



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA -

المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -

(Ex ESTI)

DEPARTEMENT SECOND CYCLE

MEMOIRE

PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

INGENIEUR D'ETAT

FILIERE

ELECTROTECHNIQUE

SPECIALITE

Production Electrique et Energie Renouvelables

Intitulé :

Analyse de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome : approche numérique et vérification expérimentale

Mémoire D'Ingénieur

Présenté par

ZENATI Nesrine

BOUANANE Chaima

Encadrant :	Grade	Établissement d'affiliation
DEKHANE Azzeddine	MCA	ENSTI Annaba
Co Encadrant :	Grade	Établissement d'affiliation
AZIZI Amina	Docteur	UBMA-Annaba
Président	Grade	Établissement d'affiliation
SMILI Karima	MCA	ENSTI Annaba
Examineurs	Grade	Établissement d'affiliation
FERGANI Nadir	MRA	CRTI Annaba
ATTOUI Issam	DRA	CRTI Annaba

Année / 2023

Remerciements

*Avant tout nous remerciant notre **dieu** tout Puissant qui nous aide et nous donne la volonté et surtout le courage durant les années de nos études et pour finir ce travail.*

*Nous remercions vivement Monsieur « **Azzedine Dekhane** », pour l'honneur de nous encadrer, et son entière disponibilité avec ses encouragements, sans oublier ses qualités humaines et son aide durant toutes les étapes de notre travail.*

*Nous tenons à remercier aussi Madame « **Azizi Amina** », pour son Co-encadrement qui a fourni des efforts énormes par ses conseils avisés et pour son orientation et son aide tout au long de ce projet.*

*Nos remerciements vont également à tous **les enseignants** du second cycle pour leurs conseils.*

*Nous souhaitons exprimer notre gratitude sincère envers **les membres du jury** pour avoir généreusement consacré leur précieux temps à cette soutenance.*

*Enfin, nous exprimons les profondes gratitudes à nos **parents** pour leurs soutiens inconditionnels, leurs sacrifices endurés aussi, nous remercions nos **proches** et nos **amis**.*

Dédicace

Je dédie ce travail :

*A la première personne dans ma vie « **ma mère** » pour ses sacrifices,
son amour et son soutien énorme durant mon parcours d'étude.*

*A **mon père**, que dieu garde son âme dans le paradis.*

*A mon frère « **Zakaria** » pour son soutien moral encouragement
permanant.*

A tous mes proches de la famille et les amis.

*A mon amie et mon binôme « **Zenati Nesrine** ».*

*Finalement, Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes
les personnes qui m'ont encouragé et aidé dans mon développement
académique*

Bouanane Chaïma

Dédicace

Je dédie ce travail :

*Au meilleur des **pères**, et ma très chère **maman**, qu'ils trouvent en moi
la source de leur fierté.*

A qui je dois tout.

*A mon frère « **Saber** » et ma sœur « **Hania** » A qui je souhaite un
avenir radieux plein de réussite.*

*A toute ma famille « **RABIE** » et « **ZENATI** »*

*A tous mes amis et toute ma promo et en particulier mon binôme
« **Bouanane Chaïma** ».*

Tous ceux qui m'ont aimé et me souhaitent le bonheur et la réussite.

Zenati Nesrine

Résumé

Compte tenu de la croissance démographique permanente, il faudra davantage de ressources en combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel et nucléaire) pour satisfaire la demande énergétique grandissante. Par conséquent, il est essentiel de rechercher des alternatives pour diversifier le bouquet énergétique, notamment en exploitant les sources renouvelables, considérées comme plus respectueuses de l'environnement et plus avantageuses sur le plan économique à long terme. Le potentiel solaire de l'Algérie est immense, et le photovoltaïque est l'une des meilleures options à explorer. Toutefois, les systèmes photovoltaïques peuvent rencontrer des défauts et des anomalies au cours de leur fonctionnement, entraînant une baisse des performances et une interruption de leur approvisionnement en électricité. La détection et la localisation des défauts des systèmes photovoltaïques peuvent réduire les coûts de maintenance et augmenter la performance. Dans ce contexte, le présent travail aborde, par le biais de simulations et d'études de cas, l'impact de dégradation d'un module photovoltaïque sur la production d'électricité. Une approche permettant la détection et la localisation des défauts qui pourraient causer une diminution de la production y est également proposée. La validation expérimentale a été réalisée sur un site réel à l'aide du logiciel *WatchPower*.

Mots clés :

Système photovoltaïque, Modélisation, MPPT, vieillissement, défaut, dégradation, *WatchPower*.

Abstract

Due to constant population growth, more fossil fuel resources (oil, coal, natural gas, and nuclear) are needed to meet the growing energy demand. Therefore, looking for alternatives to diversify the energy mix is essential, especially by exploiting renewable sources, which are considered more environmentally friendly and economically advantageous in the long term. Algeria has considerable solar potential, and photovoltaic energy is one of the best options to explore. However, photovoltaic systems can encounter faults and anomalies during their operation, leading to decreased performance and an interruption of power supply. Detecting and locating faults can reduce maintenance costs and increase productivity. In this context, this study addresses, through simulations and case studies, the impact of the degradation of a photovoltaic module on power production. It also proposes an approach to detect and localize defects that may cause a decrease in production. Experimental validation was performed on a real site using the WatchPower software.

