.4 à 4).
- n : Coefficient de réglage de Bishop (~ 0.1).
- V_b : Tension de claquage de la cellule (-10 V à -30 V).

II.3 Association des cellules solaires photovoltaïques

La cellule photovoltaïque ne produit qu'une très faible puissance électrique de l'ordre de 1 à 3 watt avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque. Un module de 36 cellules en série est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant.

II.3.1 L'association série des cellules PV

L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [18].

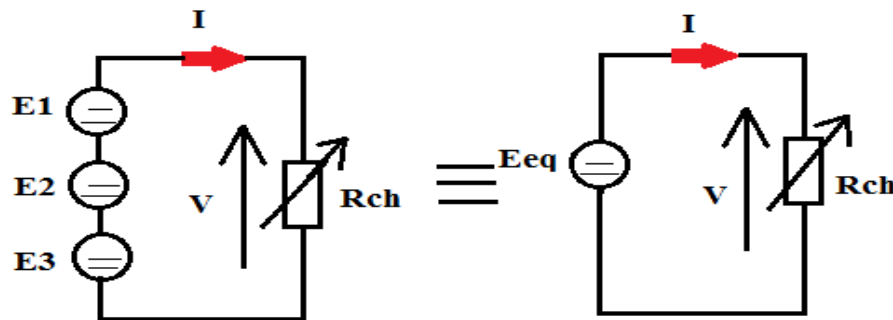


Figure II.4: Association de N_s modules solaires en série

La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

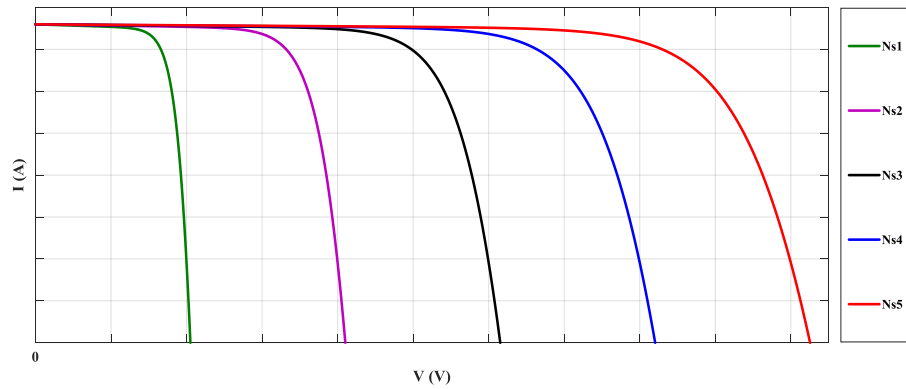


Figure II.5: Caractéristique de variation du courant en fonction de la tension
(Cas de montage en série des cellules $N_{S5} > N_{S4} > N_{S3} > N_{S2} > N_{S1}$)

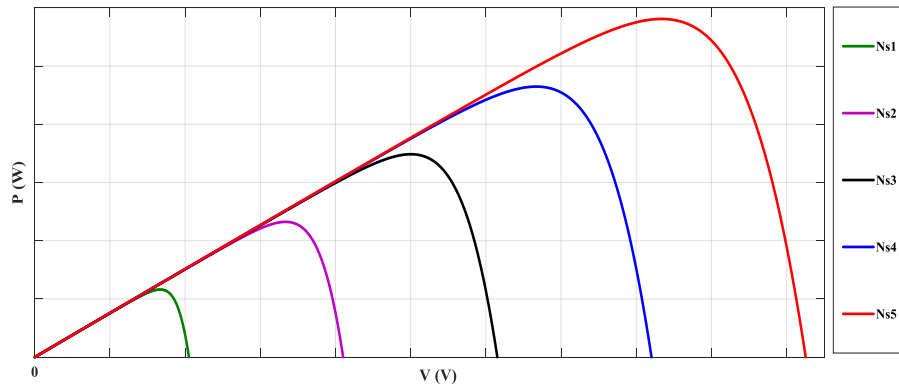


Figure II.6: Caractéristique de variation de la puissance en fonction de la tension
(Cas de montage en série des cellules $N_{S5} > N_{S4} > N_{S3} > N_{S2} > N_{S1}$)

II.3.2 L'association parallèle des cellules PV

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule

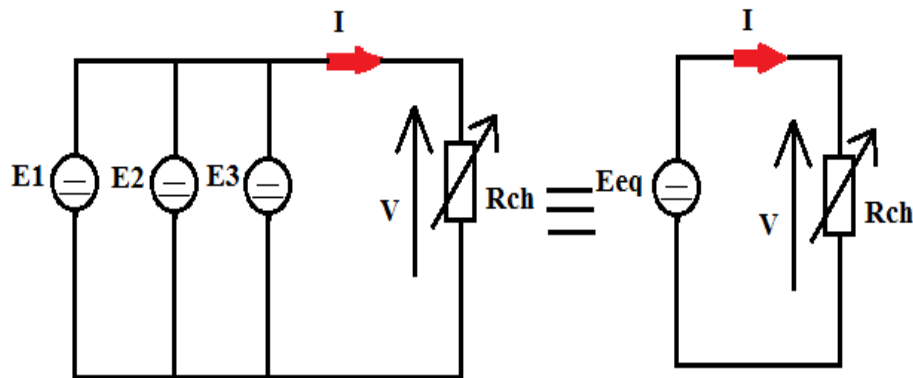


Figure II.7: Association de N_P modules solaires en parallèle

La caractéristique d'un groupement de N_P modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

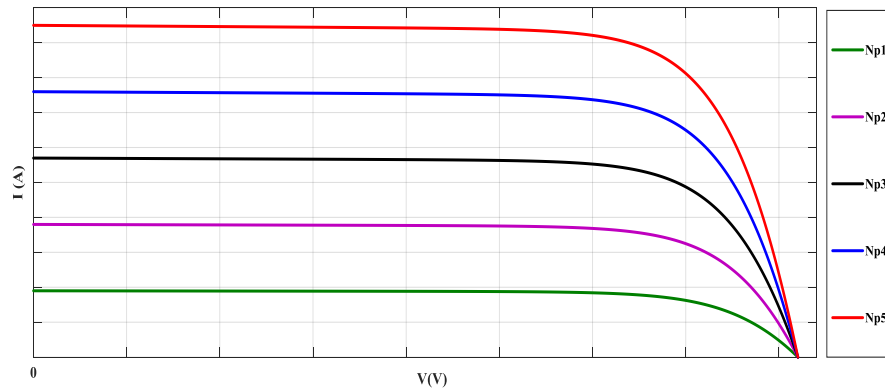


Figure II.8: Caractéristique de variation du courant en fonction de la tension
(Cas de montage en parallèle des cellules $N_{P5} > N_{P4} > N_{P3} > N_{P2} > N_{P1}$)

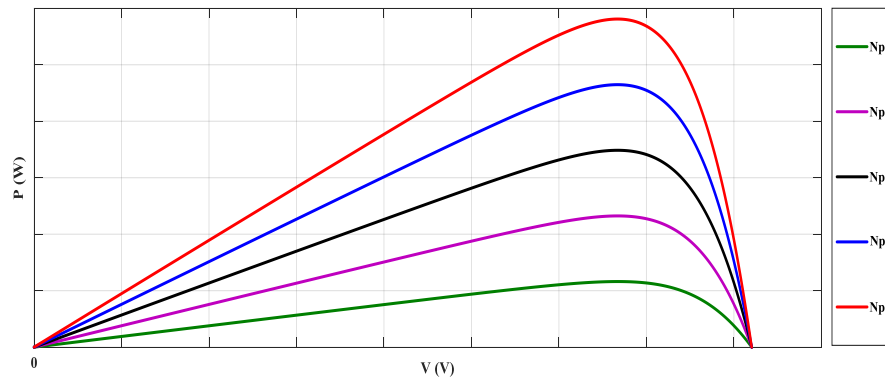


Figure II.9: Caractéristique de variation de la puissance en fonction de la tension
(Cas de montage en parallèle des cellules $N_{P5} > N_{P4} > N_{P3} > N_{P2} > N_{P1}$)

II.3.3 L'association mixte des cellules PV

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire Série-Parallèle.

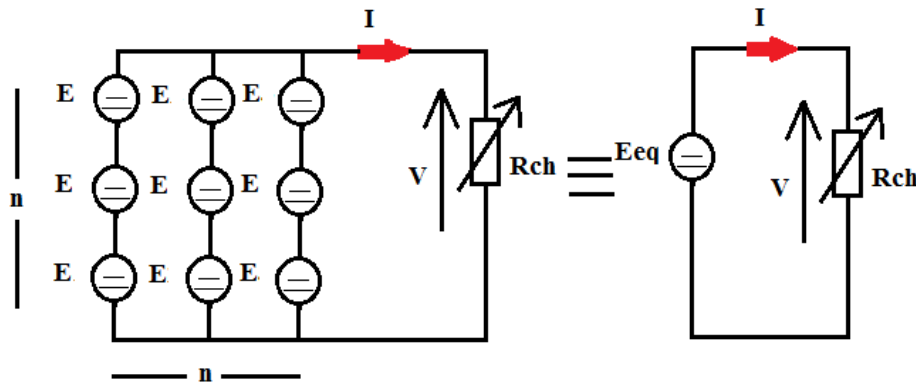


Figure II.10: Association mixte N_S et N_P modules solaires

La caractéristique d'un groupement de N_S et N_P modules solaires est représentée par la figure suivante :

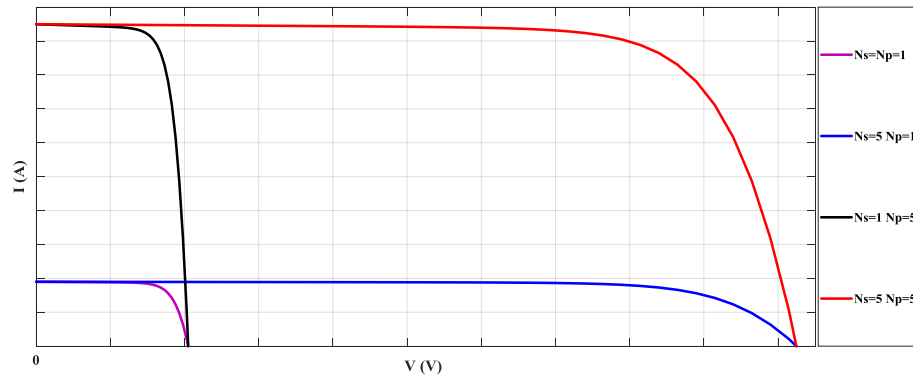


Figure II.11: Caractéristique de variation du courant en fonction de la tension.
Cas de cellule en série et parallèle

II.4 Influence de l'éclairement

L'énergie électrique produite par une cellule dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure (II.12) représente la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$) d'une cellule en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes [18]. En faisant varier l'éclairement entre [1000 700 500 250] W/m² avec un pas de 250 W/m², on remarque que la valeur du courant de court circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert varie légèrement (faible variation).

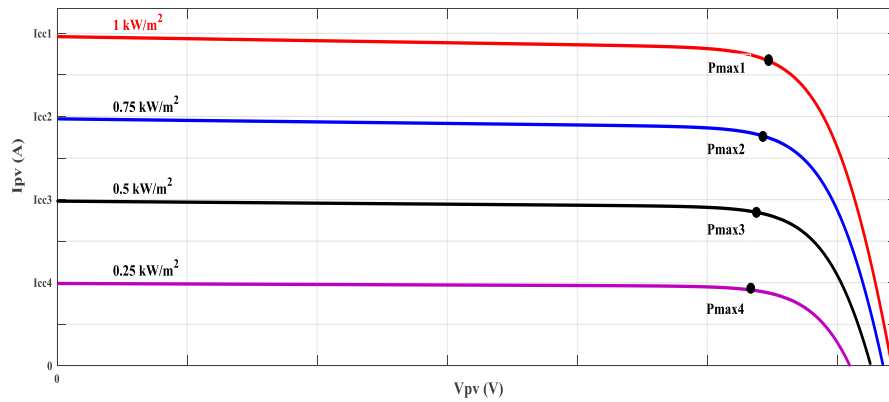


Figure II.12: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

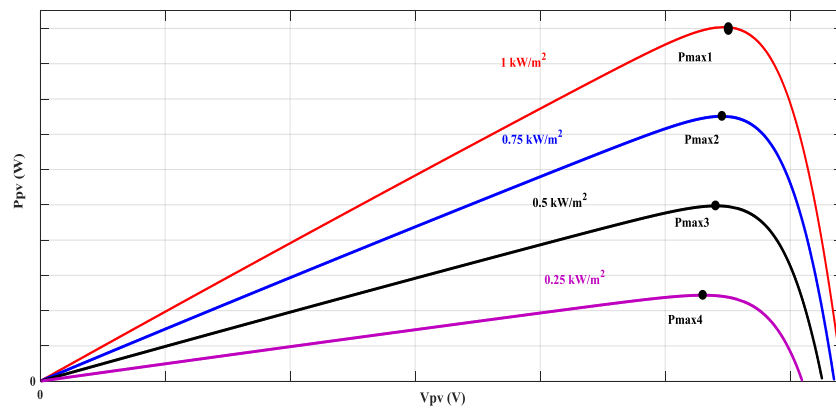


Figure II.13: L'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

L'effet de l'éclairement sur la puissance développée par le système PV est aussi proportionnelle aux variations de l'éclairement et le point max de la puissance a une valeur importante dans le cas où l'éclairement est maximal ($P_{max1} > P_{max2} > P_{max3} > P_{max4}$).

II.5 Influence de la température

La figure II.14 représente la caractéristique ($I_{pv}=f(V_{pv})$). Pour une variation de température comprise entre $[0^\circ \text{ } 25^\circ \text{ } 50^\circ \text{ } 75^\circ]$ avec un pas de 25° on remarque que le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, contrairement à la tension qui diminue en augmentant la température.

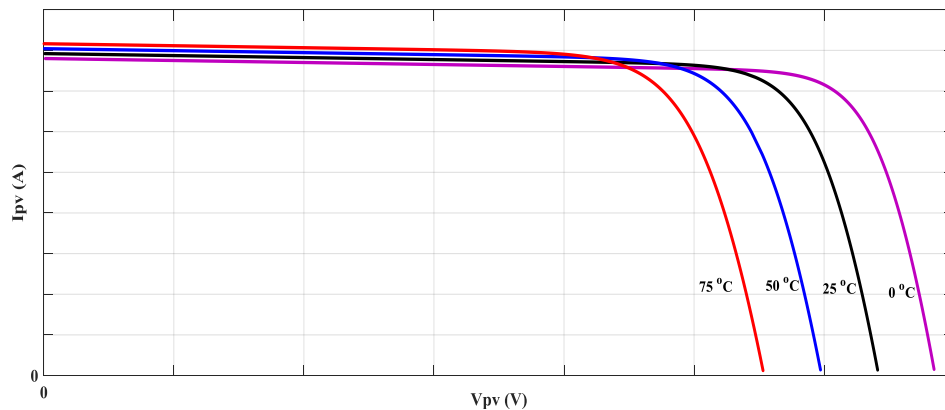


Figure II.14: L'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

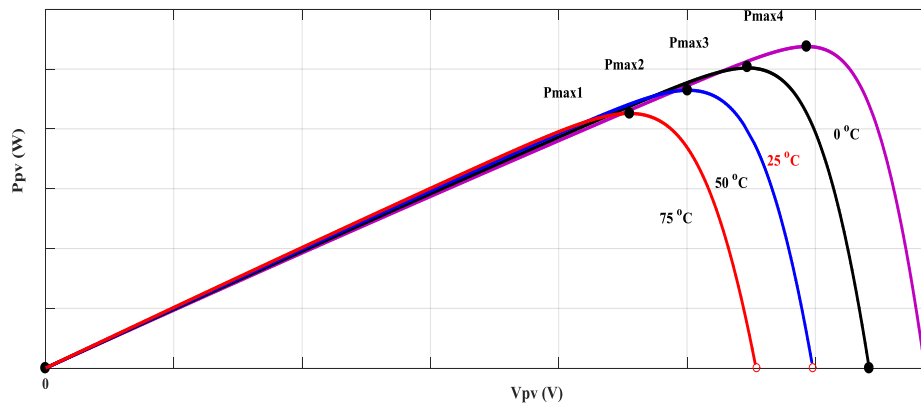


Figure II.15: L'influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$

L'augmentant de la température conduit à une diminution de la puissance ainsi que celle de la tension.

II.6 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque

On appelle caractéristique courant tension $I_{pv}(V_{pv})$, la courbe représentant la variation du courant I en fonction de la tension V aux bornes de la cellule. Les grandeurs caractéristiques suivantes peuvent être extraites de la figure II.16.

- Le courant de court circuit I_{cc} .

- La tension de circuit ouvert V_{co} .
- Le courant I_m et la tension V_m tels que le produit des deux soit maximal
- Le point de puissance maximale (MPP)

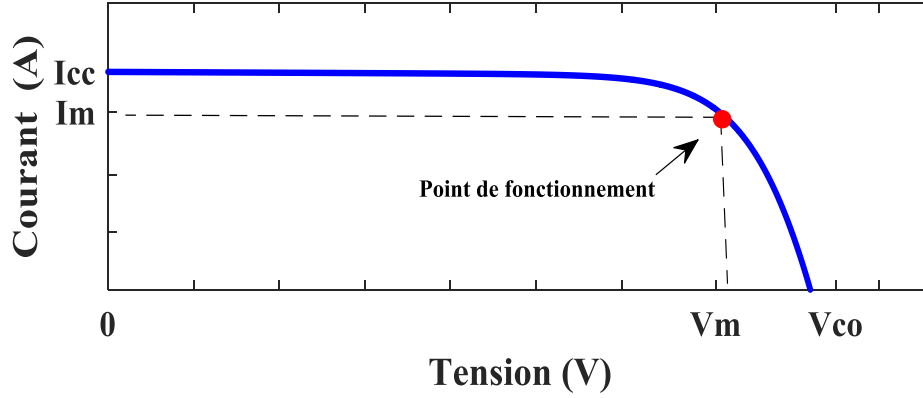


Figure II.16: Puissance maximale sur une caractéristique courant-tension

La cellule solaire fournit des capacités différentes selon le point de fonctionnement dans lequel elle est utilisée. Le point où la puissance maximale est prévue, est appelé le point de puissance maximale (MPP). Comme la puissance d'un point de fonctionnement correspond toujours à la surface $V \times I$, cette zone doit être au maximum dans le cas de MPP. Ce cas est représenté dans la figure précédente où les valeurs du courant et de la tension associée au MPP sont appelés I_m et V_m .

$$P_{mpp} = V_m \times I_m \quad (II.9)$$

Nous constatons que plus la courbe est carrée, la puissance maximale est élevée. On mesure cette propriété par le facteur de forme (fill factor) définie comme suit :

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{P_{mpp}}{V_{co} \times I_{cc}} \quad (II.10)$$

Le rendement énergétique est défini comme le rapport entre cette puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur le module photovoltaïque. Si A est la surface de ce module, E est le rayonnement solaire en W/m^2 , le rendement énergétique s'écrit [19]

$$\eta = \frac{P_m}{P_i} = \frac{V_{co} \times I_{cc} \times FF}{E \times A} \quad (II.11)$$

II.7 Les convertisseurs statiques

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge. Les convertisseurs statiques sont les dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique.

On distingue deux types de sources de tension :

- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- Sources de tension alternatives définies par les valeurs de la tension efficace V et de la fréquence f .

Ce fonctionnement de convertisseur est réalisé par des moyens purement électroniques (semi conducteurs), et permet

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique.
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique.
- Une réduction des masses et des volumes, mais aussi du bruit [20].

II.8 Les convertisseurs DC/DC

Le convertisseur DC/DC (Hacheur) est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue avec un rendement élevé.

Le découpage se fait à une fréquence élevée. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit dévolteur (ou abaisseur ou Buck). Dans le cas contraire, il est dit survolteur (ou élévateur ou Boost). Il existe des hacheurs capables de travailler dans les deux sens (Boost-Buck). [21].

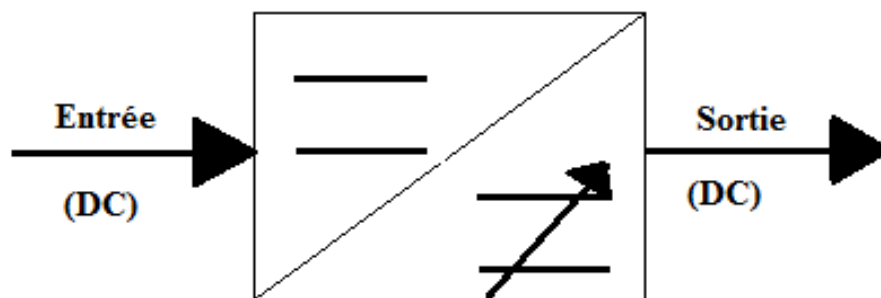


Figure II.17: principe de base d'un hacheur

II.8.1 Hacheur Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

L'interrupteur K1 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). C'est un convertisseur qui donne en sortie une tension plus petite que celle de l'entrée.

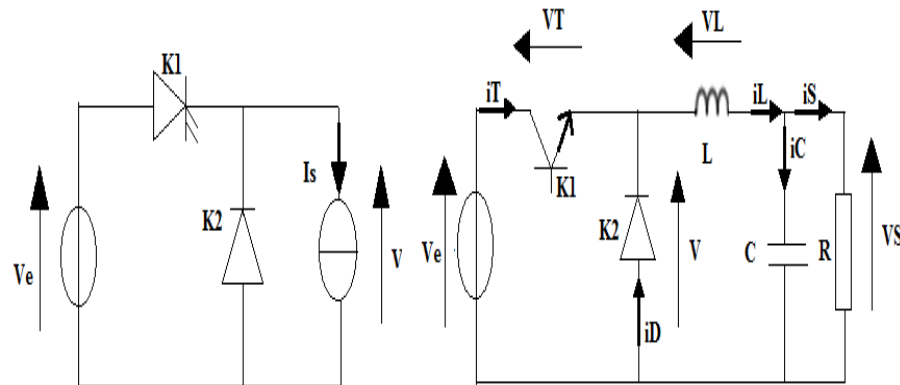


Figure II.18: Structure d'un hacheur Buck

La charge est constituée par la résistance R . les éléments L et C forme un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie.

II.8.2 Hacheur Boost

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

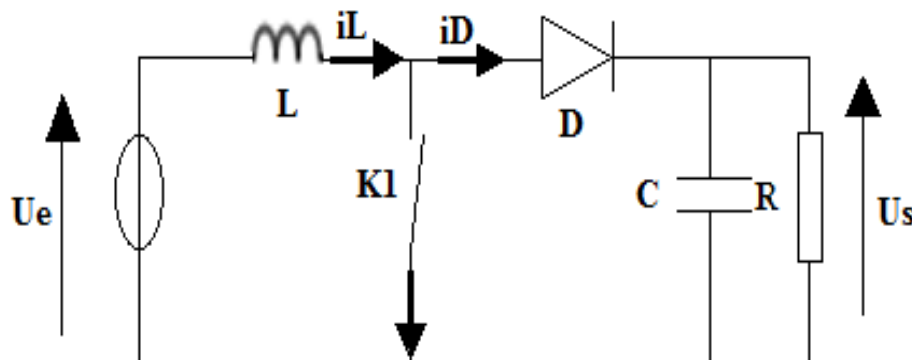


Figure II.19: Structure d'un hacheur Boost

L'interrupteur $K1$ est fermé pendant la fraction DT de la période de découpage T . La source d'entrée fournit l'énergie à la capacité C à travers l'inductance L . Lors du blocage du transistor, la diode d assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

II.8.3 Hacheur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité

inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée au zéro, compliquant ainsi sa commande [22].