Keywords:

PV Systems, modeling, MPPT, degradation, faulty installation, ageing, WatchPower software.

الملخص

نظرًا للنمو المستمر في السكان، يتطلب تلبية الطلب المتزايد على الطاقة المزيد من مصادر الوقود الأحفوري (النفط والفحم والغاز الطبيعي والنووي). لذا، فإن البحث عن بدائل لتنويع مزيج الطاقة ضروري، خاصةً من خلال استغلال المصادر المتجددة التي تُعتبر أكثر صديقة للبيئة واقتصاديًا مجديةً على المدى الطويل. تتمتع الجزائر بإمكانات شمسية هائلة، وتعد الطاقة الشمسية الضوئية واحدة من أفضل الخيارات للاستكشاف. ومع ذلك، قد تتعرض أنظمة الخلايا الشمسية للأعطال والتشوهات أثناء تشغيلها، مما يؤدي إلى تراجع الأداء وانقطاع التيار الكهربائي. يمكن تخفيض تكاليف الصيانة وزيادة الإنتاجية من خلال اكتشاف وتحديد الأعطال في أنظمة الخلايا الشمسية. في هذا السياق، تتناول هذه الدراسة، من خلال المحاكاة والدراسات العملية، تأثير تَقَهَّر وحدة الخلايا الشمسية على إنتاج الطاقة. كما تقترح نهجًا لاكتشاف وتحديد العيوب التي قد تؤدي إلى تراجع الإنتاج. تم تأكيد صحة النتائج عمليًا على موقع حقيقي باستخدام برنامج *WatchPower*.

الكلمات المفتاحية:

النظم الكهروضوئية، النمذجة، خوارزمية متتبع نقطة القدرة القصوى، التقادم، التَقَهَّر، *WatchPower*

Table des matières

Remerciements	i
Dédicace.....	ii
Résumé	iv
Table des matières	vii
Liste des figures	x
Liste des tableaux	xii
Liste des symboles	xiii
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Etat de l'art sur les Energies Renouvelables	3
I.1 Introduction	4
I.2 Statut des énergies renouvelables en Algérie	4
I.2.1 L'énergie géothermie	4
I.2.2 L'énergie éolienne.....	4
I.2.3 L'énergie de la biomasse	5
I.2.4 L'énergie hydraulique	5
I.2.5 L'énergie solaire.....	5
I.3 Le gisement solaire en Algérie	6
I.4 Répartition spectrale du rayonnement solaire	8
I.5 La dégradation d'un système photovoltaïques autonome.....	10
I.5.1 Les différentes parties d'un panneau PV affecter par la dégradation	10
I.5.2 Les modes de dégradation des modules PV	10
I.5.3 Les modes de dégradation externes.....	14
I.6 Technique d'identification des panneaux dégradés.....	15
I.6.1 L'inspection visuelles.....	15
I.6.2 La mesure des paramètres électriques (EPM)	15
I.6.3 Technique d'imagerie.....	16

I.6.3.1	EL imagerie	16
I.6.3.2	PL imagerie.....	17
I.6.3.3	Imagerie par fluorescence UV	17
I.7	Conclusion.....	18
Chapitre II : Modélisation d'un système PV		19
II.1	Introduction	20
II.2	Les normes d'une installation photovoltaïque.....	20
II.3	Les différents types de systèmes photovoltaïques	21
II.4	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	23
II.5	Association des cellules photovoltaïques	24
II.6	Protection classique d'un GPV	25
II.7	Eléments d'un système photovoltaïque.....	26
II.7.1	Convertisseur DC/DC	27
II.7.2	La commande MPPT.....	29
II.8	Vieillissements d'un panneau photovoltaïque	29
II.8.1	Approche basée sur les circuits	29
II.8.2	Mise en œuvre le cas du module photovoltaïque en Silicium.....	30
II.8.3	Lois de vieillissement d'un panneau photovoltaïque	31
II.9	Conclusion.....	32
Chapitre III : Validation de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide de la commande MPPT : une approche par simulation		33
III.1	Introduction	34
III.2	Simulation d'un système photovoltaïque avec SIMSCAPE.....	36
III.2.1	Présentation la chaine de conversion photovoltaïque	36
III.2.2	Les schémas blocs de la simulation.....	37
III.2.3	Les résultats de la simulation sans défaut avec les deux commande MPPT (P&O et INC-COND).....	38

III.2.4	Évaluation des performances de deux commandes MPPT (type <i>P&O</i> et <i>INC-COND</i>) en présence d'un défaut d'ombrage partiel : résultats de simulation.....	42
III.2.5	Interprétation des résultats	46
III.3	Simulation de la dégradation d'un panneau photovoltaïque avec le modèle mathématique.....	47
III.3.1	Les schémas blocs de la simulation.....	47
III.3.2	Les résultats de la simulation	49
III.3.3	Evaluation de l'impact de l'utilisation de MPPT sur le vieillissement du système PV	51
III.3.4	Interprétation des résultats	52
III.4	Conclusion	52
Chapitre IV : Surveillance et diagnostic d'une installation photovoltaïque par le logiciel WatchPower.....		53
IV.1	Introduction	54
IV.2	Le logiciel <i>WatchPower</i>	54
IV.3	Caractéristiques du logiciel	54
IV.4	Flux de puissance et sa signification	55
IV.5	Connexion du <i>WatchPower</i> avec application wifi	57
IV.6	Surveillance et diagnostics d'une installation PV par le logiciel <i>Watch Power</i>	58
IV.6.1	Les modes de dégradation détectée dans l'installation	61
IV.6.2	La connexion avec <i>WatchPower</i>	62
IV.7	Les résultats de simulation données par logiciel	63
IV.8	Interprétation des résultats.....	69
IV.9	Conclusion.....	70
Conclusion générale		71
Bibliographie.....		73
Annexe.....		81