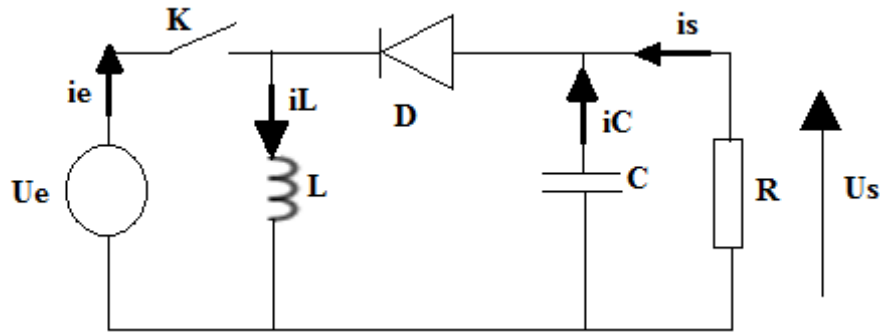


Figure II.20: Structure d'un hacheur buck-Boost

II.9 Composants électroniques utilisés dans les systèmes PV

II.9.1 Les IGBT

L'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) est un interrupteur électronique unidirectionnel de puissance commandé par une tension. G : Grille (Gate), C : Collecteur (Collector), E : Émetteur (Emitter).

II.9.2. Les MOSFET

Le transistor à effet de champ, en anglo-saxon FET (Field Effect Transistor), peut fonctionner en interrupteur, comme le transistor bipolaire. Le principe de fonctionnement étant très différent, ce composant présente des avantages et des inconvénients par rapport au transistor bipolaire pour la réalisation de convertisseurs de puissance peu élevée.

II.9.3 Thyristor GTO

Le GTO Thyristor (Gate-Turn-Off Thyristor) ou SCR blocable est un interrupteur électronique unidirectionnel à fermeture et ouverture commandées. Il est aussi appelé GCO (Gate-Cut-Off) ou GCS (Gate-Controlled-Switch). Ce composant est surtout destiné à travailler avec des sources de tensions continues, comme, par exemple, dans les onduleurs en pont [23].

II.10 l'onduleur de tension

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 [24].

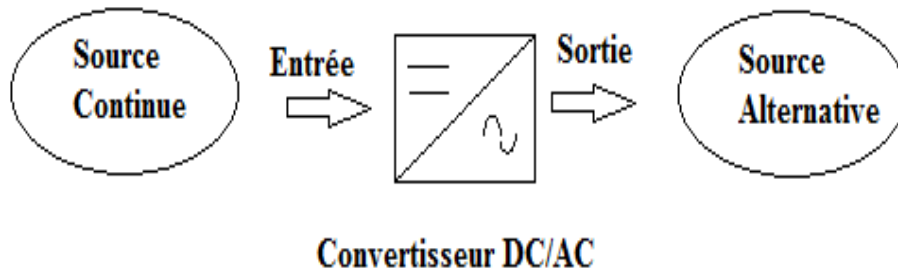


Figure II.21: Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC/AC)

II.10.1 Onduleurs modulaires

Suivant ce concept, chaque module solaire disposé d'un onduleur individuel, 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.

II.10.2 Onduleurs centralisés

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.

II.10.3 Onduleurs "String"

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 [25].

II.11 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons procédé à la modélisation de la cellule photovoltaïque, aussi nous avons présenté les différents montages qui peuvent être réalisés ainsi que l'avantage de chacun d'entre eux, puis nous avons étudié l'effet de l'irradiation et de la température sur les cellules. A la fin, nous avons achevé ce chapitre par la description des éléments de l'électronique de puissance vu leurs importances dans les installations photovoltaïques.

Chapitre III

Méthodes de diagnostic de défauts des systèmes photovoltaïques

III.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques peuvent être confrontés lors de leur fonctionnement à des anomalies, dysfonctionnement ou défauts, ces derniers surviennent autant lors de la conception, de l'installation, que lors de l'exploitation. Ces défauts réduisent les performances des systèmes photovoltaïques, ce qui affecte les performances et l'efficacité du système de production photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous introduisons une description générale sur les différents types de défauts qui peuvent survenir sur système photovoltaïque et leurs impacts sur les composants principaux de la chaîne de conversions de raccordement vers le réseau électrique.

III.2 Défauts dans un système photovoltaïque

Avant de développer un système de diagnostic de défauts survenus sur un système photovoltaïque, un cahier de charges pour la détection et la localisation des défauts doit être établi pour prévenir la protection du système PV.

L'objectif de cette partie est d'identifier les principaux défauts rencontrés dans un système PV.

Terminologies utilisées

- **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 observée du comportement normal.
- **Détection** : Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques.
- **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.

III.3 Différents défauts les plus fréquents rencontrés dans un système photovoltaïque et leurs conséquences

Les défauts les plus rencontrés dans une installation photovoltaïque ont été collectés grâce au retour d'expérience.

Les défauts collectés ont été classifiés selon la fonction des différents composants constituant l'installation PV.

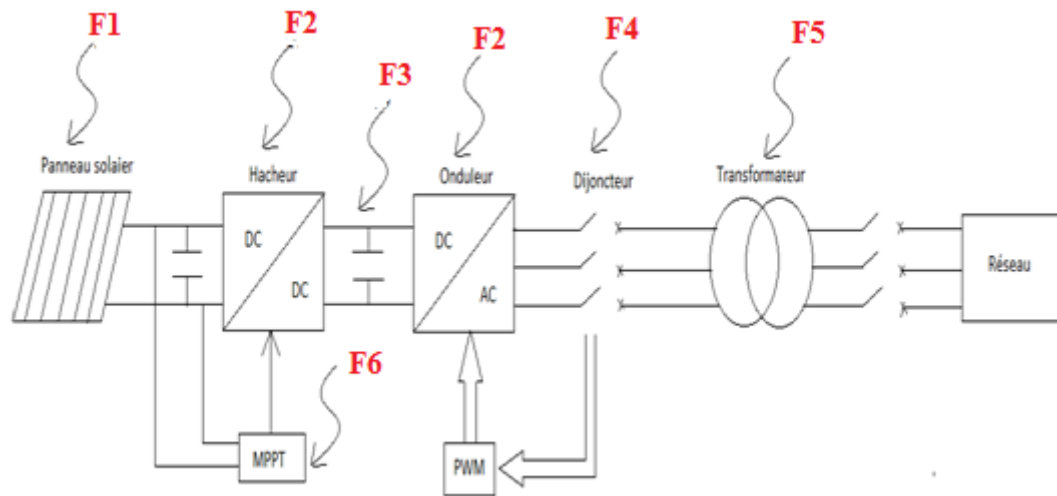


Figure III.1: Synoptique électrique d'un système PV connecté au réseau

Selon la figure précédente, nous pouvons citer quelques défauts qui ont un impacte critique sur le système PV raccordé au réseau électrique.

- **F1** : Défauts dans le générateur photovoltaïque
- **F2** : Défauts de l'onduleur et défaut de l'hacheur
- **F3** : Défauts dans le système de filtrage et dans la partie DC
- **F4** : Défauts dans les disjoncteurs coté onduleur et coté réseau
- **F5** : Défauts dans les transformateurs de raccordement au réseau
- **F6** : Défauts dans le système de commande (MPPT, PWM)

Il existe d'autres défauts :

- Défauts dans la boîte de jonction
- Défauts dans le système de câblage
- Défauts dans le système de protection
- Défauts dans le système d'acquisition des données

Dans chaque groupe de défauts, un tableau a été établi reprenant le type du défaut, sa conséquence principale, puis son degré d'impact sur la production du système ou criticité (**1 : faible, 2 : moyen, 3 : fort**), son occurrence (**1 : faible, 2 : moyenne, 3 : forte**). Ainsi que sa phase d'origine (**C : Conception ; I : Installation ; E : Exploitation**).

III.3.1 Défauts dans le générateur photovoltaïque

Plusieurs défauts peuvent être identifiés dans les systèmes photovoltaïques, nous pouvons les citer dans le tableau qui suit :

Défaut	Conséquences	Criticité	Occurrence	Origine
Salissure (pollution, sable, neige)	Perte de puissance	3	3	E
Inversion des liaisons de sortie	Module mal câblé, diminution des performances	3	2	I, C
Air marin	Corrosion	3	2	E
Dégradation des modules par vandalisme	Diminution des performances, Non fonctionnement de l'installation	3	2	E
Vol des modules	Non fonctionnement de l'installation	3	2	I, E
Mauvaise orientation et/ou inclinaison des modules	Ombrage, diminution des performances	2	3	C, I
Couple galvanique dû au mélange de matériau de la jonction module/support	Corrosion	2	3	C
Module mal ou pas ventilé	Échauffement	2	2	I, C
Module mal fixé	Déplacement du module, diminution des performances	2	2	I, C
Modules non câblés	Diminution des performances	2	2	I, C
Fissure	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules, diminution des performances	3	1	E
Rouille par infiltration d'eau	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules	3	1	E
Mauvaise isolation entre modules et onduleur	Court-circuit, destruction du module, incendie	3	1	I, C
Détérioration des joints d'étanchéité	Perte d'étanchéité, détérioration des cellules	3	1	E
Déformation du cadre des modules	Infiltration d'eau	3	1	E
Corrosion du cadre des modules	Perte d'étanchéité, détérioration des	3	1	E

	cellules			
Délaminage	Diminution des performances, échauffement	3	1	E
Foudre	Détérioration des modules	3	1	E
Tempête	Module arraché, cassé	3	1	E
Pénétration de l'humidité	Hotspot, augmentation du courant de fuite, corrosion, perte d'adhérence et d'isolation, diminution de la résistance de CC à la terre	3	1	E
Faiblesse au vent des structures	Module arraché, cassé	3	1	C, I
Foudre sur l'installation	Destruction des modules	3	1	E
Modules de performances différentes	Diminution des performances du champ	1	3	I, C
Sortie par le bas des boîtes de connexions impossible	Mauvais câblage	1	3	C, I
Bouchons de presse-étoupe manquant sur la boîte de connexion	Pénétration d'eau, corrosion des liaisons	1	3	I, C
Boîte de connexion montée à l'envers	Entrée d'eau dans le boîtier par le presse-étoupe	1	3	I, C
Ombrage partiel (feuilles d'arbre, déjections)	Hotspot, détérioration de cellules	2	1	E
Dégradation de l'encapsulant à cause des ultraviolets, EVA jaunissant	Absorbe les photons qui n'arrivent plus jusqu'à la cellule, diminution des performances	2	1	E
Augmentation de la résistance série due au cycle thermique	Diminution des performances	2	1	E
Détérioration de la couche antireflet	Diminution des performances	2	1	E
Dégradation à cause de la lumière	Diminution des performances, surtension, destruction de diodes	2	1	E

Dégradation à cause de la chaleur	Diminution des performances, échauffement, détérioration des joints	2	1	E
Inclinaison des modules trop faible	Stagnation d'eau, dépôt de terre, prolifération de champignons, problème d'étanchéité	2	1	C, I
Dégradation des interconnexions	Détérioration des joints, diminution des performances, augmentation de la résistance série, de la chaleur	2	1	E
Support mécanique des modules inadéquat ou mal posé	Efforts mécaniques importants sur les modules	2	1	C, I
Mauvaise résistance mécanique des supports des modules	Déformation du support	2	1	C, I
Diffusion du phosphore (dopant) vers la surface	Perte d'adhérence de l'encapsulant	2	1	E
Important courant de fuite	Échauffement	2	1	E
Échauffement des modules par la boîte de connexion	Décollement du Tedlar, diminution des performances	2	1	C, I
Nid d'insectes sur les modules	Diminution des performances	2	1	E
Panneaux inaccessibles	Nettoyage impossible	1	2	C, I
Module produisant moins que prévu	Diminution des performances	1	1	E
Apparition de bulles à la surface des modules	Diminution des performances	1	1	E

Tableau.III.1: Défauts et leurs conséquences dans un générateur**Figure III.2:** Exemples de défauts rencontrés dans les générateurs photovoltaïques
(Ombrage, Salissure)

III.3.2 Défauts dans la boîte de jonction

La boîte de jonction est considérée comme l'élément le plus critique dans les systèmes photovoltaïques. Elle est exposée aux défauts suivants :

Défaut	Conséquences	Criticité	Occurrence	Origine
Absence de parafoudre ou protection foudre inadaptée	Destruction en cas de foudre	3	2	C, I
Presse-étoupe mal serré	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	2	3	I
Liaison de mise à la terre non fixée ou sectionnée	Pas de mise à la terre	2	2	I
Boîte de jonction sans presse étoupe	Pas d'étanchéité, corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	2	2	I
Presse-étoupe en caoutchouc	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	2	2	C, I
Infiltration d'eau par les vis de fixation	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	2	2	I
Boîte de jonction non repérée	Problème pour contrôle et maintenance	1	3	I
Déconnexion des soudures	Arc électrique, incendie, diminution des performances	2	1	E, I
Boîtier infesté d'insectes	Rupture du circuit électrique	2	1	E
Fourreaux non prévus pour usage extérieur	Destruction de la protection	2	1	C
Liaison sans protection	Destruction de la liaison	2	1	C, I
Pénétration de l'eau ou de l'humidité	Corrosion des connexions, des diodes, des bornes, incendie	2	1	I

Tableau.III.2: Les défauts dans la boîte de jonction



Figure III.3: Exemples de défauts rencontrés dans les boîtes de jonction

III.3.3 Défauts dans le système de câblage

Les défauts trouvés dans le système de câblage dans les systèmes photovoltaïques sont :

Défaut	Conséquences	Criticité	Occurrence	Origine
Mauvais dimensionnement des câbles	Chute de tension >3 %, échauffement	2	3	C
Connexion desserrée ou cassée	Arc électrique, incendie, destruction de la boîte de jonction, destruction des diodes	2	3	I, E
Principe de câblage en goutte d'eau non respecté	Mauvais câblage	2	3	I
Câbles inter module de section trop faible par rapport au presse-étoupe	Corrosion des contacts, rupture du circuit électrique	2	3	C, E
Bornes rouillées	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	2	2	E
Câbles non fixés	Boucle de câblage, circuit ouvert	2	2	I
Mauvais câblage	Court-circuit, claquage des diodes anti- retour, destruction des connecteurs (circuit ouvert), aléas de fonctionnement sur disjoncteur	2	2	I
Toron	Boucle électromagnétique	2	2	I
Câbles d'arrivée des sous champs entamés lors du dénudage	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	2	2	I
Absence de graisse de silicone	Humidité	2	2	I
Câble mal dénudé	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	2	2	I
Câble rongé par des rats	Faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	2	2	E
Modification du câblage par l'utilisateur non compétent	Mauvais câblage, faux contacts, circuit ouvert, arc électrique	2	2	E
Boîte de connexion décollée	Connexion des cellules en série endommagée	2	2	E

Tableau.III.3: Les défauts dans le système de câblage



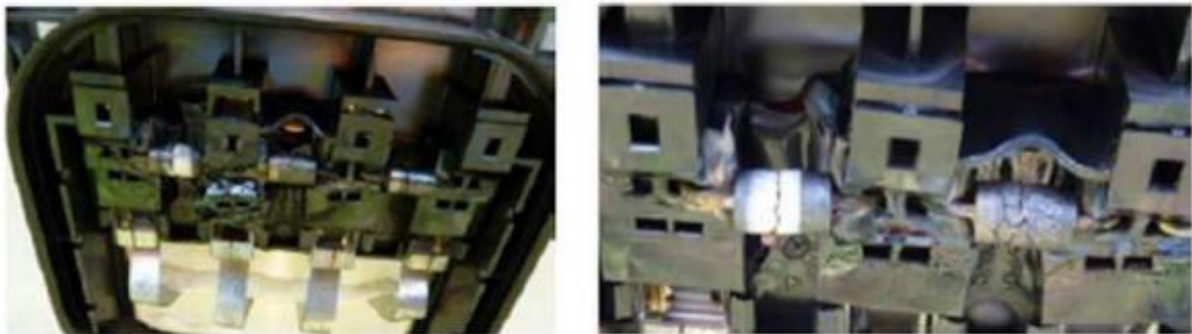
Figure III.4: Exemples de défauts rencontrés dans les câbles

III.3.4 Défauts dans le système de protection

Le système de protection est conçu d'une manière à protéger le système photovoltaïque contre les défauts francs survenus.

Défaut	Conséquences	Criticité	Occurrence	Origine
Protections inappropriées ou mal dimensionnées	Court-circuit, hot spot, incendie, arrêt de l'installation	2	2	C
Interrupteur, disjoncteur inapproprié	Arc électrique, incendie, destruction à l'ouverture	3	1	C
Disjoncteur différentiel non conforme à la norme	Non déclenchement, tension entre neutre et terre	3	1	C
Armoire électrique posée à même le sol à l'extérieur	Dysfonctionnement en cas de pluie	3	1	C, I
Parafoudre non connecté à la terre	Pas de protection	3	1	I
Impossibilité de déconnecter les modules par branche	Problème de sécurité	1	3	C, I
Pas de possibilités de sectionnement extérieur au coffret	Problème de sécurité	1	3	C
Mauvaise dissipation de la chaleur des diodes	Échauffement	2	1	C, I
Sous dimensionnement des diodes de by-pass	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction	2	1	C
Absence de protection contre les courants inverses	Hot spot, destruction des diodes, échauffement de la boîte de jonction	2	1	C
Diode mal connectée	Non fonctionnement des diodes, absence de protection contre les courants inverses	2	1	I, E
Inversion de la polarité des diodes au montage	Non fonctionnement des diodes, court-circuit, hot spot	2	1	I, E

Phénomènes de résonance	Non fonctionnement des fusibles et des protections de surtension	2	1	C
Dégradation à cause de la lumière	Non fonctionnement des diodes de by-pass	2	1	E
Échauffement des diodes placées dans un endroit mal ventilé	Température de destruction atteinte	2	1	C, I
Vieillessement des disjoncteurs	Non fonctionnement des disjoncteurs	1	1	E

Tableau III.4: Les défauts dans le système de protection**Figure III.5:** Exemples de défauts de diodes by-pass

III.3.5 Défauts de l'onduleur

L'onduleur est un système de conversion DC/AC) à pour rôle d'adapter les grandeurs électriques courant-tension-fréquence au consommateur ou au raccordement vers le réseau électrique. Aussi ce type de convertisseur probablement exposé aux différents défauts.

Défaut	Conséquences	Criticité	Occurrence	Origine
Dégradation à cause de la chaleur	Détérioration de l'onduleur, des connexions	3	2	E, C, I
Faux contact	Arrêt de l'onduleur	3	2	I
Surtension	Déconnexion de l'onduleur	3	2	C
Fusible fondu	Arrêt de l'onduleur	3	2	E, C, I
Foudre sur le réseau	Surtension, destruction de l'onduleur	3	2	E
Tension du générateur inférieure à la limite basse de l'onduleur	Déconnexion de l'onduleur	3	2	C
Onduleur sous dimensionné	Destruction de l'onduleur	2	3	C
Bobine des filtres, thyristors, capacités en défaut	Arrêt de l'onduleur	3	1	E, C, I
Problème d'interface avec le réseau	Découplage de l'onduleur	3	1	E
Défaut d'isolement	Détérioration de l'onduleur	3	1	C, E

Surchauffe des onduleurs	Diminution des performances	3	1	E
Onduleur installé dans un lieu non étanche	Panne de l'onduleur	3	1	I, C
Onduleur mal fixé	Chute de l'onduleur	3	1	I
Onduleur surdimensionné	Perte de puissance, diminution des performances	2	1	C
Visserie et bouton de commande oxydés	Réglage impossible	2	1	E
Mauvais choix de la tension nominale d'entrée	Diminution des performances	2	1	C
Pile de sauvegarde HS	Perte de données	1	2	E
Témoins de défaut d'intensité allumé en permanence	Mauvaise information sur l'intensité	1	2	E, I
Onduleur non mis à la terre	Disjoncteur différentiel non actif	1	2	I
Perte de la mémoire (mauvaise manipulation du technicien)	Perte de données	1	1	E
Afficheur de cristaux liquide endommagé ou illisible	Pas d'information sur le fonctionnement	1	1	E

Tableau.III.5: Les défauts de l'onduleur

III.3.6 Défauts dans le système d'acquisition des données

Le système d'acquisition des données est fait dans le but de surveiller et de contrôler le système photovoltaïque pendant son fonctionnement. Un défaut dans ce système peut introduire une instabilité dans le fonctionnement.

Défaut	Conséquences	Criticité	Occurrence	Origine
Coupure de courant/tension	Perte de données	1	3	E
Sonde de température non câblée	Mesure impossible	1	3	I
Sonde d'ensoleillement non câblée	Mesure impossible	1	3	I
Défaut de paramétrage	Enregistrement de fausses données	1	3	I
Mauvais câblage des shunts de mesure	Mesure impossible ou erronée	1	3	I
Afficheur de données mal placé (trop haut)	Données non visibles	1	2	C, I
Carte électronique mal positionnée	Touches inactives, défaut de commande	1	2	I
Non configuré pour l'acquisition des données	Pas de donnée enregistrée	1	2	I

Armoire fermée par le service de maintenance ou présence d'un code	Lecture des données par l'exploitant impossible	1	2	E, I
Bornier de mesures et de sonde de température trop proches	Câblage difficile, risque de court circuit	1	1	C, I
Acquisition de données vierge	Aucune information enregistrée	1	1	E
Mesure de données non nulles alors que système PV à l'arrêt	Données non fiables	1	1	E

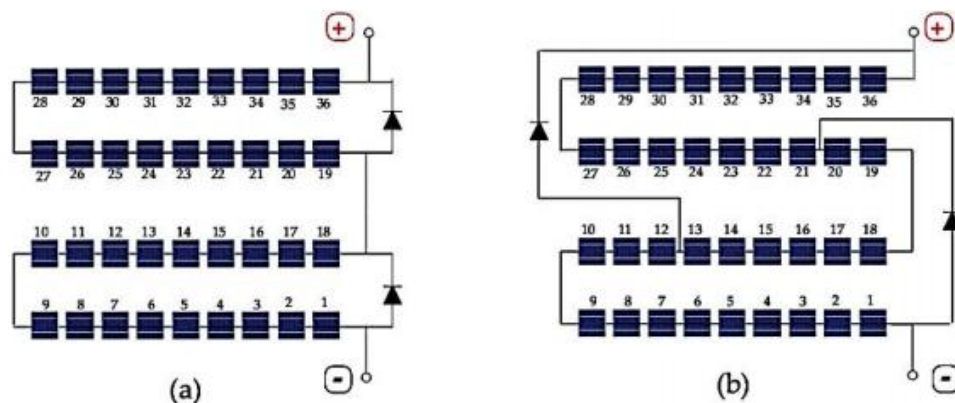
Tableau.III.6: Les défauts du système d'acquisition des données

III.4 Système de protection

Des protections électriques sont ajoutées aux modules PV, afin d'augmenter sa durée de vie, en évitant les pannes liées à l'association des cellules. Pour cela, deux types de protections sont employées dans l'installation PV.

A. Diode de by-pass

Les cellules dans un module sont associées en plusieurs groupes. Chaque groupe est ensuite connecté en antiparallèle avec une diode, appelée diode de by-pass ou diode de dérivation. Cette diode sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement en régime inverse. On compte généralement 18 cellules pour une diode de by-pass. Par contre, ce nombre peut varier selon les différents fabricants des modules. Par ailleurs, pour mieux protéger les cellules, la connexion de chaque cellule individuelle à une diode de by-pass, d'autres architectures de connexion des diodes de by-pass dans le module, comme on peut le voir dans la Figure III.6, Mais ces propositions ne sont pas largement appliquées du fait de la difficulté de fabrication.

**Figure III.6:** Module PV avec deux diodes de by-pass qui se chevauchent (overlapped)

(a) Mode adjacent (b) mode overlapping

B. 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, 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 et les modules du string traversés par le courant inverse pourraient être également susceptibles de la défaillance. Pour éviter ces courants inverses, une diode anti-retour est placée au bout de chaque string. L'utilisation de la diode anti-retour introduit pourtant une perte dans la production du fait de la chute de tension causée par cette diode pendant le fonctionnement normal du champ PV. De plus, ces diodes peuvent se mettre en défaut et demander par conséquent un contrôle régulier[25].