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelables

Figure I.1 : L'énergie solaire photovoltaïque.....	6
Figure I.2 : Chauffe-eau solaire individuel	6
Figure I.3 : Irradiation horizontale globale en Algérie.....	7
Figure I.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.	9
Figure I.5 : Les différentes parties d'un module photovoltaïque soumis aux dégradations	10
Figure I.6: Forme idéale des courbes caractéristiques des cellules solaires I-V et P-V	15
Figure I.7 : Images typiques en niveaux de gris d'une plaquette solaire. (a) sans dégradation, (b) dégradée	16
Figure I.8: Images types de fluorescence UV d'un module PV (a) non exposé à l'aide d'une caméra CMOS, (b) Image à échelle de gris avec CCD	18

Chapitre II : Modélisation d'un système PV

Figure II.1: Association des cellules photovoltaïque	25
Figure II.2: Diodes de protection du module photovoltaïque	26
Figure II.3 : Architecture globale d'un système photovoltaïque.....	27
Figure II.4 : Circuit équivalent de module photovoltaïque avec des variables pour prendre en compte le vieillissement	30

Chapitre III : Validation de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide de la commande MPPT : une approche par simulation.

Figure III.1 : Résumé graphique des différentes étapes de la simulation.....	35
Figure III.2: Diagramme synoptique de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	36
Figure III.3: Système photovoltaïque	37
Figure III.4: Sous-système du module photovoltaïque avec Simscape	37
Figure III.5: Sous-système de la méthode MPPT P&O	38
Figure III.6: Sous-système de la méthode MPPT Inc-Cond	38
Figure III.7: Générateur Photovoltaïque	48
Figure III.8: Sous système du Générateur Photovoltaïque.....	48
Figure III.9: Sous système du courant de saturation	48
Figure III.10: Sous système du courant photonique.....	49
Figure III.11: Sous système du courant shunt	49

Chapitre IV : Surveillance et diagnostic d'une installation photovoltaïque par le logiciel WatchPower

Figure IV.1: L'interface principal du logiciel Watch Power	54
Figure IV.2: Configuration des paramètres d'onduleur	55
Figure IV.3: Mode mise sous tension.....	56
Figure IV.4: Mode veille.....	56
Figure IV.5: Mode ligne.....	56
Figure IV.6: Mode batterie.....	57
Figure IV.7: Mode défaut.....	57
Figure IV.8: WatchPower en utilisant le WI-FI	58
Figure IV.9: Générateur PV de 8 panneaux de 48V (connexion mixte).....	58
Figure IV.10: La connexion de les 8 panneaux.....	59
Figure IV.11: La plaque signalétique de panneau.....	59
Figure IV.12: Le régulateur MPPT	60
Figure IV.13: Les batteries de l'installation (4 batteries en série de 12V).....	60
Figure IV.14: Les auxiliaires de l'installation (armoire électrique et disjoncteur différentiel...)	61
Figure IV.15: Délamination entre le verre et la cellule.....	61
Figure IV.16: Fissures cellulaires.....	62
Figure IV.17: Interface de Watch Power avec la connexion de l'installation.....	62
Figure IV.18: Les informations basiques	63
Figure IV.19: Les informations nominales	63
Figure IV.20: Tension en AC.....	63
Figure IV.21: Fréquence en AC	64
Figure IV.22: Tension d'entrée de l'installation PV	64
Figure IV.23: La puissance d'entrée de l'installation PV	65
Figure IV.24: La puissance apparente de la sortie	65
Figure IV.25: La puissance active de la sortie	66
Figure IV.26: La tension des batteries	66
Figure IV.27: La capacité des batteries	67
Figure IV.28: Courant de charge.....	67
Figure IV.29: Le courant de décharge des batteries.....	68
Figure IV.30: La tension de sortie.....	68
Figure IV.31: La fréquence de la sortie.....	69

Liste des tableaux

Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelables

Tableau I.1: Potentiel solaire en Algérie	7
Tableau I.2: Comparaison entre l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne selon plusieurs critères	8
Tableau I.3: Les modes de dégradation interne	11
Tableau I.4: Les modes de dégradation externe	14

Chapitre II : Modélisation d'un système PV

Tableau II.1: Les normes d'une installation photovoltaïque	21
Tableau II.2: Les types du système photovoltaïque	22
Tableau II.3: Modèles électriques de la cellule photovoltaïque	23
Tableau II.4: Les types de convertisseur DC /DC	28

Chapitre III : Validation de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide de la commande MPPT : une approche par simulation.