III.5 Méthodes de diagnostic d'un générateur PV

Il existe deux catégories de méthodes de diagnostic d'un générateur PV, La première est utilisée dans l'industrie, la seconde est utilisée dans la littérature,

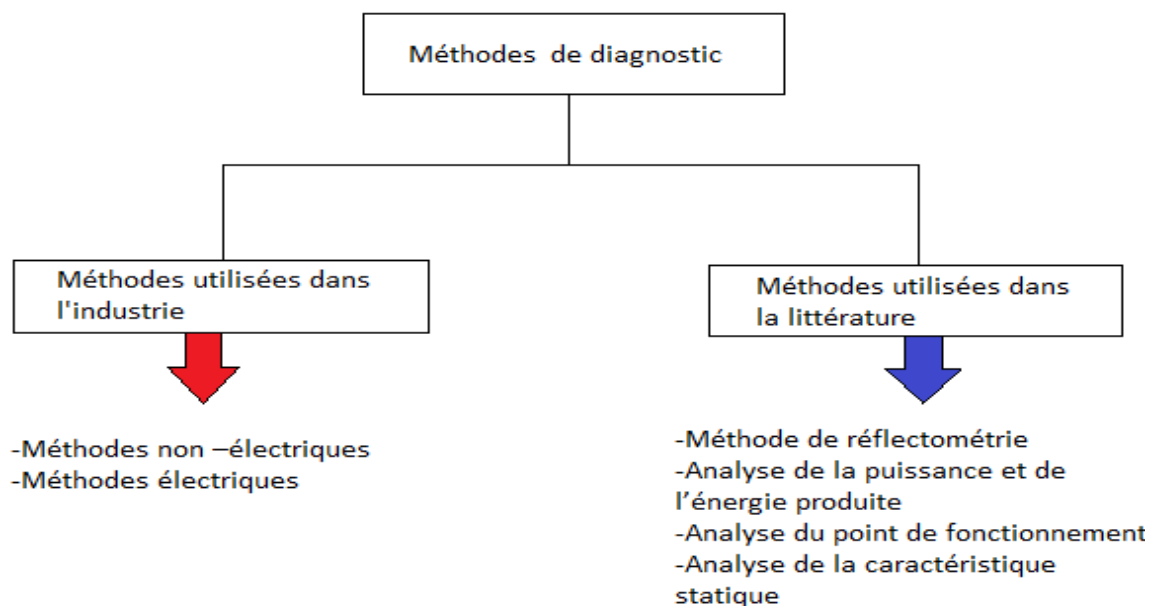


Figure III.7: Méthodes de diagnostic de défauts d'un générateur PV

III.5.1 Méthodes utilisées dans l'industrie

On distingue deux catégories de méthodes de diagnostic industrielle des méthodes reposant sur l'analyse du courant et de la tension appelé méthodes électriques et des méthodes reposant sur l'analyse d'autres grandeurs que I et V appelé méthodes non-électriques.

A. Méthodes électriques : Les systèmes de monitoring actuels d'un système PV 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 débité par le champ PV
- La tension aux bornes du champ PV
- La résistance d'isolement entre les bornes positive et négative 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 (sonde de température et cellule de référence). Il convient, dans le cas où ces grandeurs sont nécessaires, de les traiter à l'aide d'un automate spécifique. Cet automate est relié à l'onduleur et centralise la totalité des données afin de les enregistrer et/ou de les envoyer sur un serveur distant. Les mesures du côté AC sont plus importantes en nombre car directement liées à l'énergie qui sera vendue. Il est courant de relever

- ✓ Le courant AC
- ✓ La tension AC
- ✓ La fréquence
- ✓ L'impédance du réseau vue par l'onduleur

Des mesures décrites dans les deux paragraphes précédents, il est aisé de déduire :

- ✓ La puissance instantanée DC
- ✓ La puissance instantanée AC
- ✓ L'énergie produite sur différentes périodes (suivant la capacité de stockage des données) côtés DC et AC.

Ces données sont calculées directement par le microcontrôleur embarqué dans l'onduleur ou par l'automate associé. On y ajoute souvent

- ✓ La durée de fonctionnement de l'onduleur
- ✓ La date de mise en service
- ✓ Le CO₂ non rejeté dans l'atmosphère (« économisé »)
- ✓ Les alertes de défaillance du système (principalement les défauts d'isolement).

B. 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.

III.5.2 Méthodes utilisées dans 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.

A. Méthode de réflectométrie : La méthode de réflectométrie est une méthode de diagnostic qui consiste à appliquer la transmission d'un signal dans le champ PV à diagnostiquer, puis de mesurer les échos retournés. Le retard et l'amplitude des échos sont utilisés pour obtenir des informations sur la localisation, la caractérisation et éventuellement la prédiction du défaut. Elle a seulement besoin d'un point d'accès, qu'il demande une précision dans leur détermination. Néanmoins, elle est adaptée pour les réseaux de topologie complexes. Aussi, elle peut être intégrée dans les systèmes de contrôle. Cependant, la détection précoce de défauts d'un champ PV nécessite un traitement de données puissant avec un échantillonnage très rapide, ce qui augmente la complexité et le coût du système de diagnostic.

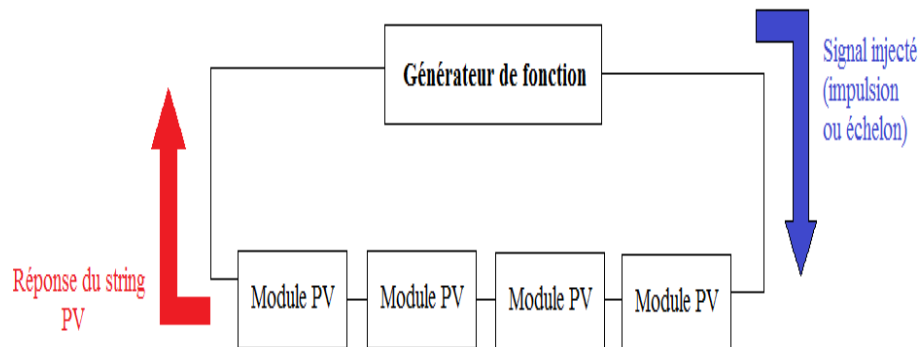


Figure III.8: Principe de la réflectométrie pour localiser le défaut dans un string PV

B. Analyse de la puissance et de l'énergie produite : La puissance ou l'énergie mesurée est comparée à celle attendue et lorsqu'une déviation importante a lieu, on considère qu'il y a un défaut. 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.

C. 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. 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.

D. Analyse de la caractéristique statique : La déformation de la caractéristique courant-tension peut être provoquée par le changement de la condition de fonctionnement (ensoleillement ou température) ou par l'apparition d'un ou des défauts dans le système PV. La figure III.8 montre l'allure de la caractéristique I-V en mode défaillant (en rouge) comparée à celle du mode normal (en bleu).

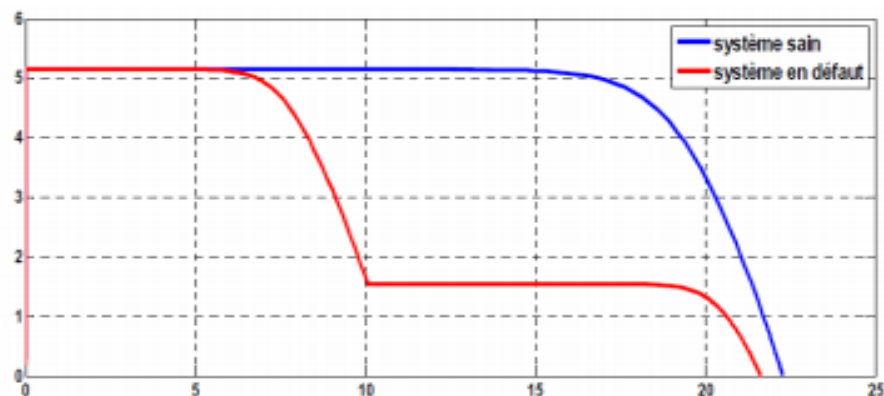


Figure III.9: Allure de la caractéristique I -V d'un champ PV en fonctionnement défaillant

En exploitant des informations de la caractéristique I-V du champ PV (en défaut), la détection et la localisation de défauts peuvent être réalisées. L'analyse de la caractéristique I-V consiste à étudier l'impact des différents défauts (dans la cellule, module, string et champ) sur la performance du champ PV, donc sur la caractéristique I-V elle-même [26].

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents défauts qu'un système PV peut rencontrer, nous avons constaté qu'il existe de nombreux défauts tels que les défauts dans le générateur PV, les défauts dans l'onduleur, les défauts dans le système d'acquisition des données, défauts dans le système de protection, défauts dans le système de câblage et les défauts dans la boîte de jonction photovoltaïque, ces derniers sont classés selon leurs nature.

Ensuite nous avons exposé quelques éléments de protection comme la diode by-pass connecté en antiparallèle qui sert à protéger les cellules contre leur fonctionnement en régime inverse et la diode anti retour placée au bout de chaque string car le string avec la tension la plus faible peut

absorber un courant inverse provenant des autres strings. Enfin nous avons donné des notions de base sur les méthodes de diagnostic utilisées dans l'industrie et dans la littérature.

Les convertisseurs statiques DC/DC sont considérés parmi les équipements les plus importants dans le système de conversion photovoltaïque, leur surveillance et diagnostic pendant le fonctionnement du système PV jouent un rôle très important pour la sécurité et la continuité de service de ce type de système. Une méthode de diagnostic sera proposée dans le chapitre IV pour la détection, la localisation et la reconfiguration des défauts interrupteurs des convertisseurs DC/DC.

Chapitre IV

Tolérance aux défauts interrupteurs des convertisseurs DC/DC pour système photovoltaïque

IV.1 Introduction

La sûreté de fonctionnement et la continuité de service des systèmes photovoltaïques sont deux critères exigés dans les installations photovoltaïques raccordées aux réseaux électriques moyens tension. Les informations issues de la chaîne de mesures, comportant des capteurs de tension et de courant nécessaires pour le fonctionnement, pour la régulation et pour la protection des systèmes photovoltaïques.

Le système photovoltaïque raccordé aux réseaux électriques constitué par plusieurs équipements installés dans le but d'assurer une adaptation de l'énergie électrique que ce soit vers le consommateur au vers le réseau (voir figure IV.1).

Dans ce chapitre, nous avons accentué notre étude sur le diagnostic de défauts des convertisseurs boost (DC/DC). Ces convertisseurs a pour rôle d'augmenter la tension de sortie du système PV afin d'atteindre la tension requise sur le bus DC pour l'entrée de l'onduleur. Afin d'être adaptée pour l'entrée du transformateur de puissance.

Les convertisseurs DC/DC doivent répondre à de nombreuses problématiques dans les applications des systèmes photovoltaïques en termes de coût, de volume, faisabilité, de sécurité et continuité de service et en termes de tolérance aux défauts.

L'architecture classique des convertisseurs boost présente un inconvénient major non-tolérant aux défauts des interrupteurs. Donc un défaut dans l'interrupteur peut provoquer des dysfonctionnements partiel ou totale des systèmes PV et aussi des dégâts matériels et humaines dans toute la chaîne de conversion. C'est pourquoi, depuis ces dernières années, de nouvelles architectures de convertisseur DC/DC ont été proposées afin d'améliorer la fiabilité des chaînes de conversion d'énergie électrique.

Dans ce chapitre, une vue d'ensemble des convertisseurs DC/DC utilisé dans les systèmes photovoltaïques avec leurs caractéristiques de fonctionnement est présentée. Ces topologies sont présentées afin d'évaluer la topologie proposée dans notre système et la plus appropriée en termes de continuité de service et en termes de tolérance aux défauts interrupteurs. Une méthode

simple et efficace à été développée pour l'analyse des deux types de défauts circuit-ouvert et court-circuit qui peuvent apparaître dans les interrupteurs des convertisseurs boost.

IV.2 Synoptique d'un système photovoltaïque

Le système photovoltaïque est un système comportant plusieurs équipements reliés entre eux de manière à adapter l'énergie produite au niveau du PV au réseau. Cela en passant par un convertisseur DC/DC boost dans le but d'augmenter la tension V_{pv} , un onduleur qui délivre des tensions et des courants triphasés équilibrés et un transformateur pour le transport de l'énergie. La figure ci-dessus représente le synoptique d'un système PV, ainsi que l'écoulement énergétique vers le réseau électrique.

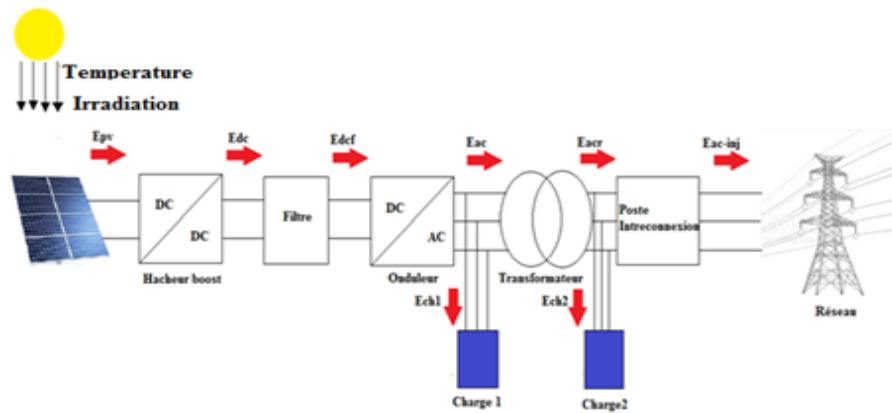


Figure IV.1: Synoptique d'un système photovoltaïque

Il existe d'autres types de montage des systèmes PV, le montage série et le montage parallèle chacun est utilisée selon les besoins.

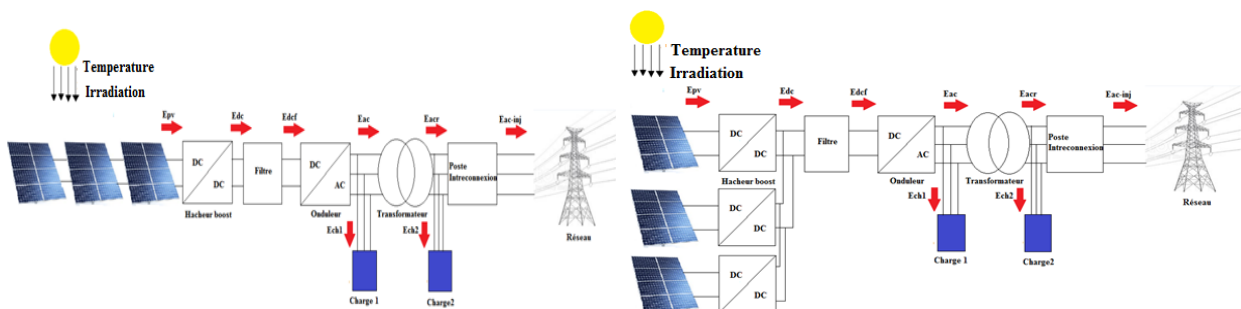


Figure IV.2: Synoptique d'un système photovoltaïque série et parallèle

IV.3 Simulation du fonctionnement du système PV

Dans cette partie, nous avons simulé le fonctionnement sans défaut de notre système PV, démontré dans la figure IV.1, pour évaluer leurs caractéristiques et leurs performances.

Le tableau ci-dessous montre les paramètres des équipements de la chaîne de conversion choisie dans notre étude.

Composants de la chaîne de conversion du système PV	Grandeurs	Valeurs
PV	Puissance maximale	315.072 W
	Tension maximale	54.7 V
	Courant maximale	5.77 A
	Nombre de cellule en série	5
	Nombre de cellule en parallèle	64
	Irradiation	1000 W/m ²
	Température	35°
	Tension de court circuit	64.6 V
	Courant de court circuit	6.14 A
Convertisseur DC/DC	Capacitance1	100e-6F
	Inductance	5e-3 H
	Resistance	0.005 Ω
	Capacitance2	24000e-6F
	Inductance L_{on}	0
	Resistance R_{on}	0.001 Ω
	Resistance R_s	1e5 Ω
	Type d'interrupteur	IGBT
Convertisseur DC/AC	Tension d'entrée (continue)	500 V
	Tension de sortie (alternative)	260 V
	Puissance	100 KW
	Fréquence	50 Hz
	Resistance	1e-3 Ω
	Inductance	45e-6 H
Charge 1	Puissance	2.5 KW
	Puissance réactive inductive	2000 VAR
	Puissance réactive capacitive	0 VAR
Charge 2	Puissance	50 KW
	Puissance réactive inductive	2000 VAR
	Puissance réactive capacitive	0 VAR

Tableau IV.1: Caractéristiques des composants de la chaîne de conversion du système PV

IV.3.1 Simulation du système PV en fonctionnement sain

Nous avons procédé à la simulation du système PV en fonctionnement sain (fonctionnement sans défaut), les caractéristiques étudiées sont la tension, le courant, la puissance active, et la puissance réactive en régime triphasé. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures ci-dessous.

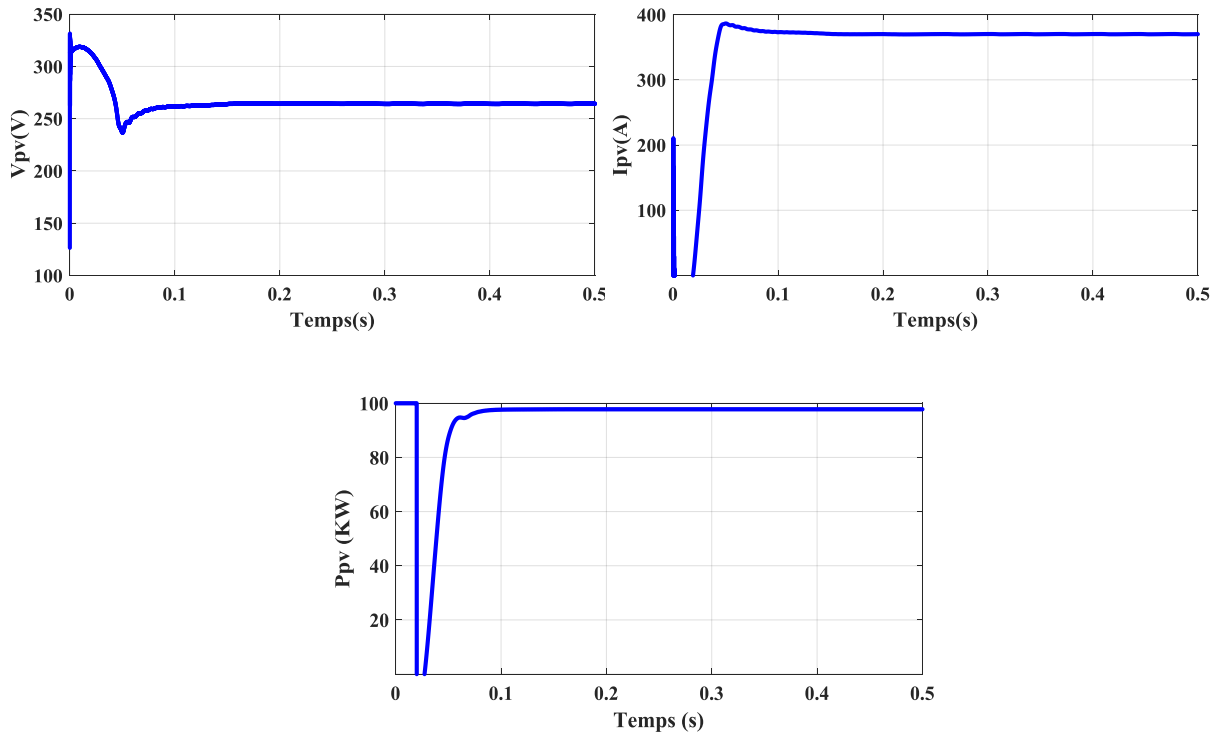


Figure IV.3: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (**coté PV**)

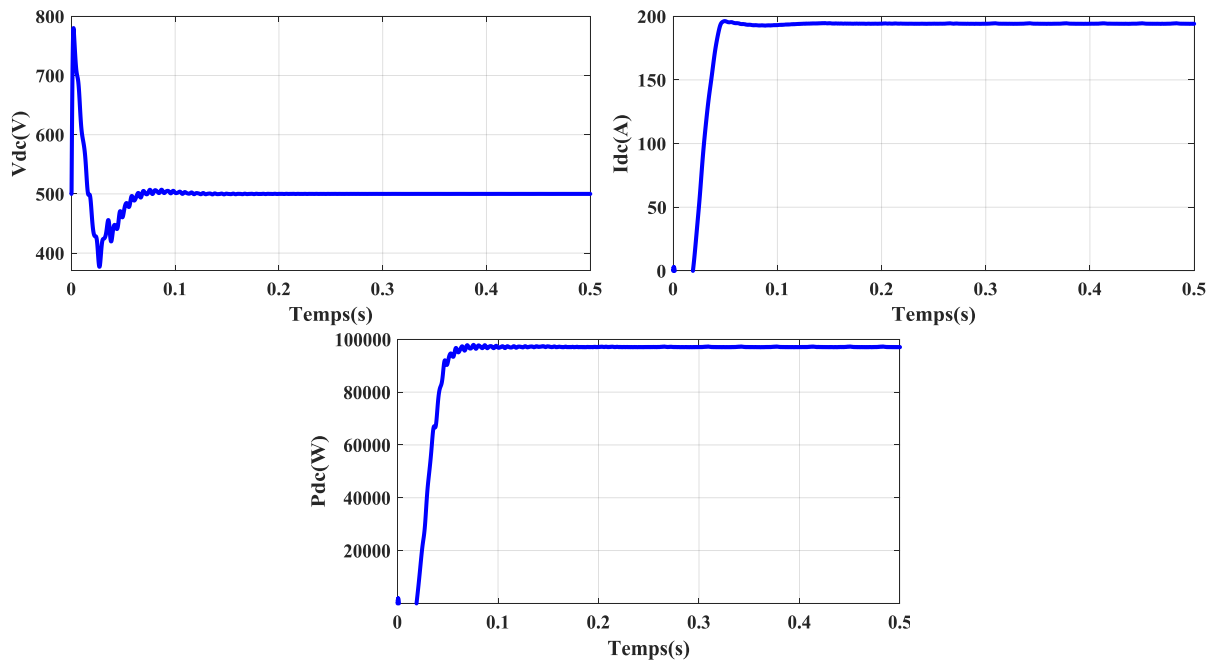


Figure IV.4: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (**coté convertisseur DC/DC**)