Tableau III.1: Caractéristique du panneau dans les conditions STC	39
Tableau III.2: Les tensions d'entrée, sortie sans défaut avec les deux commande MPPT (<i>P&O</i> et <i>INC-COND</i>)	40
Tableau III.3: Les puissances d'entrée, sortie sans défaut avec les deux commande MPPT (<i>P&O</i> et <i>Inc-Cond</i>)	41
Tableau III.4: Comparaison entre les maximaux de <i>P&O</i> et <i>INC-COND</i> sans défaut	42
Tableau III.5: Caractéristique du panneau avec défaut d'ombrage partiel	43
Tableau III. 6: Les tensions d'entrée, sortie avec un défaut d'ombrage partiel par les deux commande MPPT (<i>P&O</i> et <i>INC-COND</i>)	44
Tableau III.7: Les puissances d'entrée, sortie avec un défaut d'ombrage partiel par les deux commande MPPT (<i>P&O</i> et <i>INC-COND</i>)	45
Tableau III.8: Comparaison entre les maximaux de <i>P&O</i> et <i>INC-COND</i> (avec défaut d'ombrage partiel)	46
Tableau III.9: Les caractéristiques en T=10 ans, T=20 ans	50
Tableau III.10: Le vieillissement du GPV sans et avec MPPT	51

Chapitre IV : Surveillance et diagnostic d'une installation photovoltaïque par le logiciel WatchPower

Tableau IV.1: Caractéristiques électriques du panneau (RG-P250W)	59
--	----

Liste des symboles

DC/DC	Continu/continu.
MPPT	Point de puissance maximal.
P&O	Perturbation et observation.
INC-COND	Incrémental conductance.
°C	Celsius.
m/s	Mètre /second.
MTOE	Million de tonnes équivalent pétrole.
m³	Mètre cube.
CSP	Energie solaire concentré.
km²	Kilomètre carré.
h	Heure.
h/an	Heure/an.
kWh/m²/an	Kilo watt heure par mètre carré par an.
kWh/m²	Kilo watt heure par mètre carré.
µm	Micro mètre.
EVA	Acétate de Vinyle et d'éthylène.
I-V	Courant-tension.
P-V	Puissance-tension.
W	Watt.
V_{oc}	Tension de circuit ouvert.
I_{sc}	Courant de court-circuit.
V_{MP}	La tension du point MPPT.
P_{MP}	La puissance du point MPPT.
EL	Electroluminescence.
PL	Photoluminescence.
CMOS	Semi-conducteur complémentaire oxyde métal.
CCD	Dispositif à transfert de charge.
CEI	Commission Electrotechnique Internationale.
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
DC/AC	Continu/alternatif.

GPV	Générateur photovoltaïque.
Charge DC	Charge en courant continu.
Charge AC	Charge en courant alternatif.
I_{ph}	Courant photonique(A).
I	Courant généré par GPV.
R_s	Résistance série(Ω).
R_{sh}	Résistance parallèle(Ω).
T	Température (Kelvin).
I_s	Courant de saturation inverse de la diode(A).
V_t	Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ joule/Kelvin).
K	Kelvin.
q	Charge d'électron.
A	Facteur d'idéalité.
V	Kelvin.
NP	Nombre de panneaux totale.
NP_s	Nombre totale de panneaux en série.
NP_p	Nombre totale de panneaux en parallèle.
PN	Tension de jonction.
V/m^2	Volt par mètre carré.
K	Kelvin.
ΔT	Différence de température.
V	Tension électrique (Volt).
η	Le rendement.
STC	Les conditions météorologiques expérimentales.
G	L'éclairement.
Ω	Ohm.
V_{DC}	Volt en courant continu.

Introduction Générale

Introduction générale

La hausse fulgurante de la demande d'énergie pour approvisionner les populations contemporaines s'est révélée être un obstacle majeur pour l'humanité. La production d'énergie conventionnelle par des moyens non renouvelables, à savoir les combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, entraîne l'épuisement des ressources naturelles et exacerbe le changement climatique en libérant des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les énergies renouvelables sont apparues comme une option progressivement efficace pour résoudre ce problème.

Les énergies renouvelables désignent tout type d'énergie provenant de sources qui se renouvellent naturellement et ne diminuent pas avec le temps. Les sources d'énergie renouvelables comprennent plusieurs formes primaires : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et la biomasse.

La production d'électricité au moyen de turbines éoliennes consiste à exploiter l'énergie cinétique du vent pour produire de l'énergie électrique. L'énergie solaire est générée par l'utilisation du rayonnement solaire, qui peut être exploité au moyen de panneaux solaires et transformé en énergie électrique. L'énergie hydraulique est produite en utilisant l'énergie cinétique de l'eau, qui propulse des turbines hydrauliques pour produire de l'énergie électrique. L'énergie géothermique est produite à partir de la chaleur interne de la terre et extraite des sources thermales souterraines. L'énergie de la biomasse est dérivée de la matière organique, y compris, mais sans s'y limiter, les déchets alimentaires, les déchets agricoles et les déchets forestiers.

L'énergie solaire est largement considérée comme l'une des formes d'énergie renouvelable les plus prometteuses pour la production d'énergie future, en particulier en Algérie où le gisement solaire est considérable. Les progrès technologiques constants dans le domaine de l'énergie solaire améliorent l'efficacité et la compétitivité de cette source d'énergie par rapport aux sources d'énergie conventionnelles, ce qui en fait une option de plus en plus viable pour répondre aux besoins en énergie. Bien que l'énergie éolienne ait également un rôle important à jouer dans le mix énergétique, le potentiel solaire de l'Algérie offre des opportunités considérables pour l'utilisation de cette source d'énergie renouvelable.