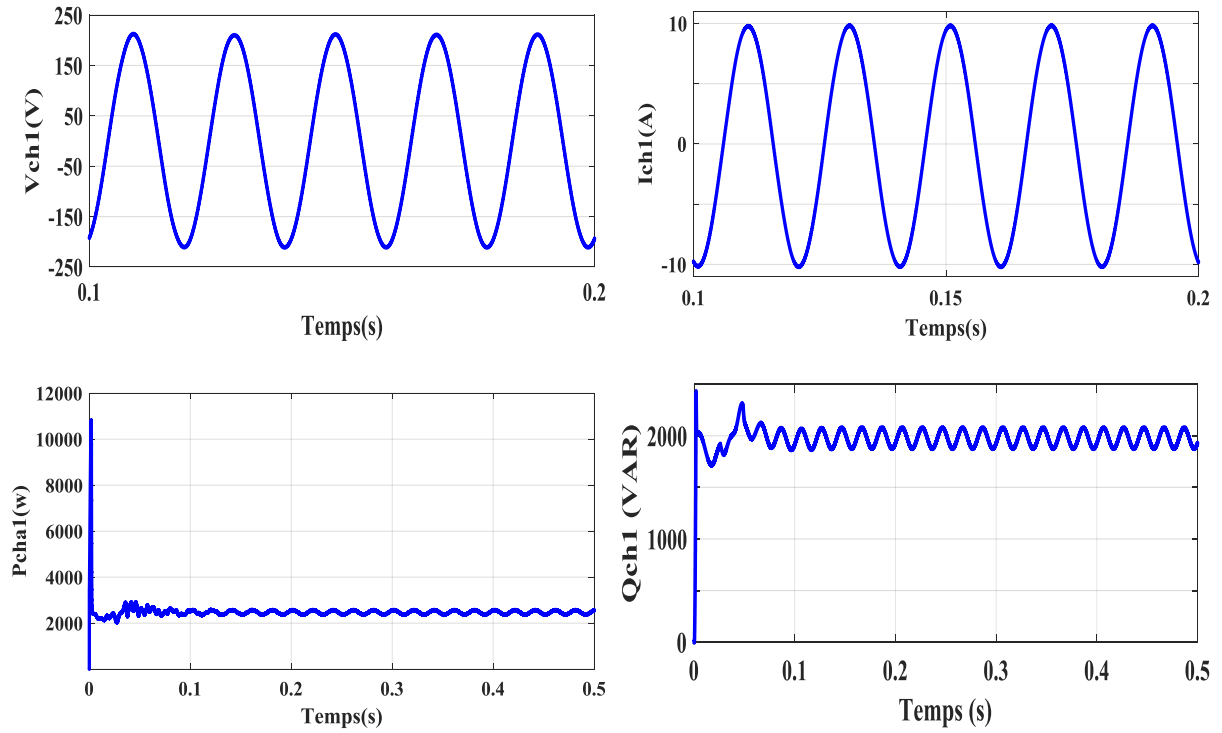


Figure IV.5: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté charge1)

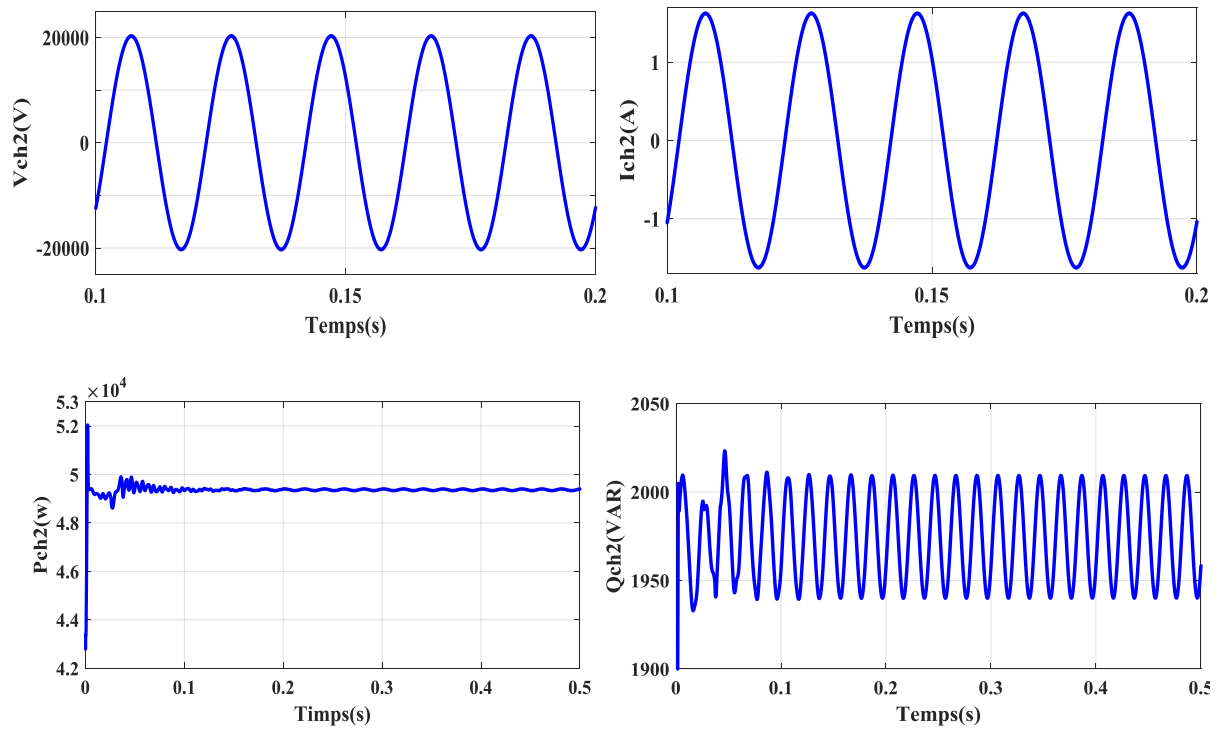


Figure IV.6: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (coté charge2)

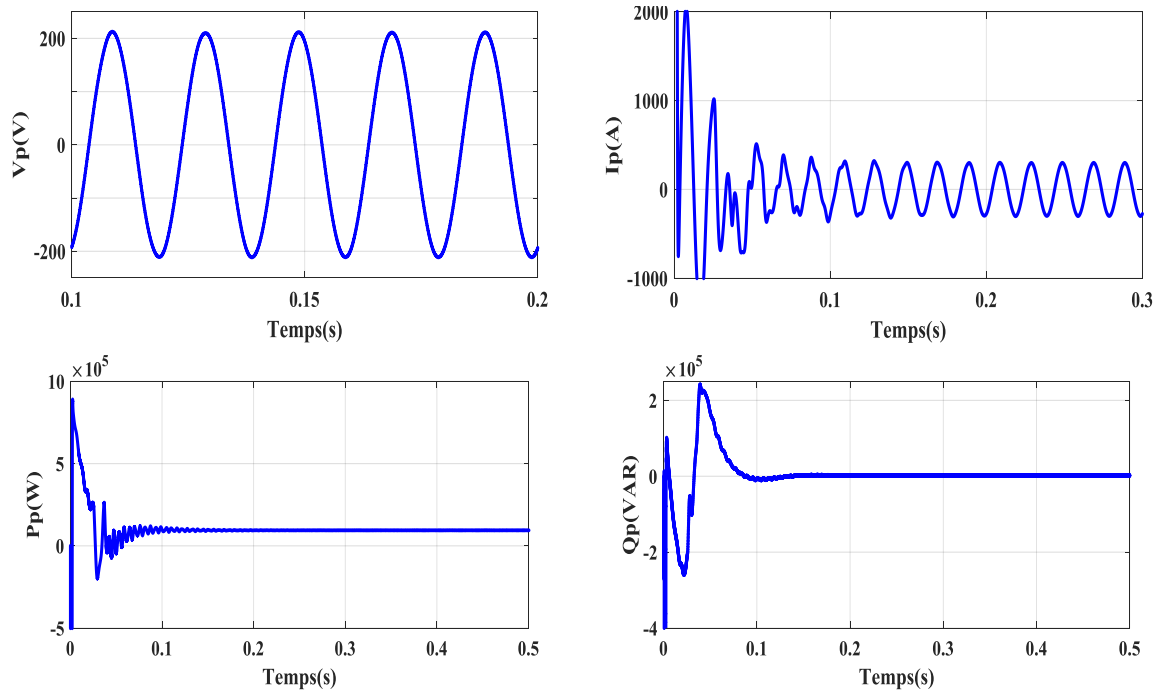


Figure IV.7: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (**coté primaire du transformateur de puissance**)

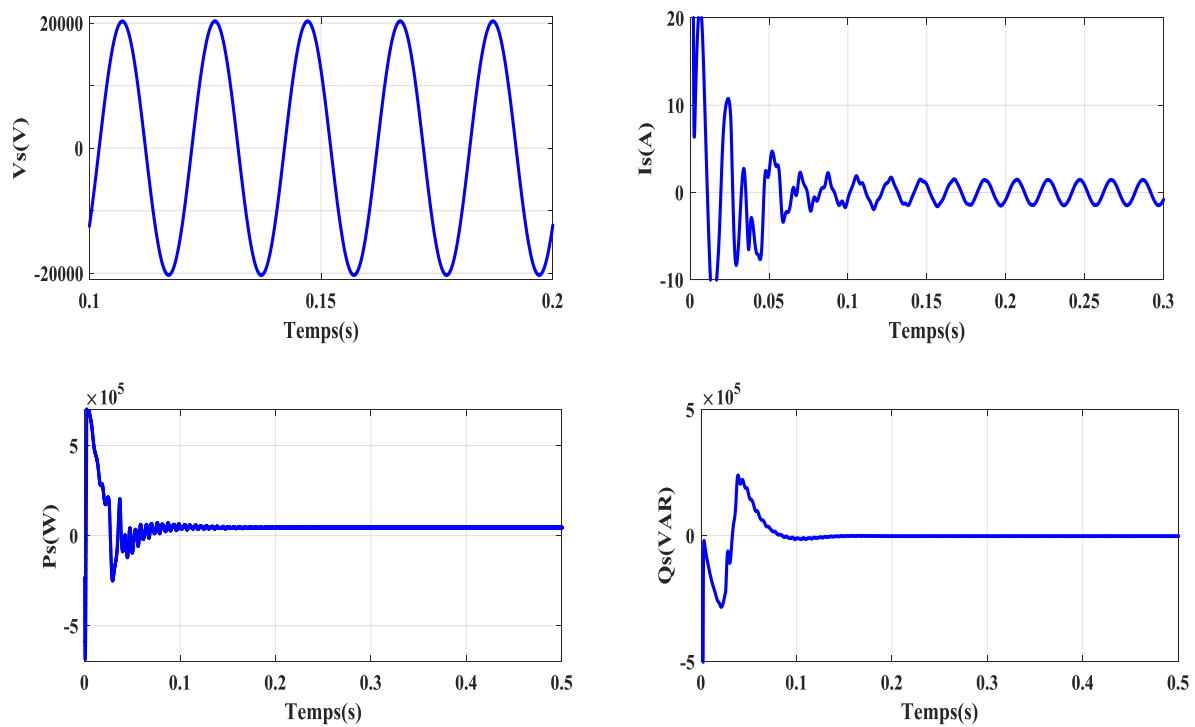


Figure IV.8: Évolution des grandeurs électriques pendant le fonctionnement sain (**coté primaire du transformateur de puissance**)

Discussion des résultats : selon les résultats obtenus nous déduisons les points suivants :

1-coté PV : les grandeurs tension, courant et puissance passent par des régimes transitoires après se stabilisent vers des valeurs correspondants au régime établi.

2-coté convertisseur DC/DC : Les grandeurs électriques passent par le régime transitoire, après se stabilisent vers des valeurs correspondants au régime établi. La tension est augmentée tandis que le courant diminue (caractéristique principale de l'hacheur boost), afin d'adapter la tension aux bornes onduleur (bus DC) et aussi pour minimiser les pertes par effet joule ($P_j = R \cdot I^2$) dans la chaîne de conversion.

3-coté charges et réseau : les grandeurs tension et courant sont de forme sinusoïde, équilibrées triphasées et passent par des régimes transitoires, et après, ces grandeurs se stabilisent en régime permanent. La puissance active et réactive ont des valeurs constantes qui correspondants a la puissance produite par le système PV (couleur rouge) et la puissance relevée sortie transformateur de puissance.

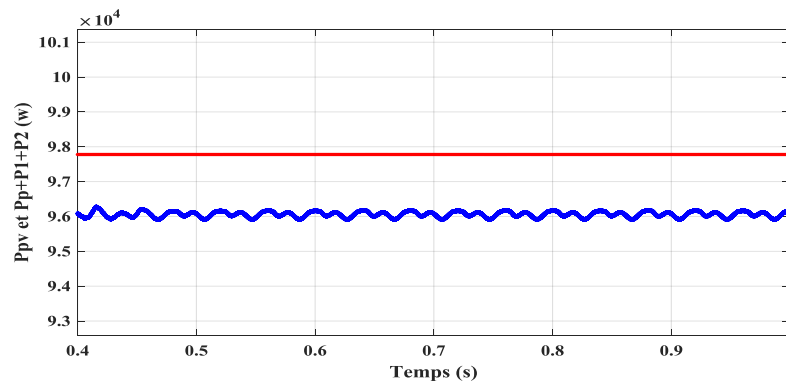


Figure IV.9: Puissance produite par le système PV et la puissance coté transformateur de puissance

➤ **Bilant énergétique:** Le bilan énergétique de notre système est récapitulé dans le tableau suivant :

Grandeurs		Valeurs
PV	V (V)	266.4
	I (A)	366.7
	P (KW)	97.7
DC	V (V)	500
	I (A)	194
	P (KW)	97.02
Charge1	V (V)	210.7
	I (A)	10
	P (W)	2450
	Q (VAR)	2000.6
Charge2	V (V)	20274
	I (A)	1.62
	P (KW)	49.40
	Q (VAR)	1985
Coté	V (V)	211.07

primaire du TR	I (A)	297.7
	P (KW)	94.45
	Q (VAR)	2887
Coté secondaire du TR	V (V)	20255.6
	I (A)	1.457
	P (KW)	44.25
	Q (VAR)	-2000

Tableau IV.2: Bilant énergétique du système étudié

A partir des données du tableau IV.2 nous constatons que $P_{pv} = P_{ch1} + P_{ch2} + P_{inj} + \Delta P$.

Tel que : $\Delta P\% = 2\%$ (pour le cas étudié)

IV.3.2 Simulation du système PV en fonctionnement défaillant

Pour l'étude de l'influence des défauts sur les caractéristiques de fonctionnement de notre système, nous avons proposé le synoptique du système suivant.

Les charges (Ch1, Ch2) sont concentrées coté réseau, c'est pour voir l'effet des défauts sur l'ensemble des caractéristiques courant, tension et puissances sur toute la chaîne de conversion.

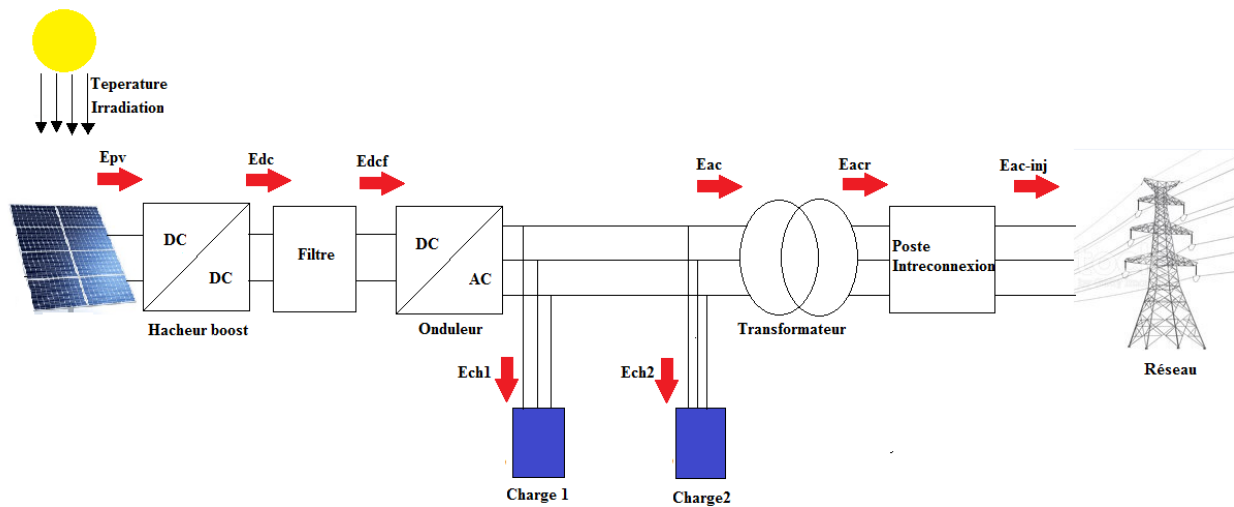


Figure IV.10 : Synoptique d'un système photovoltaïque étudié pour le cas défauts

Les valeurs des deux charges sont :

Charge 1	Puissance active	50 KW
	Puissance réactive inductive	2000 VAR
	Puissance réactive capacitive	20000 VAR
Charge 2	Puissance active	30 KW
	Puissance réactive inductive	2000 VAR
	Puissance réactive capacitive	0 VAR

Tableau IV.3: Caractéristiques des charges du système PV

IV.3.2.1 Effet des défauts circuit-ouvert et court-circuit des interrupteurs (DC/DC)

Les défauts les plus rencontrés dans les systèmes de conversion (DC/DC) sont les défauts circuit-ouvert et court-circuit des interrupteurs (DC/DC) que nous allons démontrés leurs effets sur toute la chaîne de conversion PV dans la section qui suit.

La création des deux types de défauts est basé sur le blocage en état ouvert (circuit-ouvert) et en état fermé (court-circuit) des interrupteurs.

A- Effet de défaut circuit-ouvert

Nous avons provoqué un défaut de circuit-ouvert sur l'interrupteur (SW) de l'hacheur boost avec le blocage des séquences de commande **[0 1 0 1]** à l'état **0**.

Les performances de notre système PV raccordé au réseau sont démontrées dans les figures suivantes:

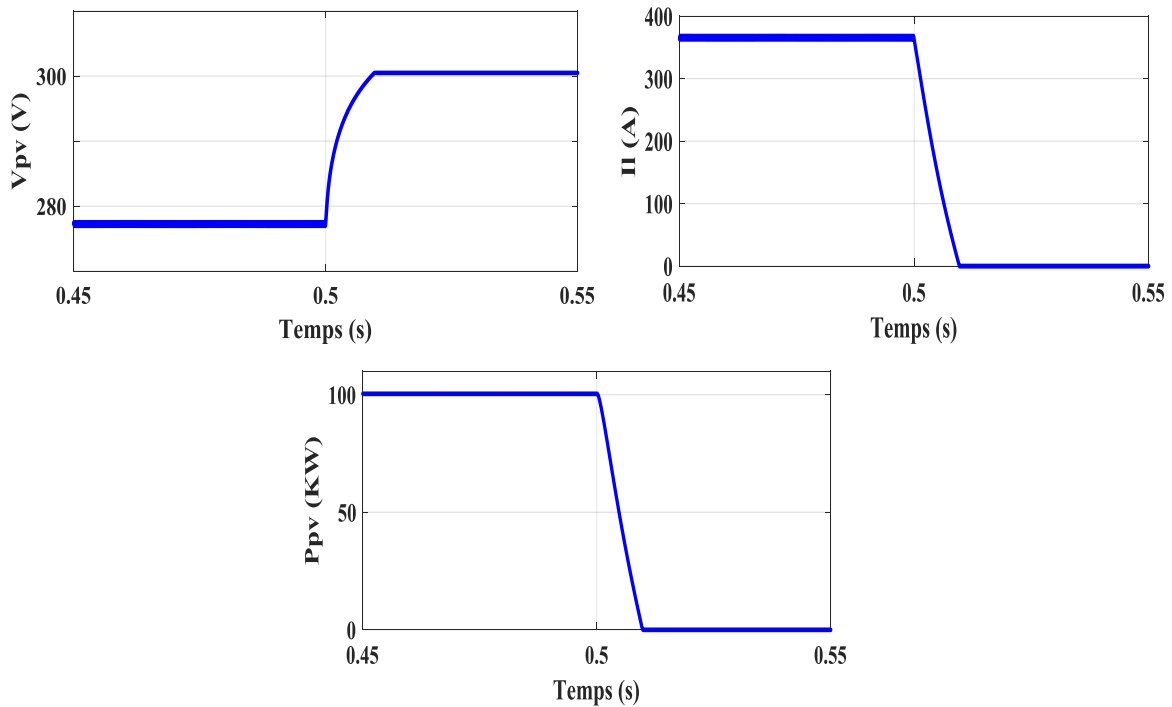


Figure IV.11: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**coté PV**)

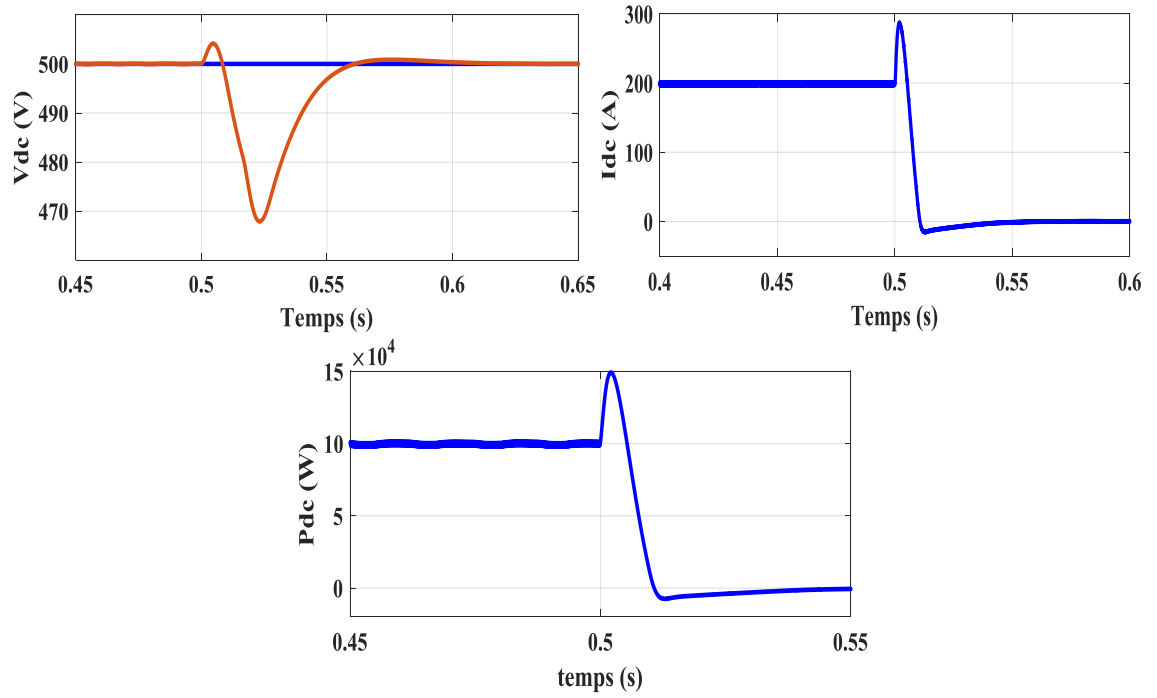


Figure IV.12: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**côté convertisseur DC/DC**)

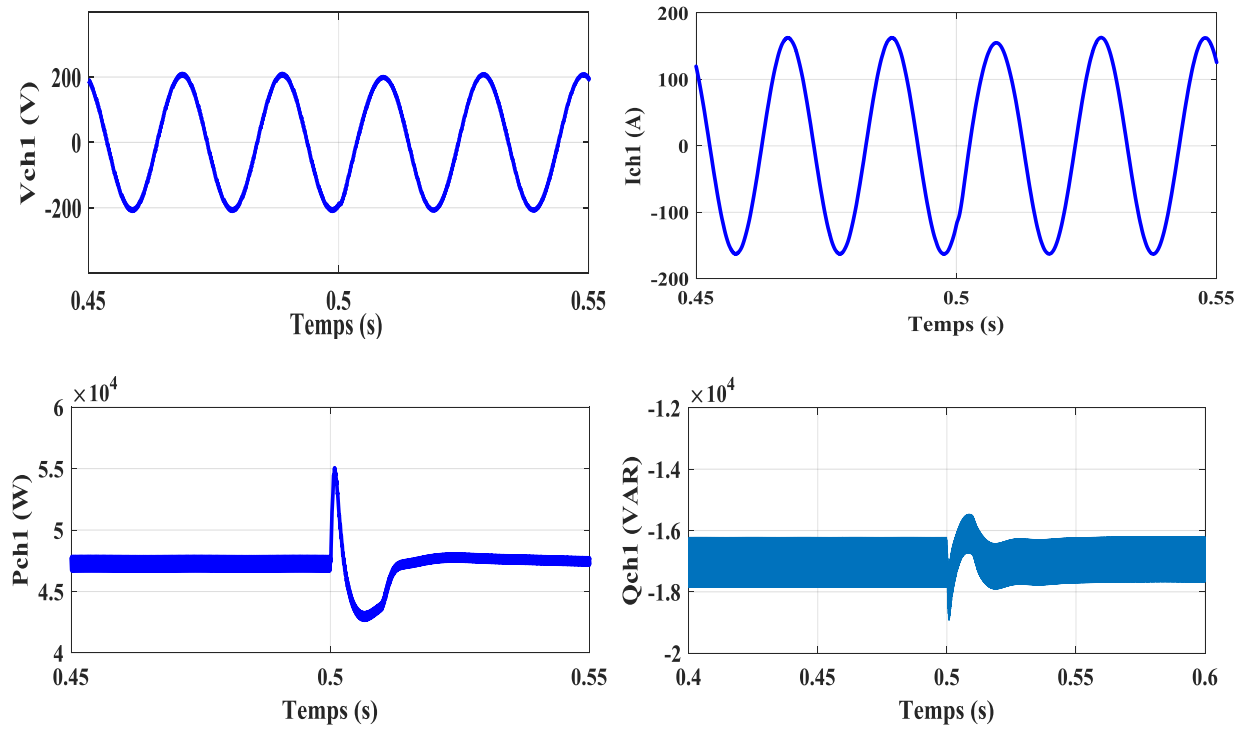


Figure IV.13: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**charge1**)

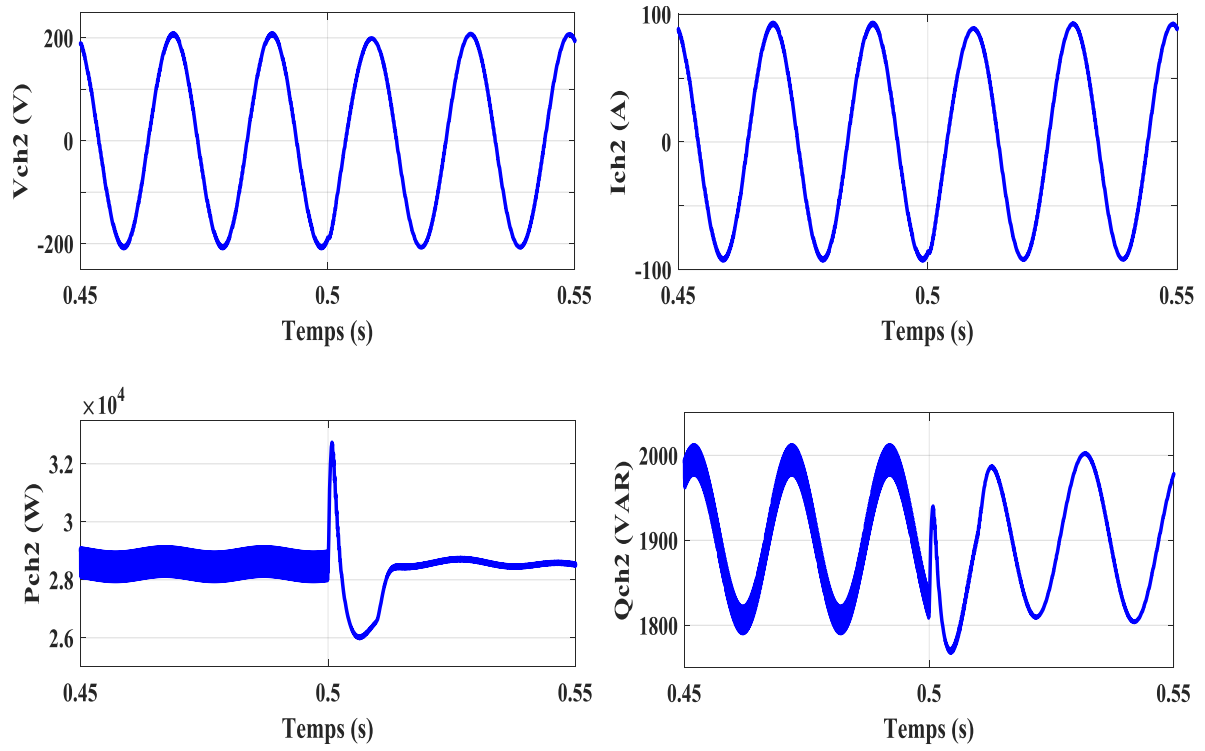


Figure IV.14: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**charge2**)

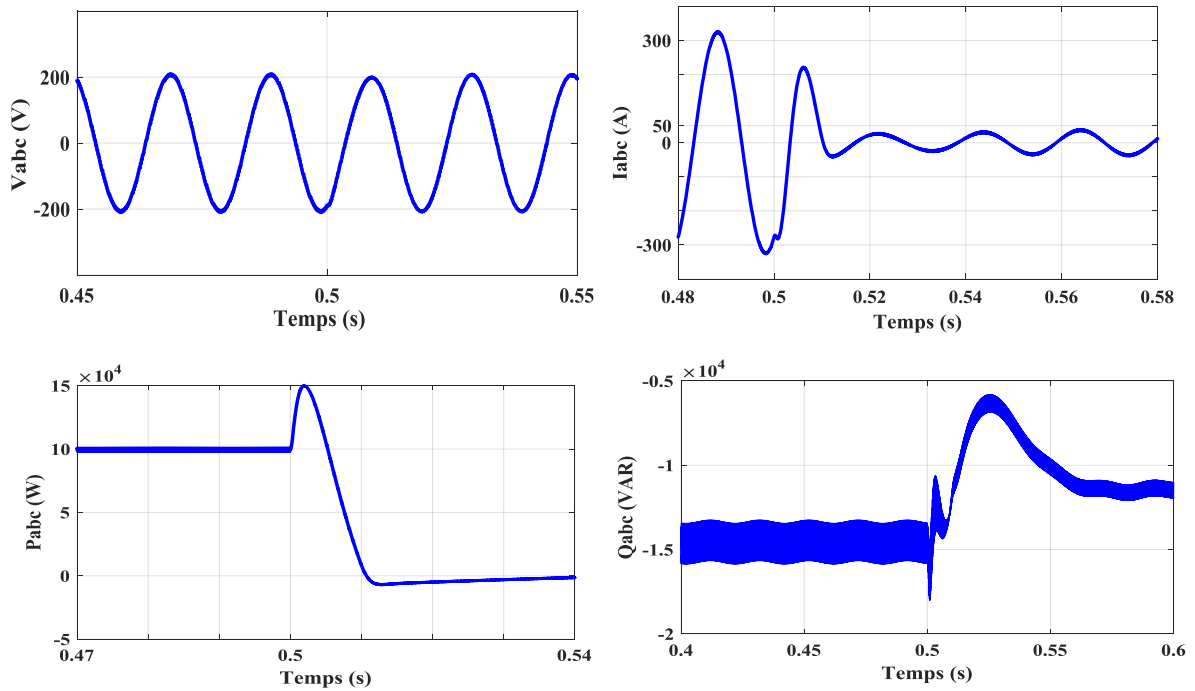


Figure IV.15: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**côté sortie onduleur**)

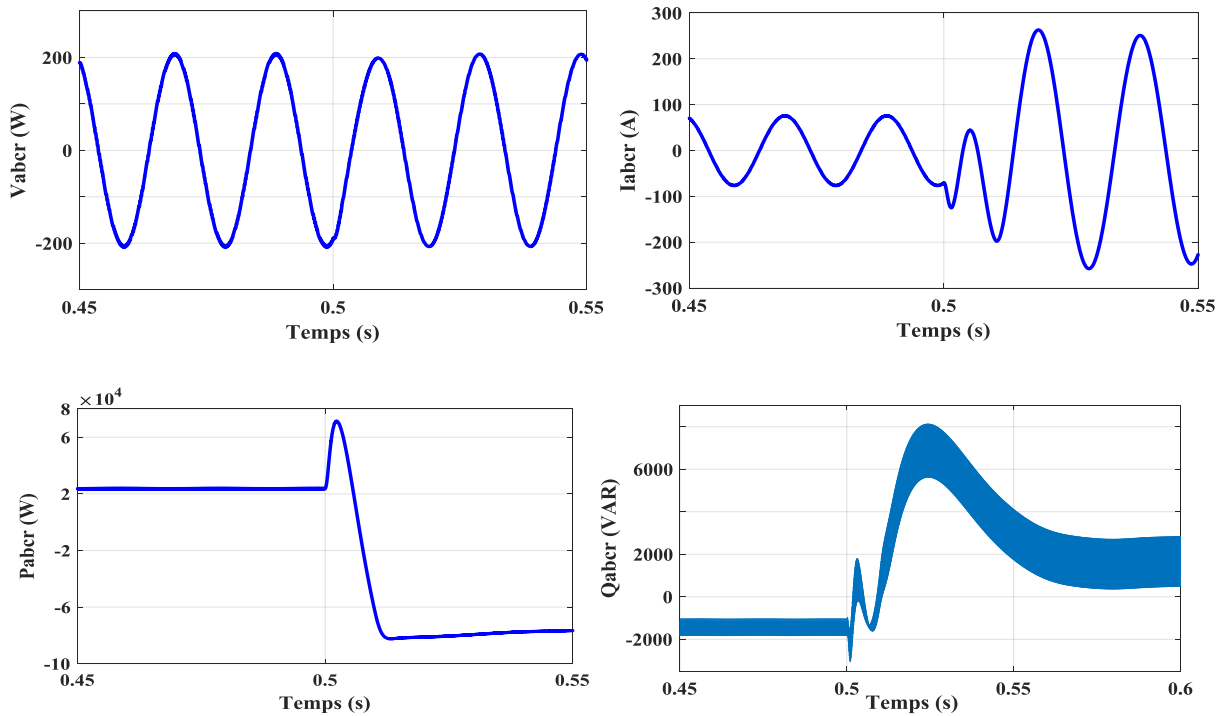


Figure IV.16: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-O sur l'interrupteur de l'hacheur boost (coté réseau)

Remarque : à partir des résultats obtenus dans les graphes précédents nous remarquons ce qui suit :

1-Coté PV : la valeur de la tension V_{pv} augmente à un seuil qui correspond au fonctionnement en défaut. Tandis que l'intensité du courant $I_l = I_{pv}$ s'annule pendant la défaillance du SW de l'hacheur boost, ce qui donne une puissance nulle ($P_{pv} = 0W$).

2- Coté convertisseur DC/DC : la tension de sortie hacheur subit une perturbation, puis se stabilise à une valeur fixe correspondant à la valeur de la tension d'entrée imposée par le fonctionnement de l'onduleur ($V_{dcref} = 500V$) et l'intensité du courant tend vers zéro. Ce qui donne une puissance nulle ($P_{dc} = 0W$).

3-Coté charge: Les grandeurs tension, courant et puissances (actives, réactives) des deux charges sont perturbées à l'instant de présence de défaut, puis se stabilisent à des valeurs qui sont imposées par le réseau et qui assurent le bon fonctionnement des deux charges.

4-Coté onduleur : l'amplitude de la tension de sortie reste constante, l'intensité du courant diminue à une valeur faible due aux effets des filtres d'entrée de l'onduleur. Ce qui donne une puissance active nulle ($P_{ond} = 0W$) et une puissance réactive donnée par le filtre.

4-Coté réseau : l'amplitude de la tension coté réseau reste constante à une valeur imposée par le régime de fonctionnement du réseau. L'intensité du courant augmente à une valeur

correspondante aux intensités imposées par les deux charges. La puissance active et réactive demandées par les deux charges sont assurées par le réseau.

Le défaut de type circuit-ouvert n'a pas un effet destructif sur le système de conversion PV raccordé au réseau, mais il dégrade légèrement les performances du système PV.

B- Effet de défaut court circuit

Nous avons provoqué un défaut de court-circuit sur le SW de l'hacheur boost avec un blocage des séquences de commande **[0 1 0 1]** à l'état **1** à l'instant $t_d=0.5s$. L'évolution des grandeurs tension, courant, puissance active et puissance réactive sont représentés dans les figures suivantes:

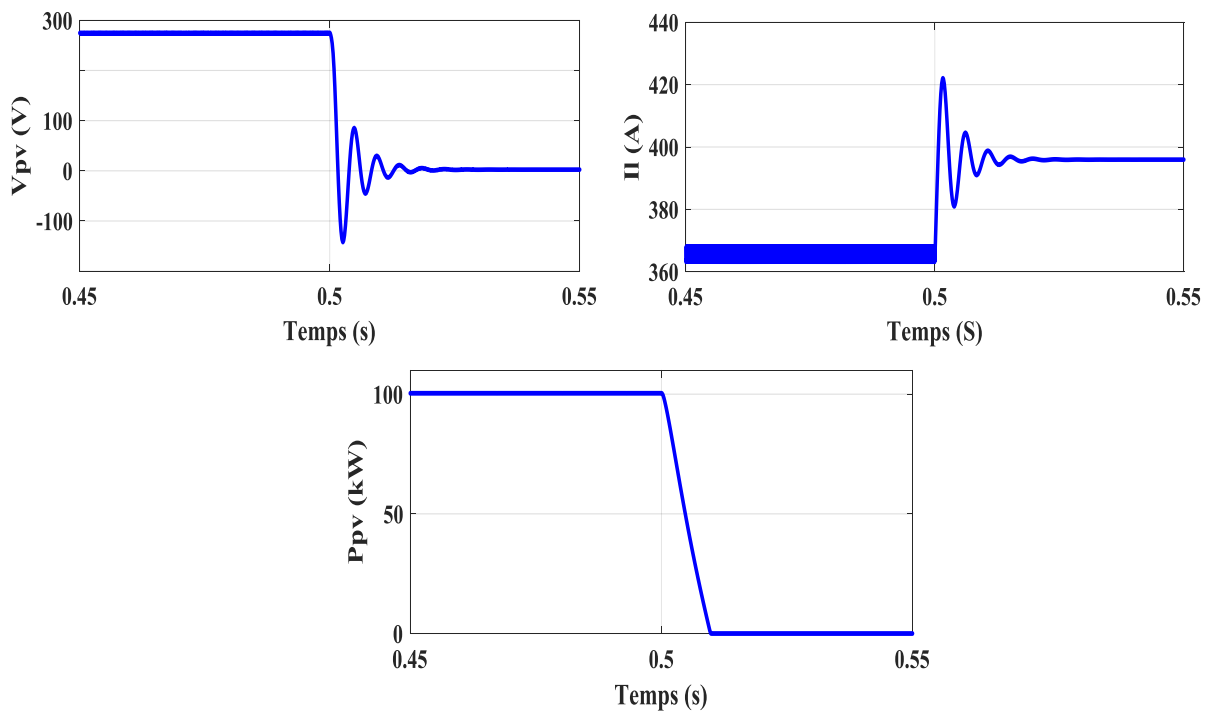
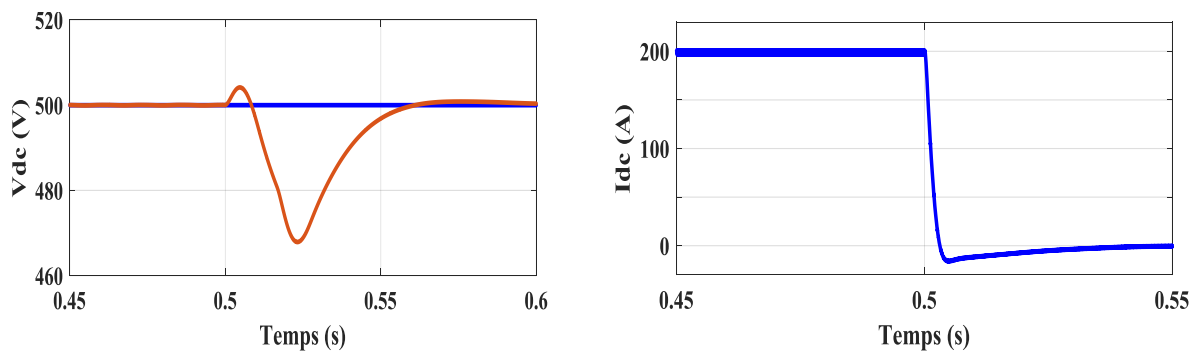


Figure IV.17: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**coté PV**)



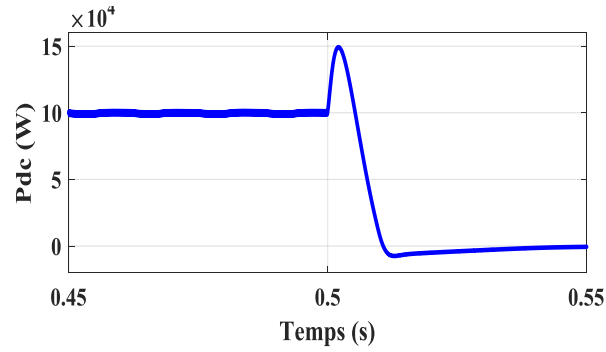


Figure IV.18: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**côté convertisseur DC/DC**)

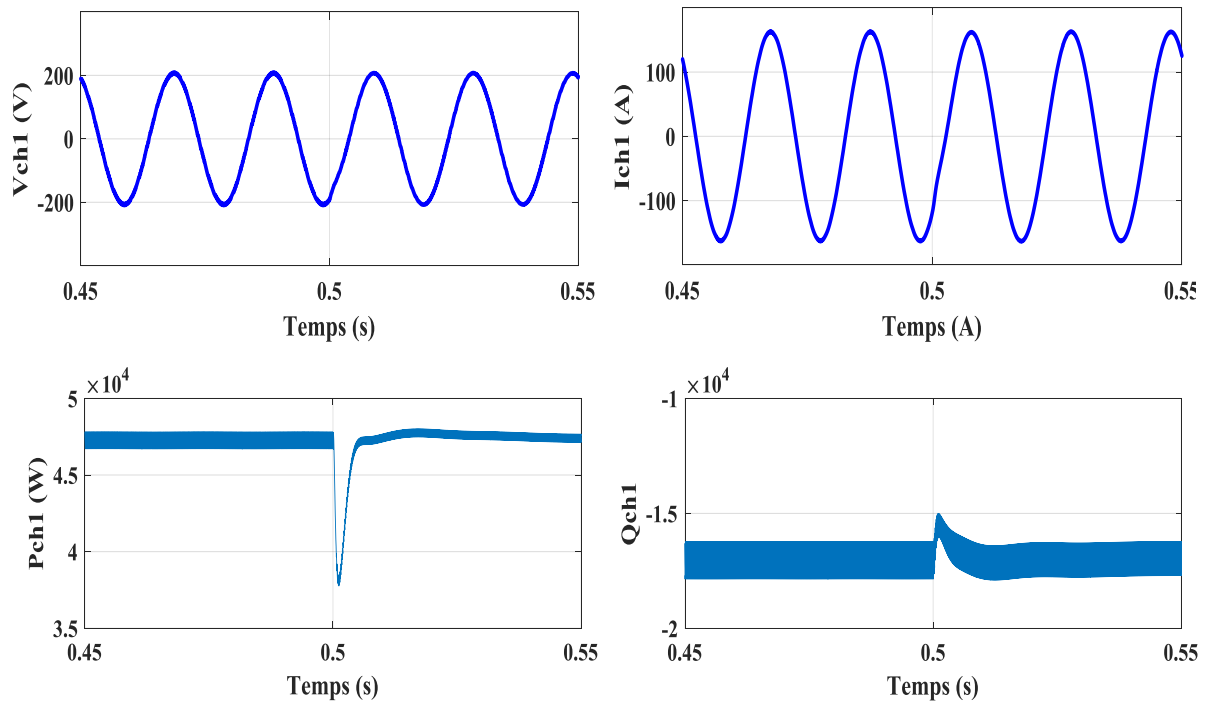
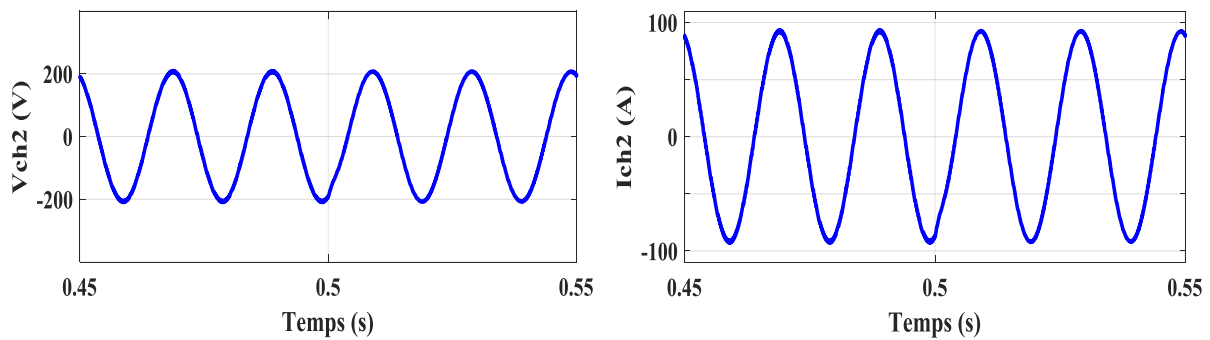


Figure IV.19: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**charge1**)



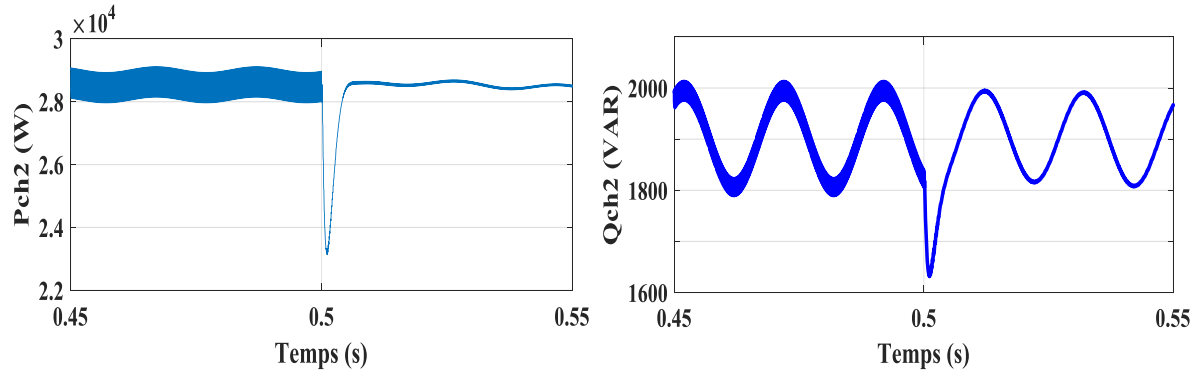


Figure IV.20: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**charge2**)