Les systèmes photovoltaïques sont susceptibles de présenter des défauts et des anomalies dus à la dégradation et au vieillissement provoqués par les conditions météorologiques et le

matériau de construction. Ces problèmes peuvent entraîner une diminution des performances et des interruptions d'alimentation. La détection et la localisation précises des défauts permettent de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la productivité des systèmes photovoltaïques. En identifiant avec précision les anomalies, il est possible de prendre des mesures correctives ciblées pour maintenir un fonctionnement optimal. Cette approche contribue également à optimiser l'efficacité énergétique et à garantir une production d'électricité stable et fiable à partir des installations photovoltaïques.

Dans cette optique, l'objectif de cette étude est d'analyser la dégradation d'une installation PV à partir de données réelles. À l'aide de simulations et d'études de cas, cette étude examine les effets de la dégradation des modules photovoltaïques sur la production d'énergie. Elle présente une nouvelle méthode pour détecter et localiser les défauts qui provoquent le déclin en production. En utilisant le logiciel *WatchPower*, une validation expérimentale a été menée sur un site réel.

Le mémoire présenté est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre examine l'état des énergies renouvelables en Algérie, ainsi les modes de dégradation interne et externe d'une installation photovoltaïque, les principales techniques d'identification des panneaux dégradés.

Le deuxième chapitre aborde, dans un premier temps, les normes et les types des systèmes photovoltaïques. Ensuite, il présente la modélisation du système photovoltaïque, y compris ses composants tels que les convertisseurs DC/DC, le contrôle MPPT et les lois de vieillissement et de dégradation des panneaux photovoltaïques.

Le troisième chapitre se concentre sur la simulation d'un système photovoltaïque contrôlé par deux méthodes distinctes : le *P&O* et l'*INC-COND*. Il présente également un modèle mathématique du panneau pour simuler le processus de dégradation du panneau PV.

Le dernier chapitre est dédié à la surveillance et au diagnostic d'une installation photovoltaïque à l'aide du logiciel *WatchPower*.

Enfin, cette étude se conclut par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés et les éventuelles perspectives.

Chapitre I : Etat de l'art sur les Energies Renouvelables

I.1 Introduction

Ces dernières années, l'utilisation des sources d'énergie renouvelables, connues pour leur caractère respectueux de l'environnement, a considérablement augmenté. La génération d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables est soumise à des limitations spécifiques, telles que la variabilité de ces sources, les contraintes de récupération de l'énergie et la dégradation de la qualité de l'infrastructure [1].

Au cours de ce chapitre, nous analyserons l'état actuel des énergies renouvelables en Algérie, nous explorerons également les diverses sortes de dégradations internes et externes qui peuvent affecter une installation photovoltaïque, et nous présenterons les principales méthodes de détection des panneaux dégradés.

I.2 Statut des énergies renouvelables en Algérie

I.2.1 L'énergie géothermie

L'énergie géothermique est une forme d'énergie propre provient de la chaleur naturelle de la terre. Elle est produite par l'exploitation de la chaleur stockée dans les roches et les fluides souterrains de la profondeur de plusieurs kilomètres. Elle peut être utilisée pour la produire l'électricité et le chauffage des locaux.

La compilation de données géologiques, géochimiques et géophysiques a permis l'identification de plus de deux cents (200) sources chaudes dans la partie nord du pays. Environ un tiers (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45 °C [2]. Les températures les plus élevées enregistrées sont de 98 °C dans la province de Guelma à Hammam El Maskhoutin et de 118 °C dans la province de Biskra. Le réservoir de grès albo-aptien situé dans le sud de l'Algérie a une température moyenne de l'eau qui atteint 57 °C [3].

I.2.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui est produite grâce à la force du vent. Les éoliennes, qui sont des turbines de grandes tailles, capturent l'énergie cinétique du vent et la transforment en électricité.

La ressource éolienne en Algérie est caractérisée par de grandes variations d'un endroit à l'autre. D'après une étude menée par (Chellali et all) [4], 78% de la surface du pays bénéficie d'une vitesse du vent supérieure à 3 m/s, dont près de 40% dépassent les 5 m/s. Le Sud de l'Algérie, qui enregistre des vitesses plus élevées (supérieures à 6 m/s) que le Nord [5],[6] se révèle être une zone propice à l'exploitation de l'énergie éolienne, notamment grâce à

l'implantation de parcs éoliens ou de systèmes hybrides. Mais il y a beaucoup de difficultés dans ce type d'ENR, le cout d'installation et les nuisances sont principalement les plus grands empêchements pour traduire des projets dans l'éolienne en Algérie.

I.2.3 L'énergie de la biomasse

L'énergie de biomasse est une énergie produire à partir de matière organique (résidus alimentaires, les déchets, forestiers, cadavre et déchets animales) pour produire l'électricité de la chaleur ou du carburant. L'énergie de la biomasse est considérée comme une énergie renouvelable car la matière utilisée peut être régénérée par la croissance de nouvelles plantes de nouveaux arbres.

La biomasse a un grand potentiel énergétique avec une production potentielle de 3,7 MTOE provenant des forêts et de 1,33 MTOE par an à partir de déchets agricoles et urbains [7]. Selon une étude présentée par (Akbi et all) [8], il est possible de produire plus de 1700 GWh d'électricité en récupérant les déchets.