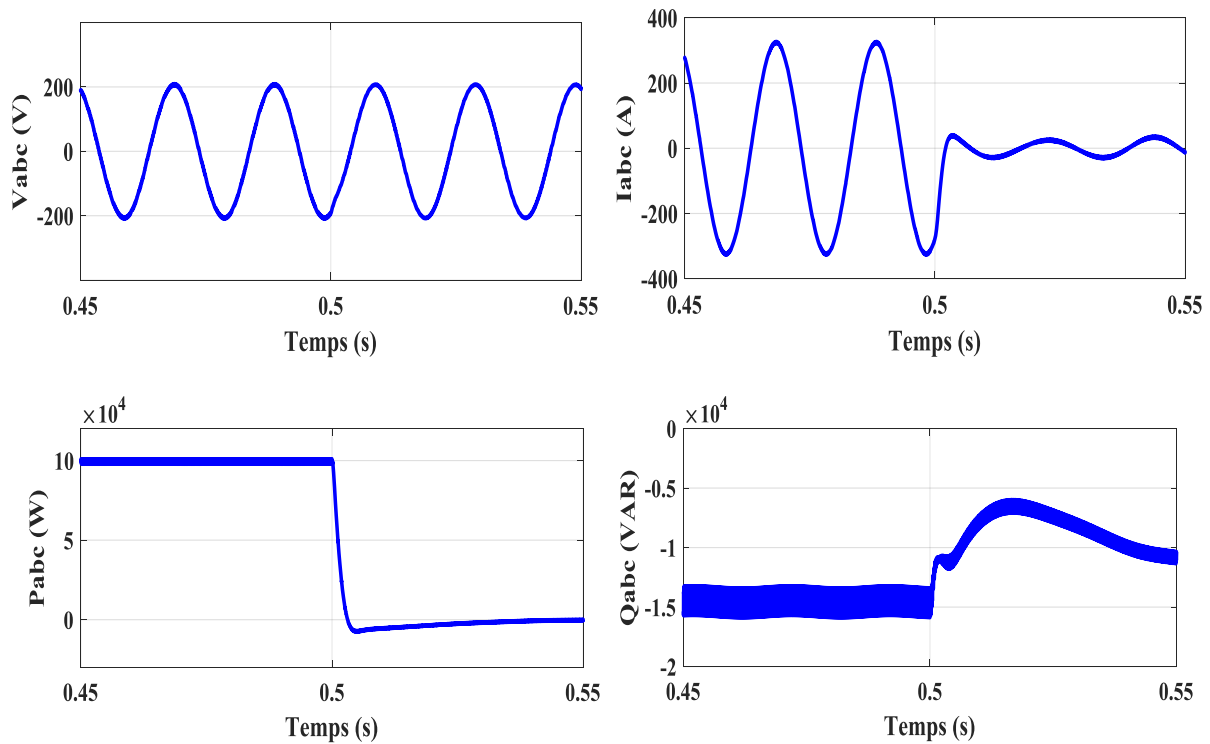
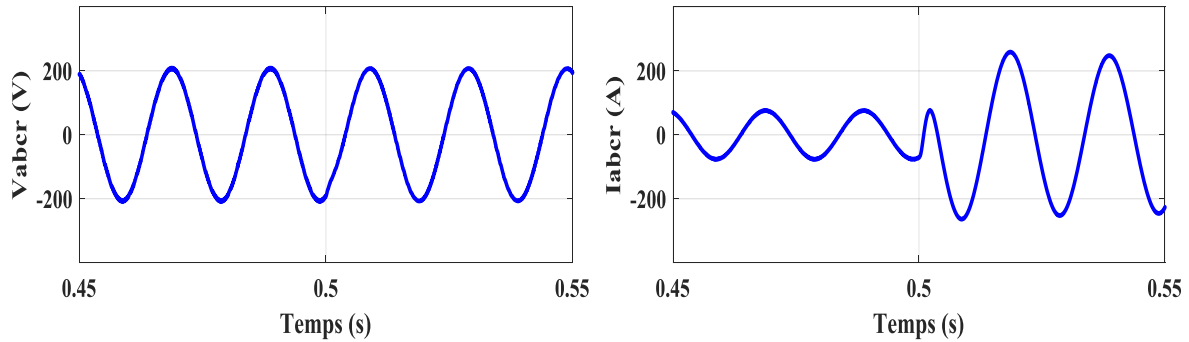


Figure IV.21: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur boost (**côté après onduleur**)



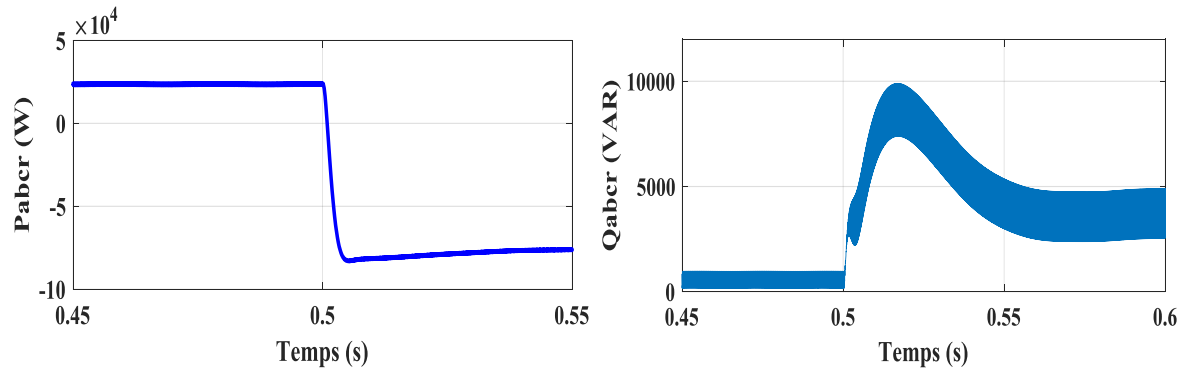


Figure IV.22: Évolution des grandeurs électriques pendant la présence du défaut de C-C sur l'interrupteur de l'hacheur **boost (coté réseau)**

Remarque : à partir des graphes obtenue nous remarquons ce qui suit :

1-Coté PV : la tension V_{pv} diminuée à une valeur nulle (court-circuit au niveau SW). Tandis que l'intensité du courant $I_l = I_{pv}$ augmente et dépasse le courant nominal du système PV. Ce qui donne une puissance nulle ($P_{pv} = 0W$).

2- Coté convertisseur DC/DC : la tension de sortie hacheur subie une perturbation, puis se stabilise à une valeur fixe correspondante à la valeur de la tension d'entrée imposée par le fonctionnement de l'onduleur ($V_{dcref} = 500V$) et l'intensité du courant tend vers zéro. Ce qui donne une puissance nulle ($P_{dc} = 0W$).

3-Coté charge: Les grandeurs tension, courant et puissances (actives, réactives) des deux charges sont perturbées à l'instant de présence de défaut, puis se stabilises à des valeurs qui sont imposées par le réseau et qui assure le bon fonctionnement des deux charges (les charge ne subies aucune déformation).

4-Coté réseau : l'amplitude de la tension coté réseau reste constante à une valeur imposée par le régime de fonctionnement du réseau. L'intensité du courant augmente à une valeur correspondante aux intensités imposées par les deux charges. La puissance active et réactive demandées par les deux charges sont assurées par le réseau.

A cause de l'augmentation excessive de l'intensité du courant coté DC, le défaut court-circuit à un effet destructif sur le système de conversion PV (coté DC).

IV.4 Topologies tolérantes aux défauts des convertisseurs DC/DC pour les installations photovoltaïques

Dans un système photovoltaïque le convertisseur DC/DC a pour rôle d'augmenter la tension de sortie du PV afin d'atteindre la tension requise. Pour être optimaux, les convertisseurs DC/DC

doivent répondre à de nombreuses problématiques dans les installations PV en termes de masse, de volume, d'efficacité énergétique, d'ondulation de courant d'entrée et de tolérance aux défauts. Généralement, un convertisseur DC/DC boost est utilisé pour élever la tension de sortie, et grâce à la commande MPPT d'avoir le maximum de puissance développé par le PV. Cependant l'architecture classique (hacheur simple) de la chaîne de conversion PV qui est largement utilisé présente de nombreux inconvénients, car l'apparition d'un défaut dans le convertisseur DC/DC boost influence le bon fonctionnement de toute l'installation. C'est pourquoi, de nouvelles architectures de convertisseur boost DC/DC ont été proposées afin d'améliorer la fiabilité des chaînes de conversion PV.

IV.4.1 Topologie boost classique non tolérante aux défauts

Généralement, le convertisseur DC/DC boost est utilisé dans les systèmes PV en raison de sa simplicité. L'architecture du convertisseur composée d'une inductance, d'un interrupteur et d'une diode.

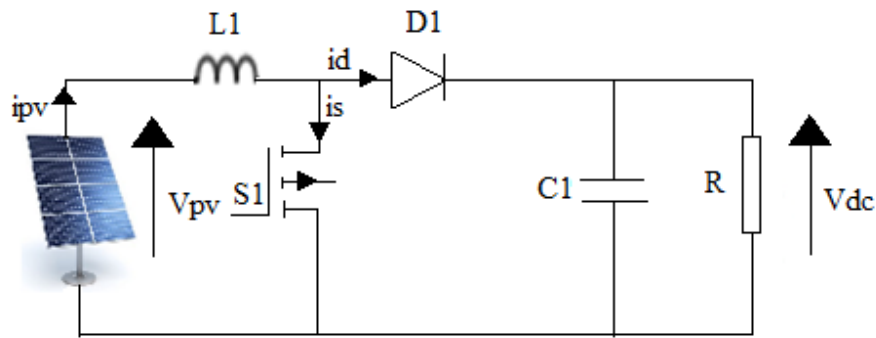


Figure IV.23: Architecture de la topologie boost

Cette topologie est classique c'est-à-dire non tolérante aux défauts. Elle permet d'élever la tension en sortie du PV qui délivre une tension de faible amplitude. Le gain de tension idéale de la topologie boost est le suivant :

$$M(D) = \frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1-D} \quad (IV.1)$$

En prenant en compte la résistance interne RL de l'inductance $L1$, le gain de tension réelle est donné par l'expression suivante

$$M(D) = \frac{V_{dc}}{V_{pv}} = \frac{1}{1-D} \left(\frac{R(1-D)^2}{R(1-D)^2 + RL} \right) \quad (IV.2)$$

Avec

D : rapport cyclique.

R : l'ensemble des charges.

IV.4.2 Topologie tolérantes aux défauts

IV.4.2.1 Utilisation des convertisseurs à trois niveaux

Afin d'améliorer le gain d'élévation de la topologie boost, différentes topologies ont été proposées, parmi ses proposition le convertisseur boost à trois niveaux tolérant aux défauts, utilisé majoritairement dans les applications photovoltaïque.

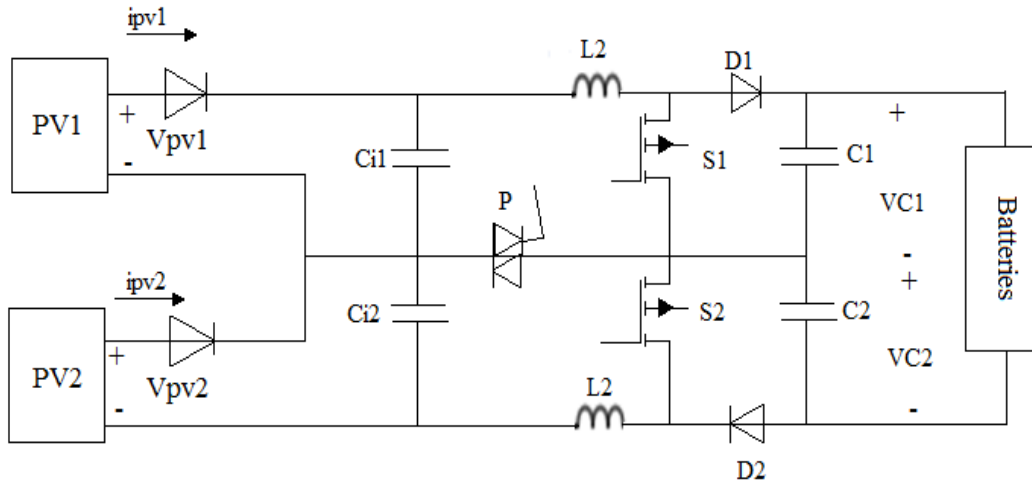


Figure IV.24: Convertisseur boost trois niveaux tolérant aux défauts pour un système photovoltaïque (PV)

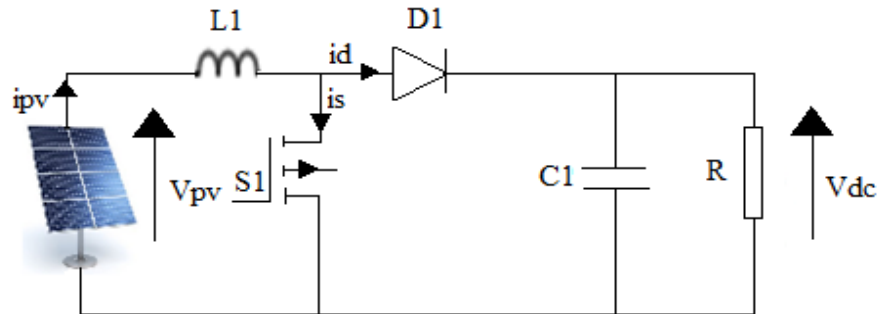


Figure IV.25: Convertisseur DC/DC boost avec l'inductance et diode placée sur le rail positive

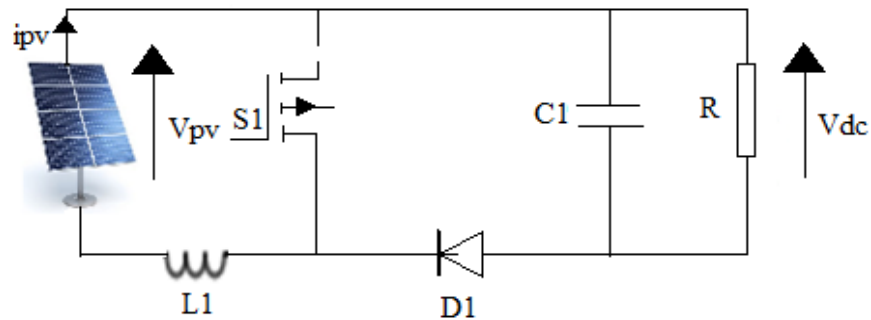


Figure IV.26: Convertisseur DC/DC boost avec l'inductance et diode placée sur le rail négatif

IV.4.2.2 Utilisation des convertisseurs boost entrelacés à 2, 3, 4 phases

Les topologies boost entrelacées permettent d'obtenir des gains d'élévation très élevés comparé à celui d'une topologie boost classique. En travaillant à des rapports cycliques plus faibles, cela permet d'optimiser l'efficacité énergétique de la topologie.

➤ Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé à 2 phases

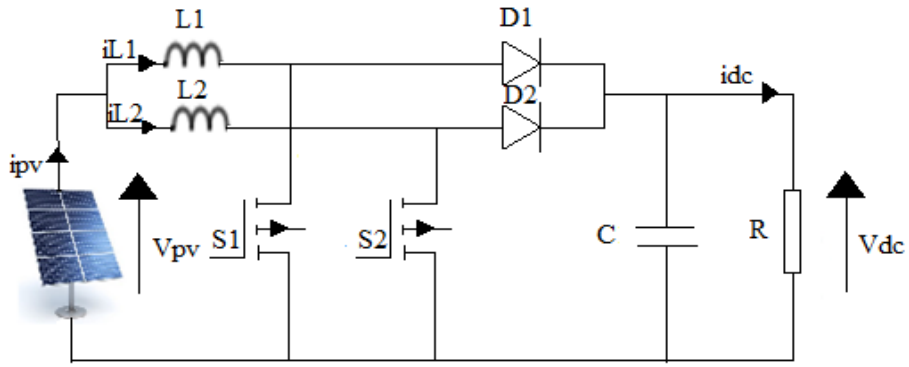


Figure IV.27: Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé 2 phases

Cette topologie est fonctionne comme suit :

Pour $0 < D < 1/2$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} D(1-2D)}{L F_s} \quad (IV.3)$$

Pour $1/2 < D < 1$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (2D-1)(1-D)}{L F_s} \quad (IV.4)$$

➤ Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé à 3 phases

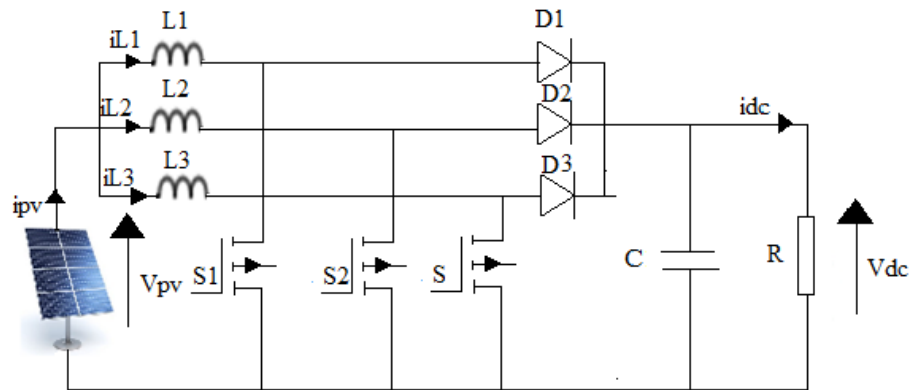


Figure IV.28: Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé 3 phases

Cette topologie est fonctionne comme suit :

Pour $0 < D < 1/3$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (1-3D)D}{L F_s} \quad (IV.5)$$

Pour $1/3 < D < 2/3$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (3D-1)(2-3D)}{3L F_s} \quad (IV.6)$$

Pour $2/3 < D < 1$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (3D-2)(1-D)}{L F_s} \quad (IV.7)$$

➤ **Topologie de convertisseur DC/DC boost entrelacé à 4 phases**

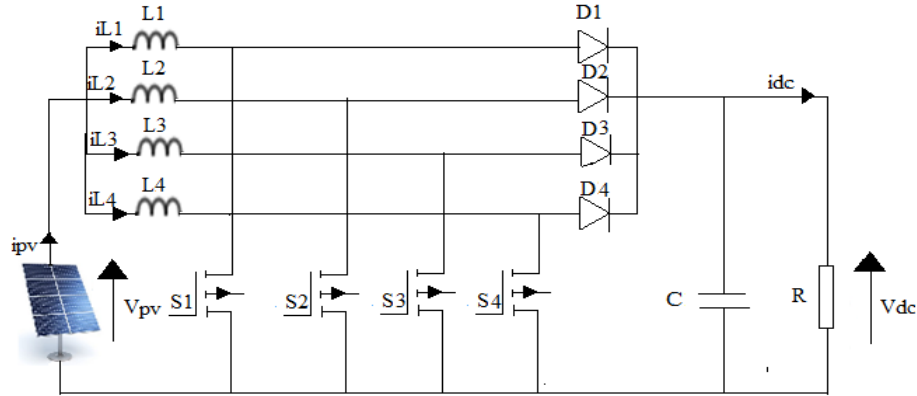


Figure IV.29: Topologies de convertisseur DC/DC boost entrelacé 4 phases

Cette topologie est fonctionne comme suit :

Pour $0 < D < 1/4$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (1-4D)D}{LFS} \quad (IV.8)$$

Pour $1/4 < D < 2/4$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (4D-1)(2-4D)}{4LFS} \quad (IV.9)$$

Pour $2/4 < D < 3/4$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (4D-3)(2-4D)}{4LFS} \quad (IV.10)$$

Pour $3/4 < D < 1$

$$\Delta i_{fc} = \frac{V_{dc} (4D-3)(1-D)}{LFS} \quad (IV.11)$$

IV.5 Modélisation des convertisseurs tolérants aux défauts

Afin de concevoir les contrôles pour des objectifs de performance, des modèles dynamiques appropriés de la topologie sont exigés. Dans un premier temps, les équations relatives au convertisseur sont données pour les deux séquences de fonctionnement représentées. Afin de simplifier l'analyse, nous prenons en compte seulement la résistance parasite de l'inductance R_L . Dans la suite de notre étude, nous avons concentré sur la topologie des convertisseurs DC/DC boost entrelacé à 3 phases

Pour la séquence de fonctionnement ($0 < t < DT_s$)

$$L \frac{di_{L1}}{dt}(t) = V_{pv}(t) - R_L \times i_{L1}(t) \quad (IV.12)$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt}(t) = V_{pv}(t) - R_L \times i_{L2}(t) \quad (IV.13)$$

$$L \frac{di_{L3}}{dt}(t) = V_{pv}(t) - R_L \times i_{L3}(t) \quad (IV.14)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc}(t) \quad (IV.15)$$

Pour la séquence de fonctionnement ($DT_s < t < Ts$)

$$L \frac{di_{L1}}{dt}(t) = V_{pv}(t) - R_L \times i_{L1}(t) - V_{dc}(t) \quad (IV.16)$$

$$L \frac{di_{L2}}{dt}(t) = V_{pv}(t) - R_L \times i_{L2}(t) - V_{dc}(t) \quad (IV.17)$$

$$L \frac{di_{L3}}{dt}(t) = V_{pv}(t) - R_L \times i_{L3}(t) - V_{dc}(t) \quad (IV.18)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{L1}(t) + i_{L2}(t) + i_{L3}(t) - i_{dc}(t) \quad (IV.19)$$

IV.6 Application de la topologie entrelacée 3 phases pour une charge fixe

A- Cas de circuit-ouvert

A l'instant $t=0.1s$ nous provoquons un défaut de circuit-ouvert au niveau de l'IGBT1 (figure IV.28) l'évolution des grandeurs tension et courant, sont représentés dans les figures suivantes:

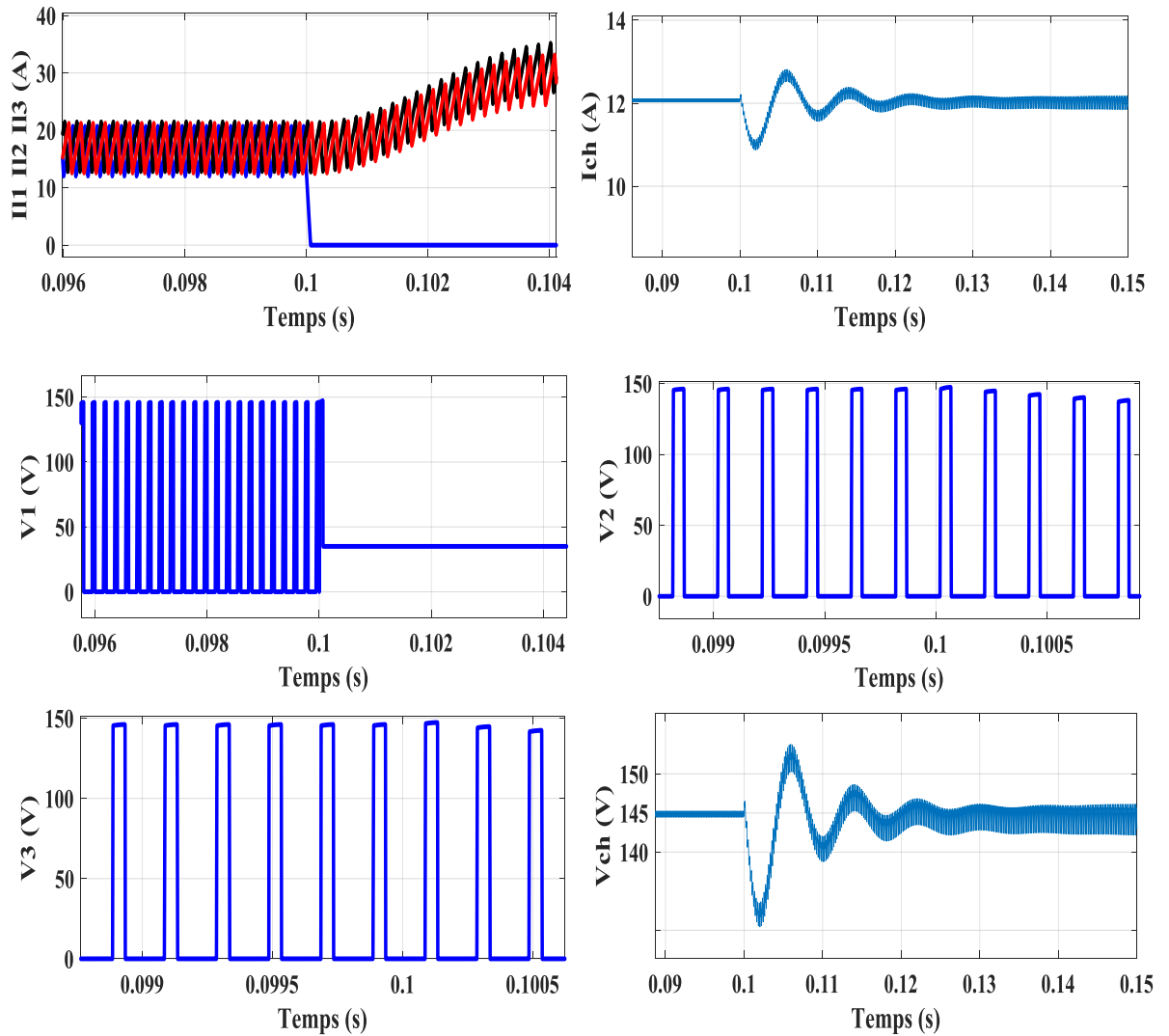


Figure IV.30: Évolution des grandeurs électriques pendant de défaut C-O dans la **phase 1**

Remarques

Selon les résultats de simulation démontrées dans la section précédente, nous pouvons remarqués les points suivants :

- Le courant de la phase en défaut sa valeur tend vers zéro.
- L'intensité des deux autres phases augmente, c'est-à-dire les deux phases partages le courant de la phase en défaut.
- La tension de la phase en défaut tend vers une valeur constante (non hachurée), cette valeur correspondante à la tension imposée par les capacités de filtrage, les deux autres tensions gardent la même forme.
- Les grandeurs courant et tension coté charge présentent une légère perturbation.

Pour un défaut de type circuit-ouvert la charge reste aliment grâce aux deux autres phases (sans défaut). Donc le système peut fonctionner avec présence de défaut C-O

B- Cas de court-circuit

A l'instant $t=0.1s$ nous provoquons un défaut de court-circuit, les figures suivantes montres les résultats obtenus

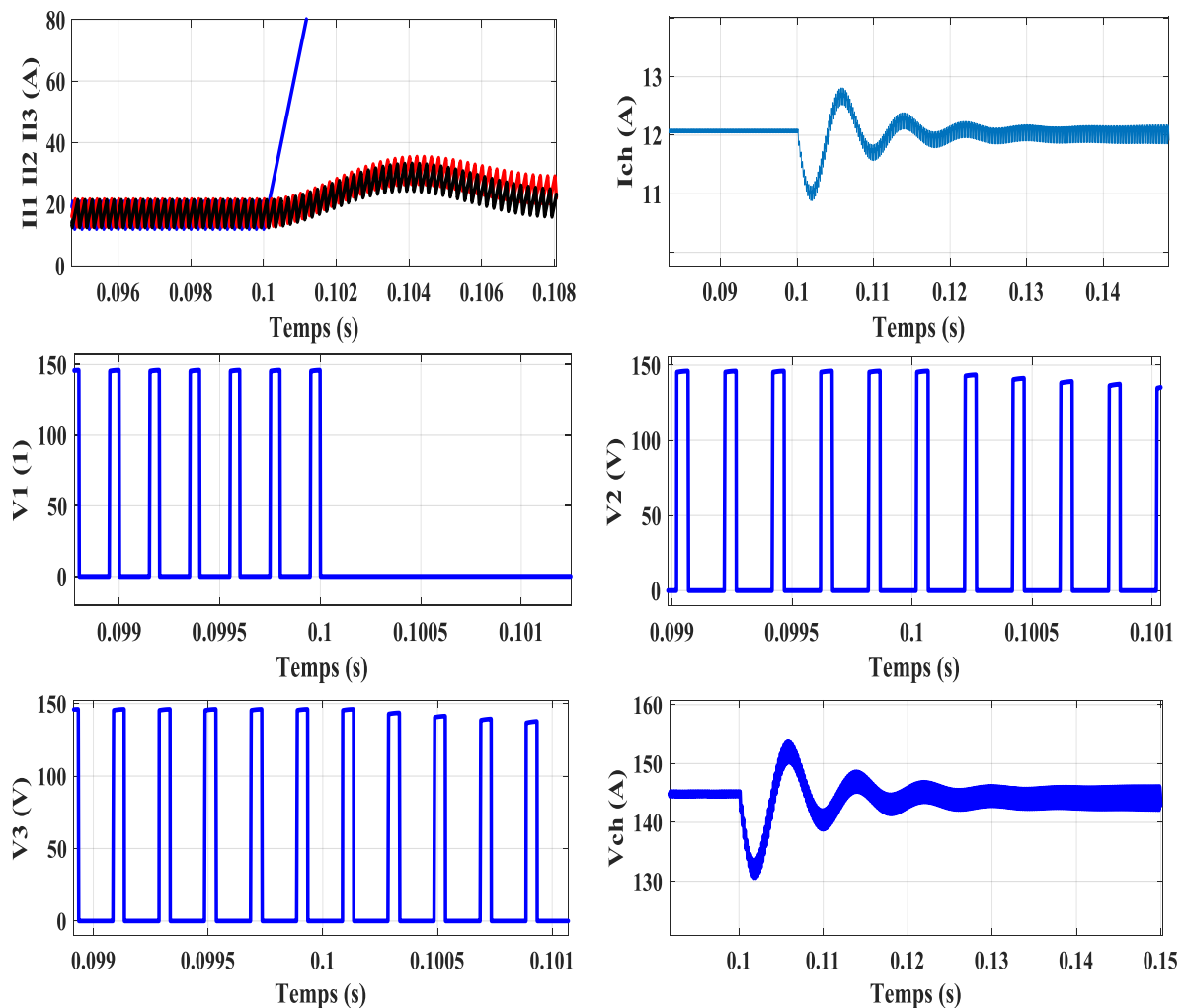


Figure IV.31: Évolution des grandeurs électriques pendant de défaut court-circuit ans la **phase 1**

Remarques

Selon les résultats de simulation démontrées dans la section précédente, nous pouvons remarqués les points suivants :

- Le courant de la phase en défaut augmente excessivement.
- L'intensité des deux autres phases augmente légèrement par rapport au courant de la première phase.
- La tension de la phase en défaut s'annule (effet C-C), par contre les deux autres tensions gardent la même forme.
- Les grandeurs courant et tension coté charge présentent une légère perturbation.

Pour un défaut de type court-circuit la charge reste aliment grâce a son impédance. Mais, dans le cas où le défaut de C-C persiste le courant engendre des dégâts sur les composants du système de conversion PV.

IV.7 Méthode proposée pour l'isolation du défaut de type C-C

Suite aux résultats de simulation démontrées dans la section précédente, nous pouvons conclure que le défaut C-O ne provoque aucune anomalie sur le fonctionnement du système PV, mais peut dégrade leurs performances. Par conte le défaut C-C provoque des anomalies sur le fonctionnement du système PV. Ce type de défaut est destructif et non souhaitable pour le fonctionnement des systèmes de conversion PV. Alors, il est obligatoire d'installer des moyens de protection et d'améliorer les topologies des convertisseurs DC-DC pour protéger les systèmes PV contre ce type de défaut. Les topologies entrelacées (2, 3, 4,...) jouent un rôle très important pour l'amélioration des performances des systèmes PV et sont considérées des topologies tolérantes aux défauts interrupteurs.

Dans la suite, notre idée est basée sur le choix de la topologie entrelacée à trois phases.

A fin d'isolé le défaut de type C-C une méthode de reconfiguration a était mise en place se basant sur les étapes suivantes :

- La mesure des trois courants de phases (i_{L1} , i_{L2} , i_{L3}).
- Le choix de la valeur du courant I_s (courant de seuil). Cette valeur dépend aux valeurs des courant de charge au régime de fonctionnement nominal $I_s > i_{L1}$, i_{L2} , i_{L3} afin d'évité les fausse alarme et les déclenchements intempestifs.
- Le maintien de la séquence fermeture (sans défaut) et la séquence ouverture (avec défaut) des interrupteurs de reconfigurations (voir figure IV.33).

La méthode proposée pour la détection et la location des défauts est représentée dans la figure IV.32.

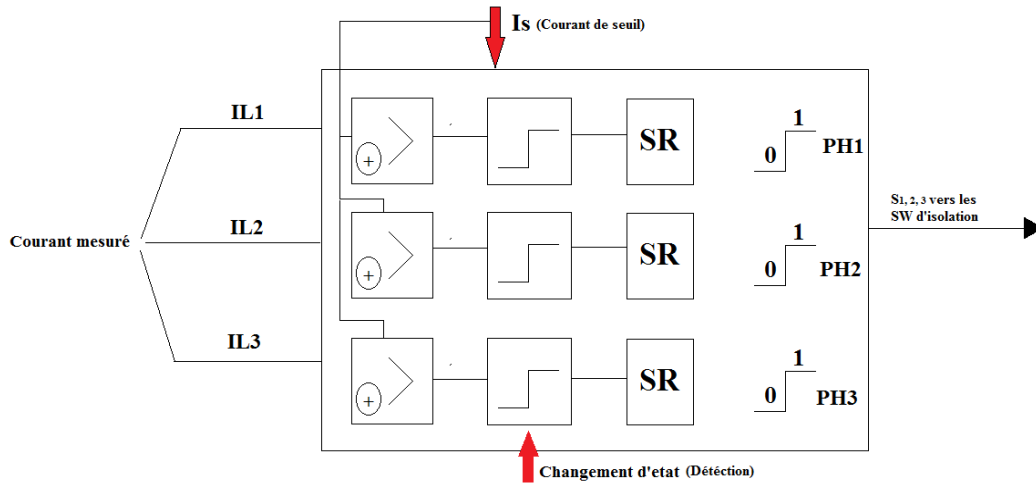


Figure IV.32: Algorithme de la méthode de reconfiguration

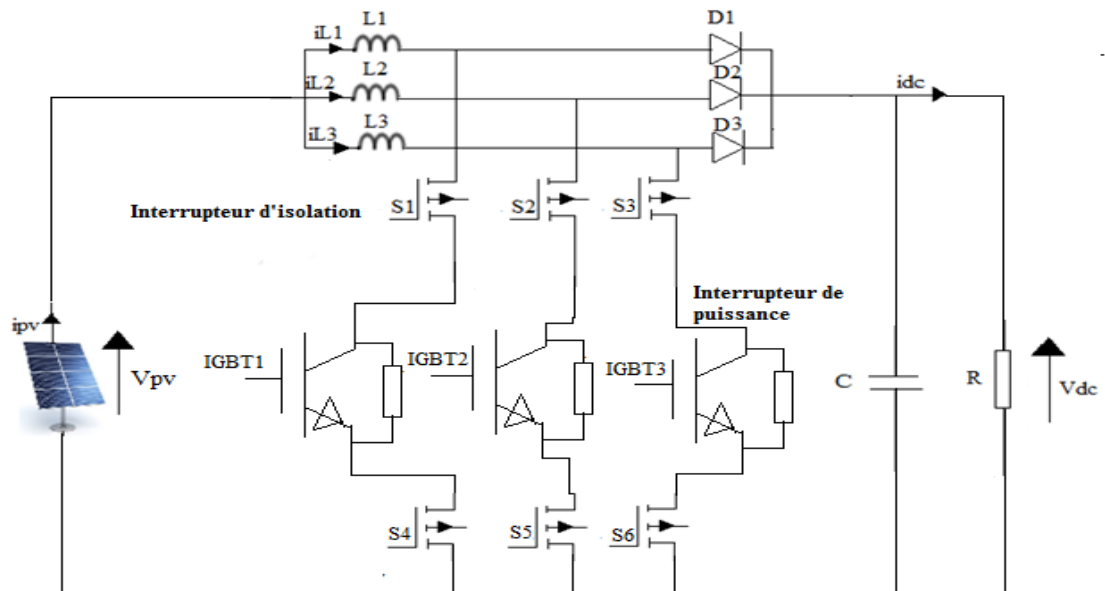
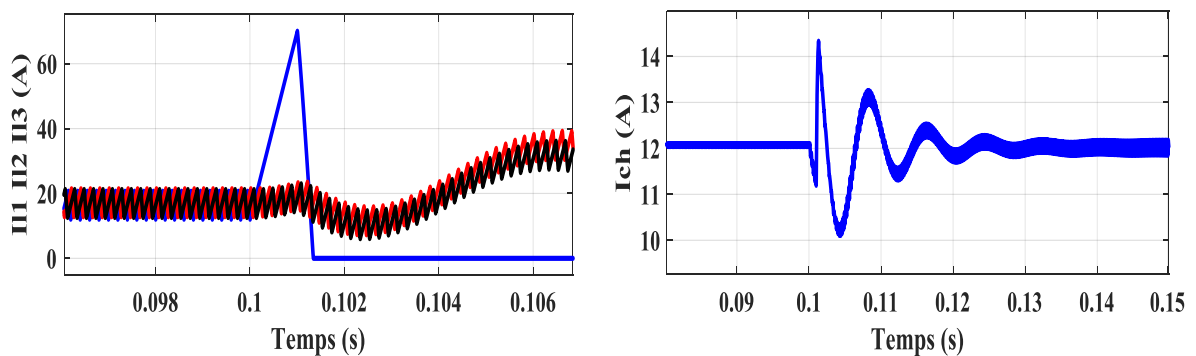


Figure IV.33: Schéma de reconfiguration

Les résultats de simulation sont représentés dans les figures suivantes :



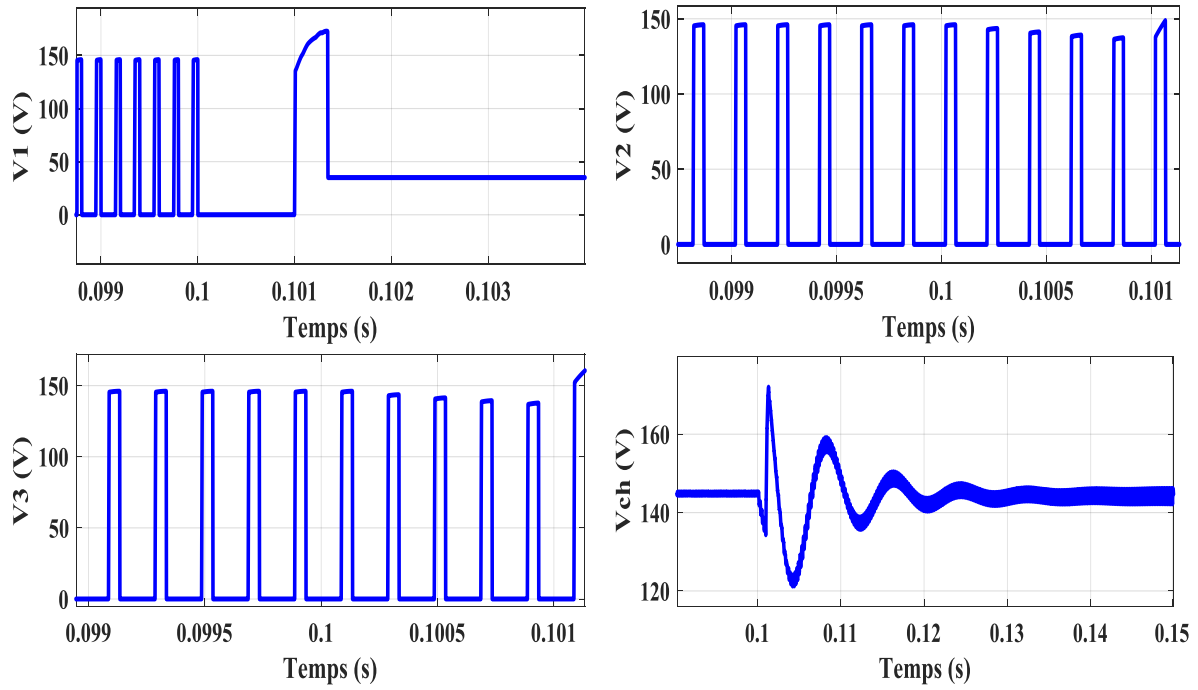


Figure IV.34: Évolution des grandeurs électriques pendant le défaut C-C dans la **phase 1**

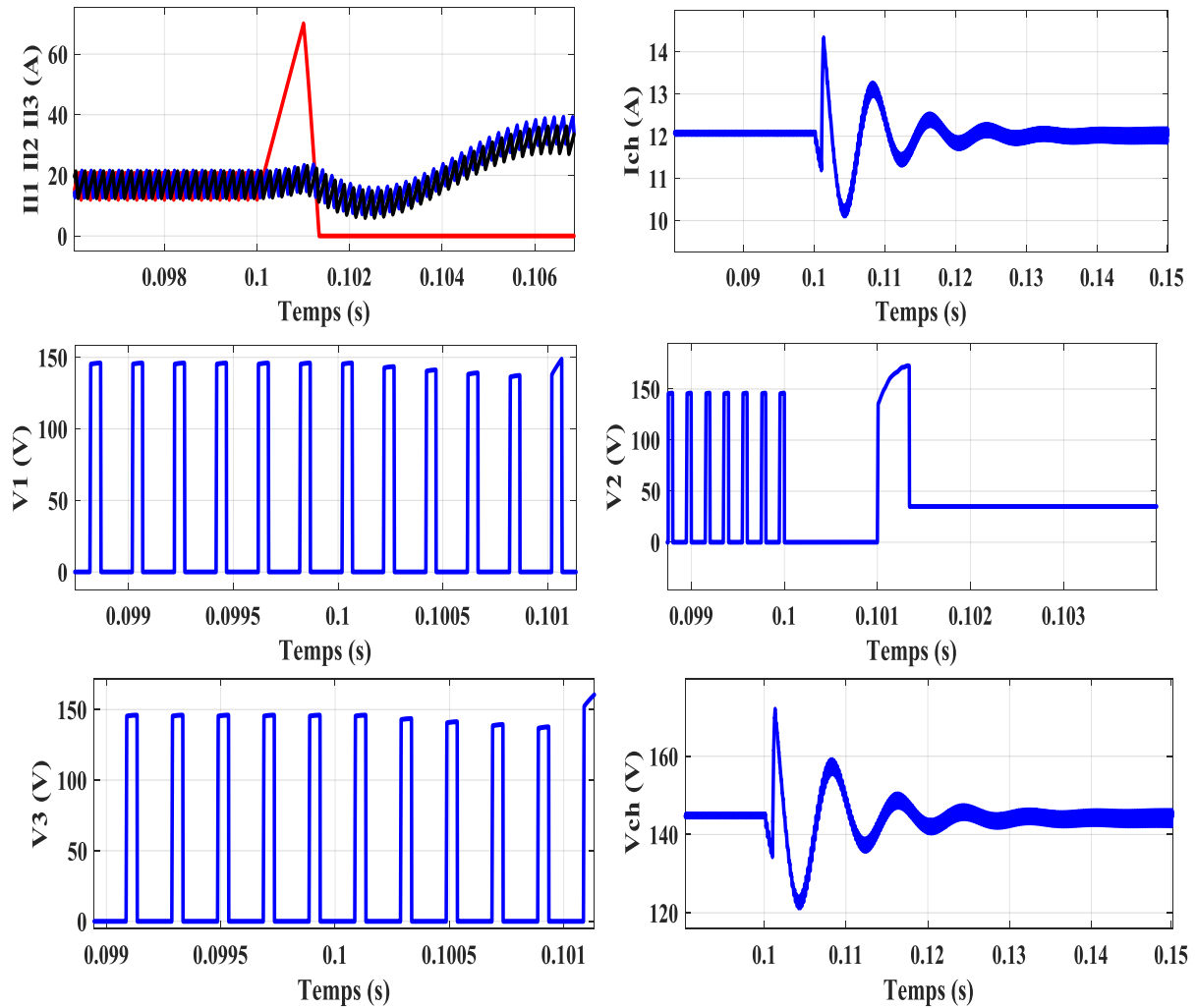


Figure IV.35: Évolution des grandeurs électriques pendant de défaut C-C dans la **phase 2**

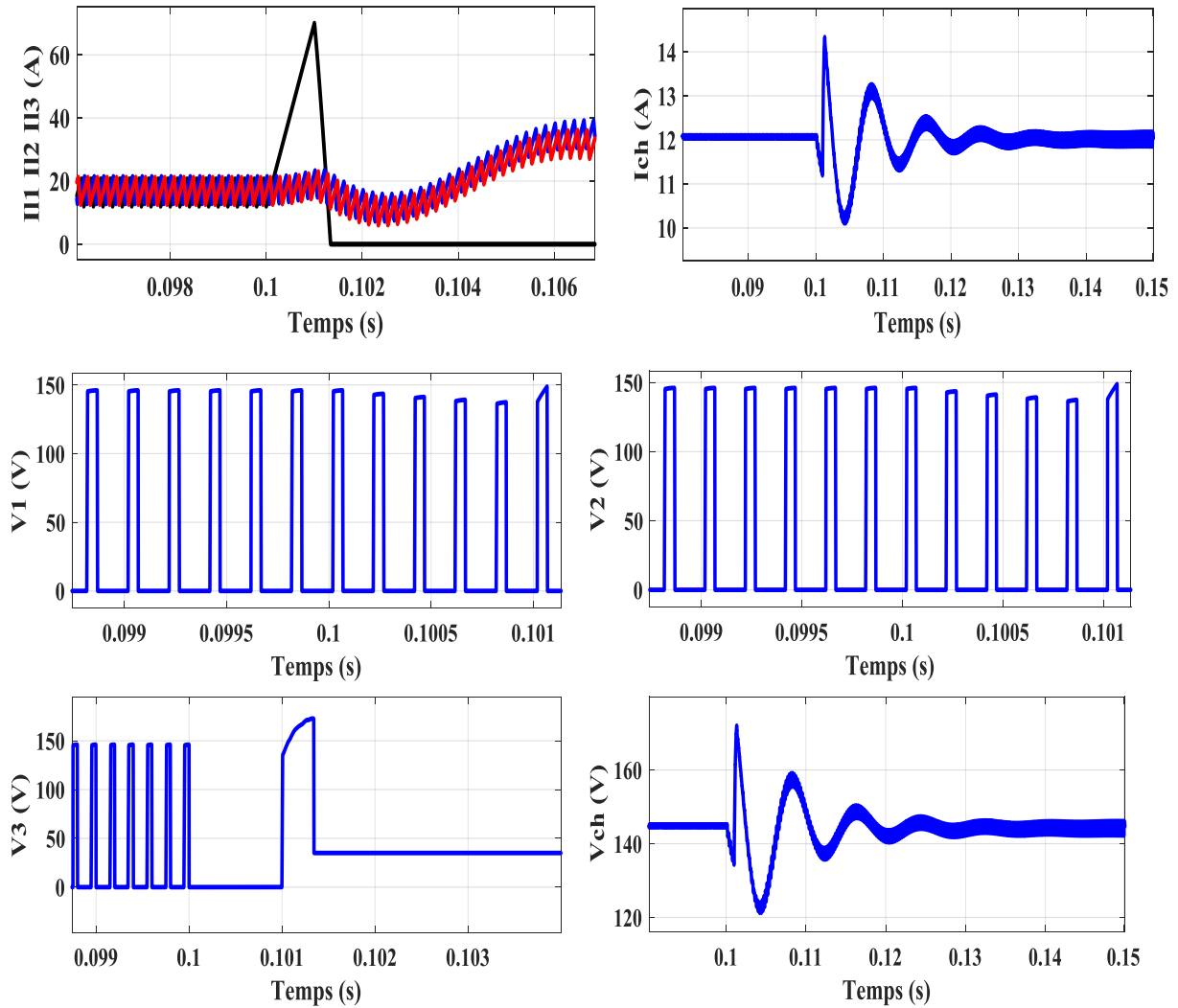


Figure IV.36: Évolution des grandeurs électriques pendant le défaut C-C dans la **phase 3**
 Dans les figures précédentes nous pouvons remarquer qu'après le défaut C-C le système PV fonctionne correctement malgré la présence de défaut C-C.

IV.8 Reconfiguration du système PV relié au réseau moyenne tension

La méthode de diagnostic proposée est celle démontrée dans la figure IV.32. L'algorithme de cette méthode est intégré dans le système que nous avons choisi pour la validation de la topologie entrelacée à trois phases utilisée dans les systèmes PV raccordés aux réseaux électriques.

Après avoir tester l'efficacité et les performances de la méthode de reconfiguration sur une charge fixe, nous avons appliqué cette dernière sur les systèmes photovoltaïques raccordés aux réseaux moyenne tension.

Nous provoquons un défaut de type C-C à l'instant $t_d=0.1s$ sur l'interrupteur-1 (SW1).