I.2.4 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie qui est produire par la force de l'eau en mouvement, comme les chutes d'eau, les vagues de la mer, ou les courants de rivières cette force est convertit en énergie électrique grâce à des turbines hydraulique qui sont installées dans des barrages.

La quantité de pluie globale qui tombe sur le territoire algérien est importante et estimée à 65 milliards de m³, mais elle a peu d'avantages pour le pays en ce qui concerne la production d'énergie hydroélectrique en raison du manque d'exploitation de tous les sites existants (103 sites de barrage) [9].

I.2.5 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui convertit une partie du rayonnement solaire en énergie électrique ou thermique grâce aux cellules des panneau thermique ou bien photovoltaïque.

En raison de sa vaste superficie et de la diversité de son climat, l'Algérie possède un fort potentiel en énergie solaire, notamment dans la région saharienne (régions du sud) [10] , [11], et indiqué dans la **Figure I.3**, qui est propice aux applications d'énergie solaire telles que les panneaux photovoltaïques (raccordement au réseau, électrification des villages, pompage d'eau) ou la technologie de concentration solaire (CSP).

L'énergie photovoltaïque est divisée en deux catégories (**Figure I.1 et I.2**) selon le type le mécanisme de fonctionnement des panneau et l'énergie obtenu à la fin :

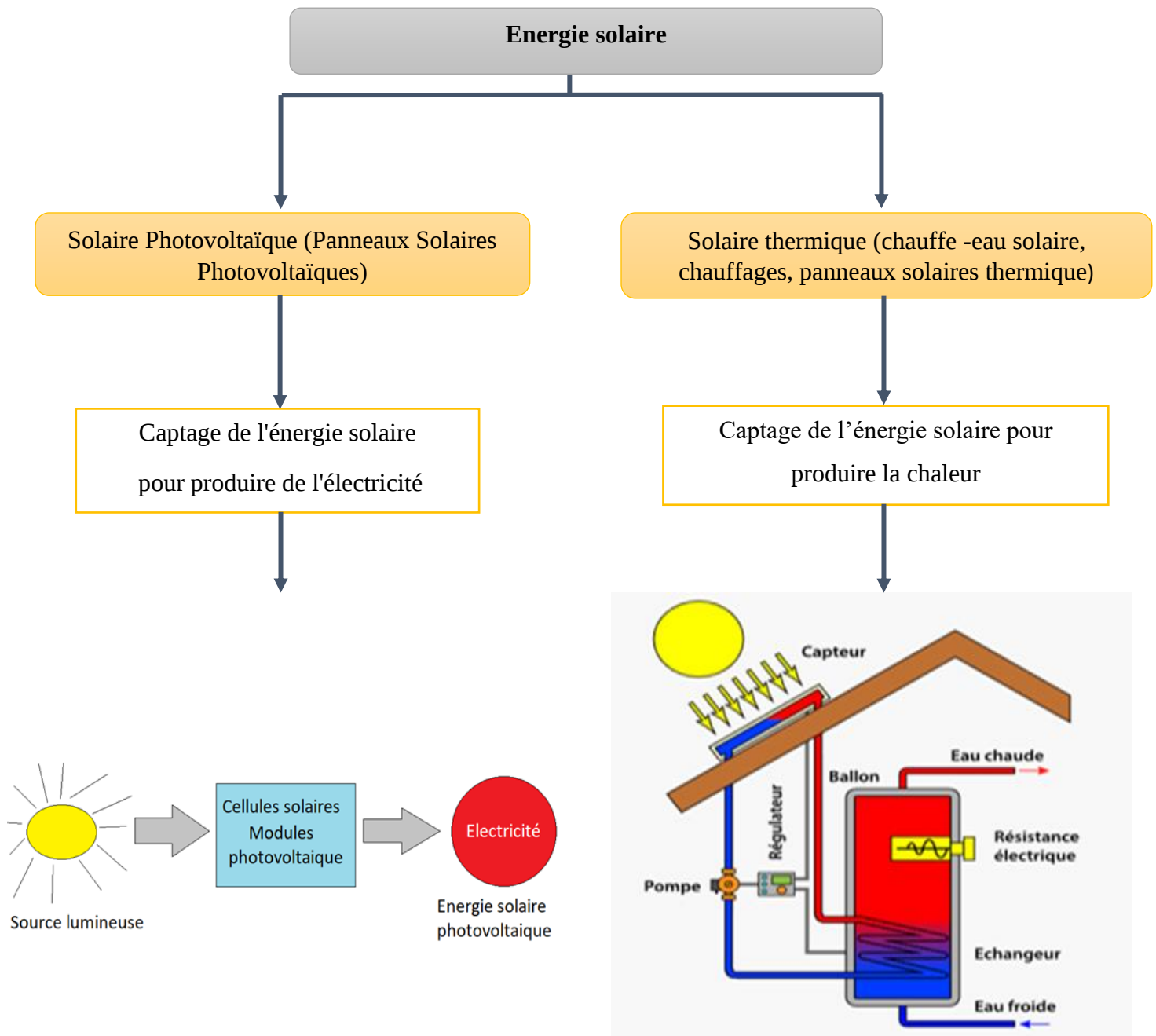


Figure I.1: L'énergie solaire photovoltaïque

Figure I.2 : Chauffe-eau solaire individuel [12]

I.3 Le gisement solaire en Algérie

L'Algérie a un gisement solaire énorme grâce à sa situation géographique surtout dans le sud. Ces dernières années, le gouvernement algérien a fait des efforts pour développer le secteur des énergies renouvelables par multiples actions. Par exemple, la création d'un nouveau ministère

appelé l'Environnement Energies renouvelables et l'efficacité énergétique et il a mis des programmes pour ces types d'énergies surtout dans domaine d'énergie photovoltaïque.

Le **Tableau I.1** montre le potentiel solaire dans les trois régions de l'Algérie.

Tableau I.1: Potentiel solaire en Algérie [13]

Zones	Zone côtière	Hautes plaines	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Superficie(km ²)	9567	238 .174	2.048.297
Durée moyenne d'ensoleillement journalier(h)	7 .26	8.22	9.59
Durée moyenne d'ensoleillement(h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650
Densité solaire journalière (kWh/m ²)	4 .66	5.21	7.26

La **Figure I.3** montre l'irradiation horizontale globale en Algérie [14].

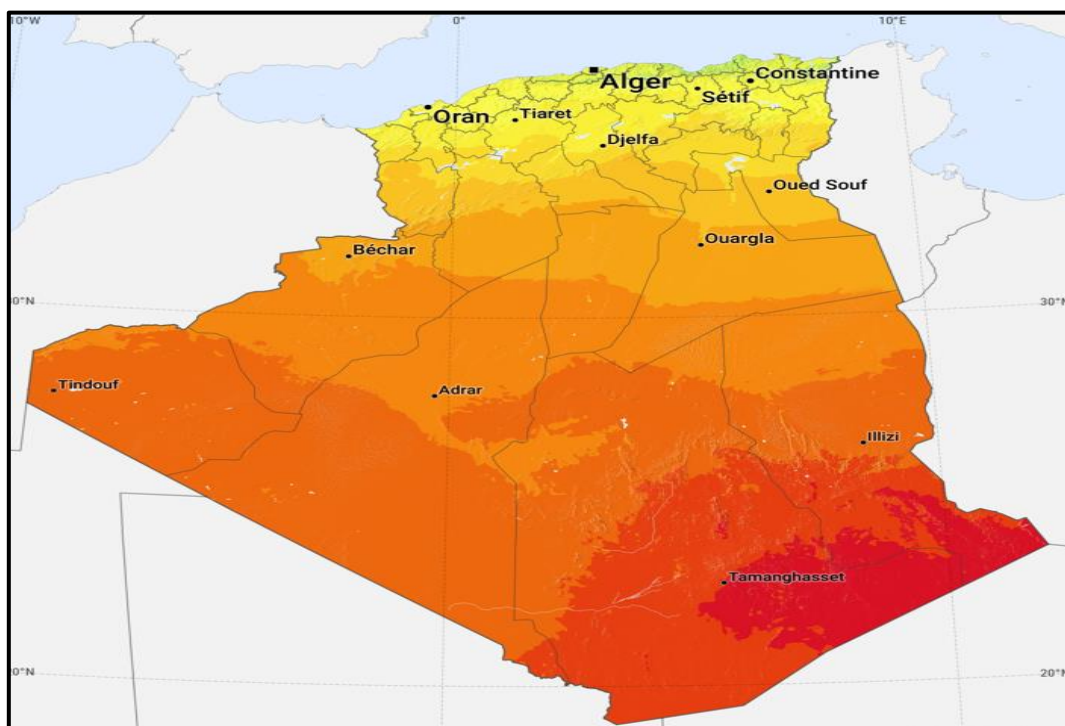


Figure I.3 : Irradiation horizontale globale en Algérie [14]

Tableau I.2: Comparaison entre l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne selon plusieurs critères

Les critères		PV	Eolienne
	Le cout	Élevée	Plus élevée que PV
	Durée d'étude et construction	5 ans à 8 ans	Plus que 10 ans
	La nuisance	Non	Oui
	Rendement	[12% à 25%]	Maximum 59% (limite de Betz)
	La rentabilité en Algérie	Bonne, grande surface d'Algérie a un bon éclaircissement	Pas bonne, il y a moins de zone bien pour l'installation d'éolienne

D'après le **Tableau I.2**, il est clair que l'énergie photovoltaïque présente des avantages en termes de fiabilité, d'impact environnemental et de disponibilité en Algérie. Cependant, elle est coûteuse à installer et produit moins de puissance par unité que l'énergie éolienne et nécessite plus d'espace. L'énergie éolienne quant à elle, a des coûts d'installation plus élevés et produit plus de puissance par unité, mais elle nécessite moins d'espace et a une fiabilité moyenne.

Dans le contexte de l'Algérie, où le gisement solaire est considérable, il peut être intéressant de privilégier l'énergie photovoltaïque pour la production d'énergie renouvelable. Cependant, la décision finale devrait être prise en considérant tous les critères pertinents et en évaluant les avantages et les limites de chaque forme d'énergie renouvelable en fonction des besoins spécifiques de chaque projet.

I.4 Répartition spectrale du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μm) à l'infrarouge lointain (2.5 μm).