Les résultats de simulation sont illustrés dans les figures ci-dessous :

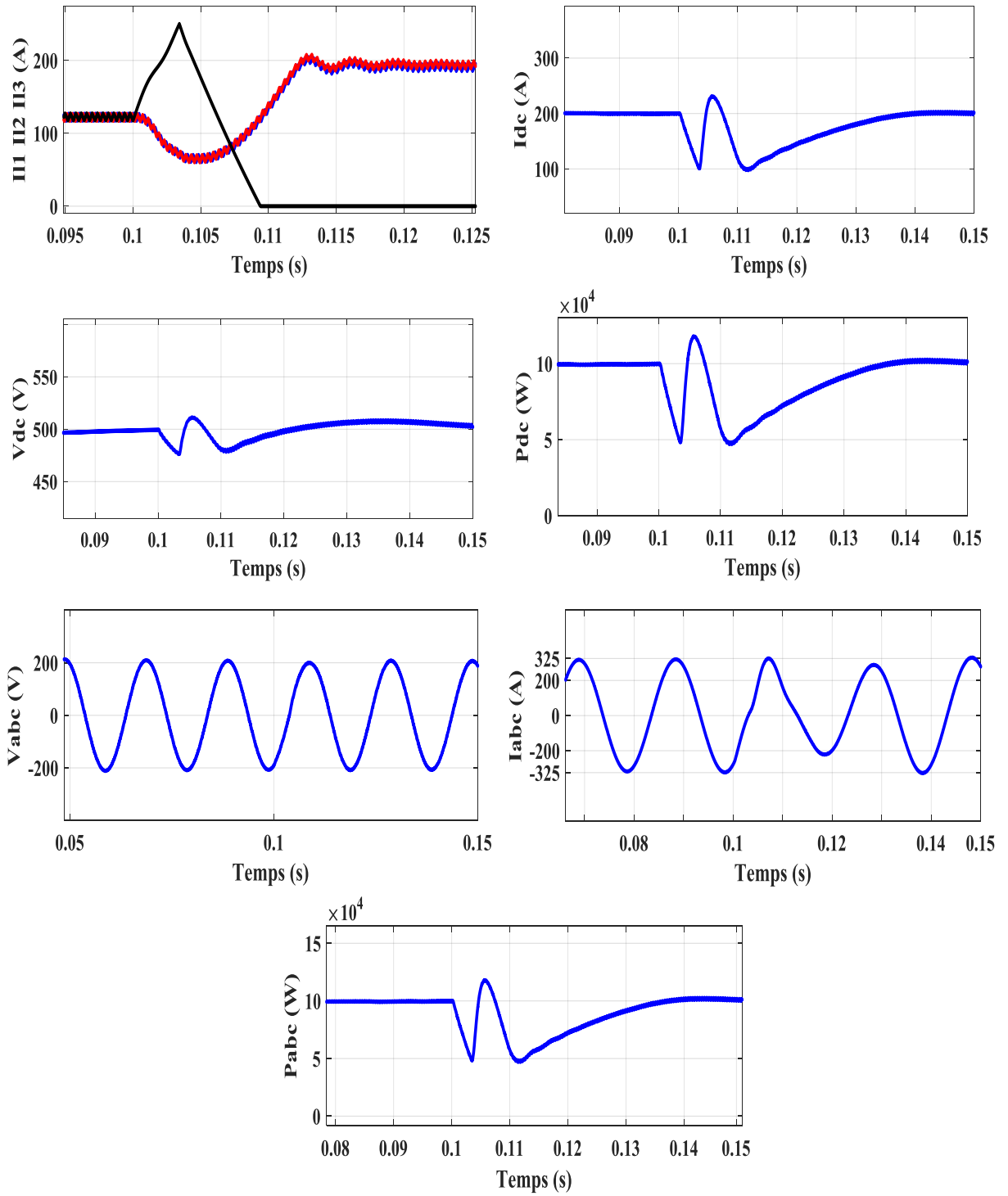


Figure IV.37: Évolution des grandeurs électrique pendant le défaut C-C dans la **phase 1**

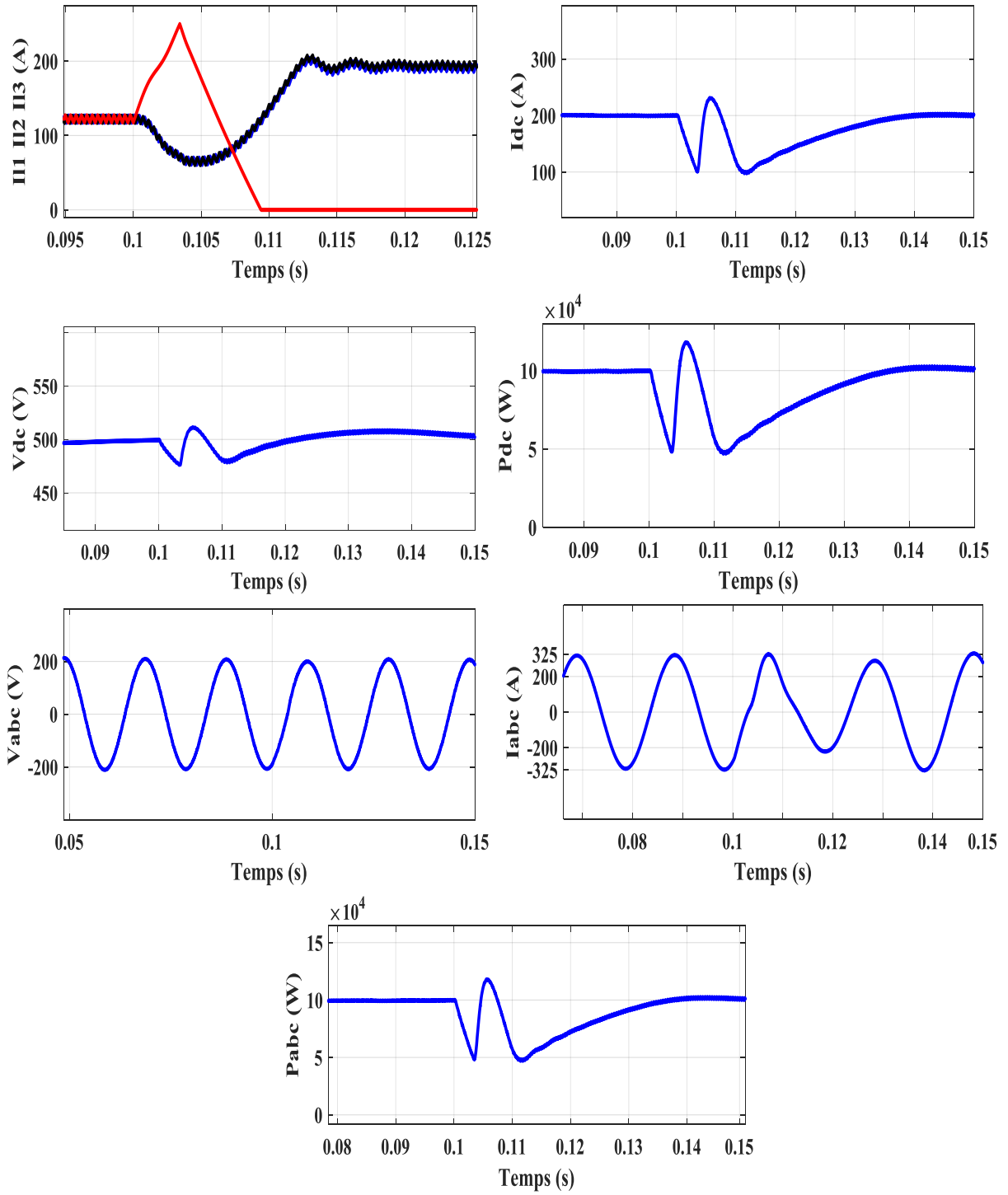
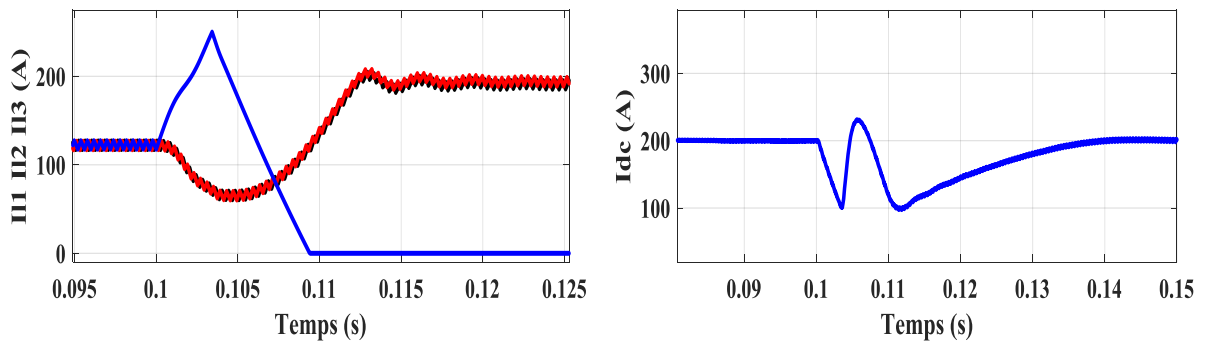


Figure IV.38: Évolution des grandeurs électrique pendant le défaut C-C dans la **phase 2**



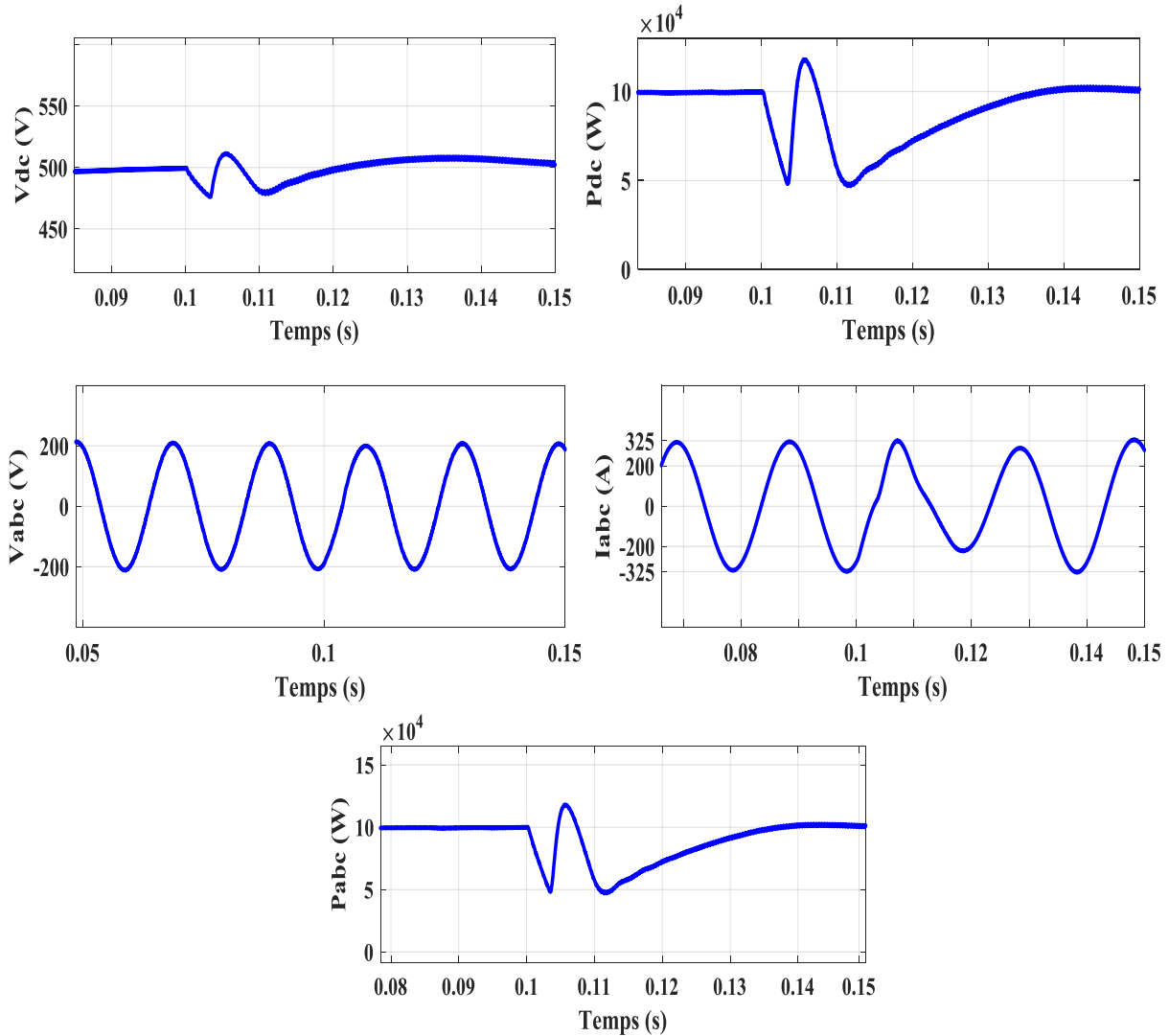


Figure IV.39: Évolution des grandeurs électrique pendant le défaut C-C dans la **phase 3**

Les résultats de simulation en régime permanent et en présence de défaut de court-circuit.

Selon les grandeurs courant, tension et puissances relevés aux points essentiels de notre système, nous pouvons remarqués ce qui suit :

- Le défaut C-C à été détecté
- Après l'instant $t_d=0.1$ le courant de la phase en défaut commence a augmenté rapidement jusqu'a atteindre la valeur du courant de seuil I_s , et là le défaut est détecté à l'instant $t_{det}=0.1010055s$ (ph1).
- Le signal de détection sera envoyé à la phase de maintien pour assurer la reconfiguration.
- Après le maintien du signal de défaut, un autre signal sera envoyé aux interrupteurs de reconfiguration pour ouvrir les deux interrupteurs d'isolation en avant et en amant du SW.

On reproduisant le défaut C-C sur les deux autres phases, nous remarquons le même comportement reproduit sur les formes des grandeurs électriques de la phase 1.

Le tableau IV.4 résume le temps de détection t_{det} et le temps de reconfiguration t_{rec} calculés en cas de présence d'un défaut de type C-C sur l'une des trois phases de la topologie choisie.

Phase	td (s)	t_{det} (s)	t_{rec} (s)	Δt_{det}	Δt_{rec}
1	0.1	0.1010055	0.101343	1.0055 ms	0.3375 ms
2	0.1	0.1008585	0.101197	0.8585 ms	0.3385 ms
3	0.1	0.1009305	0.101268	0.9305 ms	0.3375 ms

Tableau IV.4: Temps de détection et de reconfiguration de défaut C-C

IV.9 Conclusion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté une méthode qui permet de détecter et d'isoler les deux types de défauts fréquents et communs dans les convertisseurs statiques DC/DC d'un système photovoltaïque raccordé aux réseaux électriques.

La topologie proposée du convertisseur DC/DC entrelacée (Hacheur boost) est utilisée dans les systèmes PV, pour la prévision des défauts qui diminuent la sûreté de fonctionnement.

Les résultats obtenus par simulation ont montrés l'efficacité de la méthode proposée. Aussi cette méthode est tolérante aux défauts, assure la continuité et le bon fonctionnement du système PV.

Conclusion générale

Dans le cadre du travail de projet de fin d'études, on s'est principalement intéressé au diagnostic des défauts de type circuit-ouvert et court-circuit dans les convertisseurs DC/DC utilisés dans les systèmes de production d'énergie photovoltaïque raccordés aux réseaux électriques.

L'objectif est de développer un système de détection, de localisation et de reconfiguration qui permet d'éliminer ou de diminuer l'impacte des défauts considérés et aussi pour assuré le bon fonctionnement de l'installation photovoltaïque, en respectant les contraintes technico-économiques.

La méthode de détection et de localisation des défauts définie dans notre travail, présente beaucoup d'avantages :

- L'algorithme de détection et de reconfiguration des défauts est basé sur la mesure des courants au niveau inductances, chose qui est faisable sur les montages hacheurs,
- Temps de détection des défauts est très court,
- L'algorithme de détection et de reconfiguration des défauts est basé sur des calculs simples (comparateur et dispositif de maintien),
- Méthode efficace, fiable et robuste (valider par simulation),
- Elle permet de détecter les deux types de défauts étudiés (circuit-ouvert et court-circuit) est cela grâce aux seuils choisis

Ces avantages sont accompagnés par des inconvénients sur l'augmentation du coût de l'installation PV et sur le dimensionnement des composants d'électronique de puissance.

La méthode proposée a été validée par simulation numérique avec l'utilisation du logiciel MatLab/Simulink, et les résultats obtenus ont montrés son efficacité et son robustesse. Cette méthode assure la continuité de service et sûreté de fonctionnement des systèmes PV raccordé aux réseaux électriques en cas de dysfonctionnement dans le système de conversion PV, notamment en cas de défauts de circuit-ouvert ou court-circuit dans les interrupteurs d'électroniques de puissance (IGBT) du convertisseur statique DC-DC.

Surtout cette solution est coûteuse, mais très efficace pour garantir la continuité de fonctionnement des systèmes photovoltaïques.

Comme perspectives nous souhaiterons

- La mise en pratique de la méthode proposée pour valider les résultats de simulation obtenus.
- L'utilisation des convertisseurs DC/DC multi niveaux dans les systèmes PV pour augmenter le niveau de tension DC.
- Utiliser des méthodes généraliser pour le diagnostic des défauts sur l'ensemble des composants de la chaîne de conversion photovoltaïque raccordée au réseau électrique.

Bibliographie

- [1] Angel Cid Pastor " Conception et réalisation de module photovoltaïque électrique ".
 - [2] Belaout Abdesslam " Etude et diagnostique des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïque par emplois de la caractéristique courant -tension ".
 - [3] Monica Kokrdova "L'énergie solaire ".
 - [4] Hafian Hicham " Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire pilote par dS PACE 1103 ".
 - [5] Halouane Assia " Modélisation du transfert radiatif dans les startes supérieurs d'un module photovoltaïque ".
 - [6] Lahlou Samir " Détection et localisation des défauts des convertisseurs statique dans un système photovoltaïque raccorde au réseau moyenne tension ".
 - [7] Missoum Mohamed " Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique en Algérie ".
 - [8] Boukhers Djamil " Optimisation d'un système d'energie photovoltaïque application au pompage ".
 - [9] Merabet Abd El Hak " Dimensionnement d'un système d'alimentation en énergie électrique par voie photovoltaïque pour l'alimentation d'une habitation ".
 - [10] Stéphane Vighetti " Systèmes photovoltaïques raccordes au réseau : choix et dimensionnement des étages de convertisseur ".
 - [11] Photovoltaïque-énergie .fr
 - [12] Khenfer Riad " Détection et isolation de défaut combinant des méthodes a base de données appliquées aux systèmes électro-énergétique ".
 - [13] Mouassane Souhila . Kiciri Sofiane " Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batterie ".
 - [14] Khadir Hamza " Intégration d'un champ photovoltaïque de production de l'énergie électrique dans un réseau électrique basse tension".
 - [15] Long Bun "Détection et localisation de défaut dans un système photovoltaïque ".
-

- [16] Y.Pankow " Etude de l'intégration de la production décentraliser dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque ".
 - [17] A novel system architecture to extract maximum energy from photovoltaic ".
 - [18] MeddourYoucef. Yazi Zoubir " Etude de raccordement d'un système photovoltaïques au réseau électrique ".
 - [19] Matallah Soraya "Dimensionnement et simulation d'un système photovoltaïque pour alimenter un habita dans la wilaya de Ourgla ".
 - [20] Belkacem Mourad " Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) ".
 - [21] Touaref Mostafa "Etude et simulation d'un convertisseur AC\DC type buck (abaisseur de tension) ".
 - [22] Nettari Yakoub " Commende robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC.
 - [23] Achour Abderraouf "Analyse et commende d'un hacheur Buck-Boost ".
 - [24] Boukaroura Abdelkader " Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par approche Bond-Graph ".
 - [25] Chebabhi Ardjouna " Etude d'identification et localisation des défauts d'un générateur photovoltaïque ".
 - [26] Lazari Lyes. Mebarki Nasser-eddine " Étude d'un système photovoltaïque ".
-

Annexe A

Philosophie du MPPT

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur de point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracker) est utilisé pour contrôler les variations de la caractéristique courant tension des cellules.

Nous avons vu dans la présentation des cellules la caractéristique d'une cellule, et l'évolution de cette caractéristique en fonction de l'éclairement ou de la température. Le terme MPPT (Poursuite du Point de Puissance Maximale) désigne le moyen trouver, pour se placer sur le point maximum de la caractéristique en puissance, et de pouvoir y rester quelles que soient les variations de température, ensoleillement ou autre.

Pour avoir la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque et la charge et produire la meilleure puissance, le Maximum Power Point Tracking (MPPT) a été développé depuis 1968, ces genres de contrôleurs forcent le générateur à travailler à son Maximum Power Point (MPP) induisant une amélioration du rendement du système.

Approche MPPT

Nous allons citer les différentes approches du MPPT actuellement utilisé dans les installations PV.

Approche Perturbe and Observe

Algorithme le plus répandu, Perturbe and Observe (P&O) repose sur la perturbation [ici une augmentation ou une diminution] de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P=VI$).

Explication en utilisant la perturbation de V_{ref}

Si $dP = (P_k - P_{k-1}) < 0$ et

Si $dV_{ref} = (V_{ref, k} - V_{ref, k-1}) < 0$,

On augmente V_{ref} .

Si $dV_{ref} > 0$,

On diminue V_{ref} .

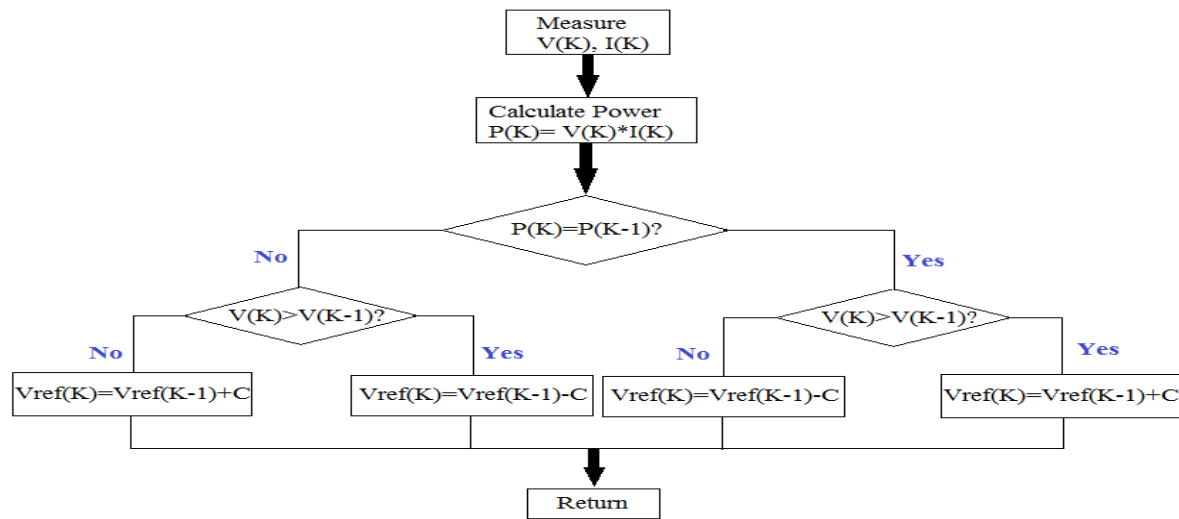
Si $dP > 0$ et

Si $dV_{ref} < 0$,

On diminue Vref.

Si $dV_{ref} > 0$,

On augmente Vref.



Approche Open- and Short-Circuit

Cette méthode de détermination du MPP (Maximum Power Point) est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit (short-circuit current) ou de la tension de circuit ouvert (open circuit voltage) ainsi que sur l'utilisation de courbes Courant-tension prédéfinies. C'est sur ces dernières qu'est lue la valeur optimale pour la tension ou le courant.

Approche Incrémental Conductance

Cette approche se base sur l'observation de dP/dV . Lorsque cette dernière quantité atteint 0, cela signifie que la puissance extraite est sur l'unique extremum de la courbe et par conséquent au maximum de puissance extractible.