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement de (comme illustre la **Figure I.4**) :

- 47 % dans la bande visibles (0.4 à 0.8 μm).
- 44 % dans la bande des infrarouges (> à 0.8 μm).
- 9 % dans la bande des ultraviolets (< à 0.4 μm).

Le spectre solaire peut varier en fonction de facteurs tels que l'heure de la journée, la saison, la latitude et la couverture nuageuse. Pour maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie

solaire en électricité, il est important de connaître le spectre solaire pour la région où se trouve la cellule solaire, afin de choisir le matériau semiconducteur optimal et la conception de la cellule solaire la plus adaptée pour cette région.

En outre, la connaissance du spectre solaire peut également aider à comprendre les effets de certains facteurs, tels que la pollution de l'air et l'ombrage, sur la performance des cellules solaires. Par conséquent, la connaissance du spectre solaire est essentielle pour optimiser la conception des systèmes photovoltaïques et maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en électricité.

Cette dernière peut provoquer la décoloration de EVA de la cellule photovoltaïque. Les rayons ultraviolets combinés avec l'eau sous des température élevée faisant un changement de la structure chimique du polymère [15].

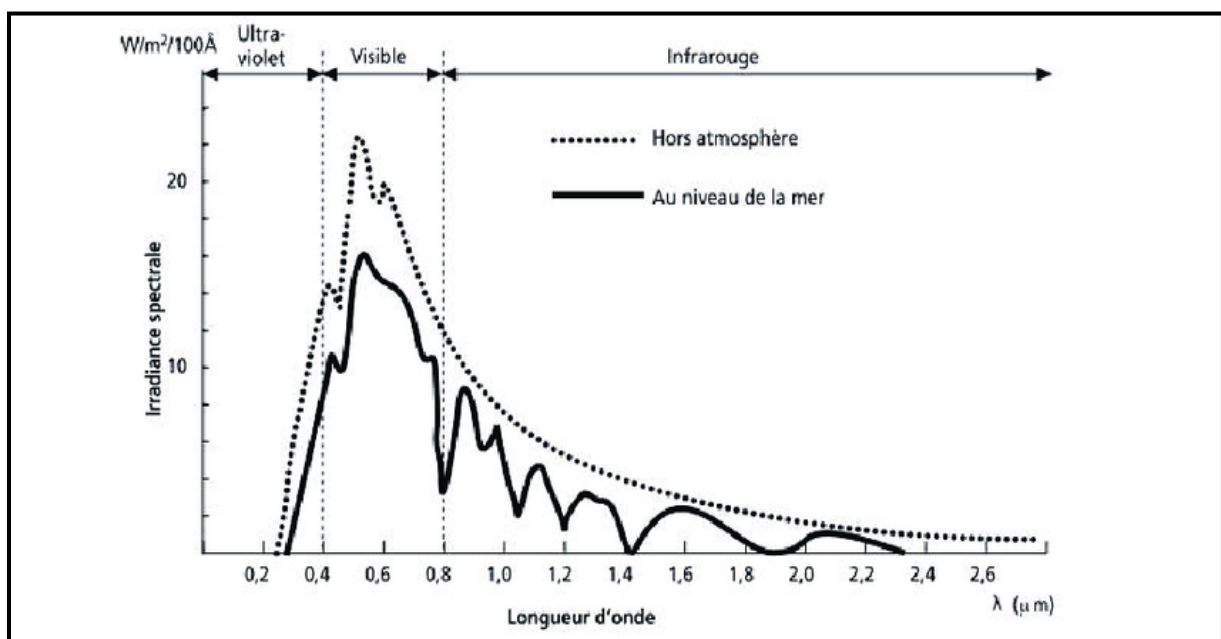


Figure I.4 : Analyse spectrale du rayonnement solaire [16] .

Après avoir présenté les systèmes photovoltaïques, il est important de reconnaître que, bien que ces systèmes soient souvent présentés comme une solution de production d'énergie propre et durable, ils ne sont pas à l'abri des problèmes de performance qui peuvent affecter leur durabilité et leur rentabilité [17].

Parmi les problèmes auxquels les systèmes photovoltaïques sont confrontés, la dégradation est un défi important à relever. Les installations solaires photovoltaïques sont souvent installées

dans des environnements exposés aux éléments naturels, tels que le soleil, la pluie, la neige, le vent et la poussière [18].

Au fil du temps, cette exposition peut causer des dommages au système photovoltaïque, ce qui entraîne une diminution de sa performance et de son rendement énergétique. Par conséquent, la dégradation des systèmes photovoltaïques doit être prise en compte dès la conception du système et tout au long de sa durée de vie pour s'assurer que les installations solaires photovoltaïques sont rentables et durables [19].

I.5 La dégradation d'un système photovoltaïques autonome

La dégradation d'un système photovoltaïque (PV) correspond à la perte progressive de sa capacité de production d'énergie au fil du temps en raison de divers facteurs tels que les conditions environnementales, les défauts de fabrication et la dégradation des matériaux [20].

I.5.1 Les différentes parties d'un panneau PV affecter par la dégradation

Les dégradations des panneaux PV touchent les différentes parties constitutives d'un panneau PV illustrées sur la **Figure I.5** à savoir le verre, les matériaux d'encapsulation (EVA, Éthylène et de Vinyle Acétate), la cellule en silicium, les matériaux réflecteurs de la face arrière (aluminium et Tedlar par exemple), les collecteurs de charges et la colle [20].

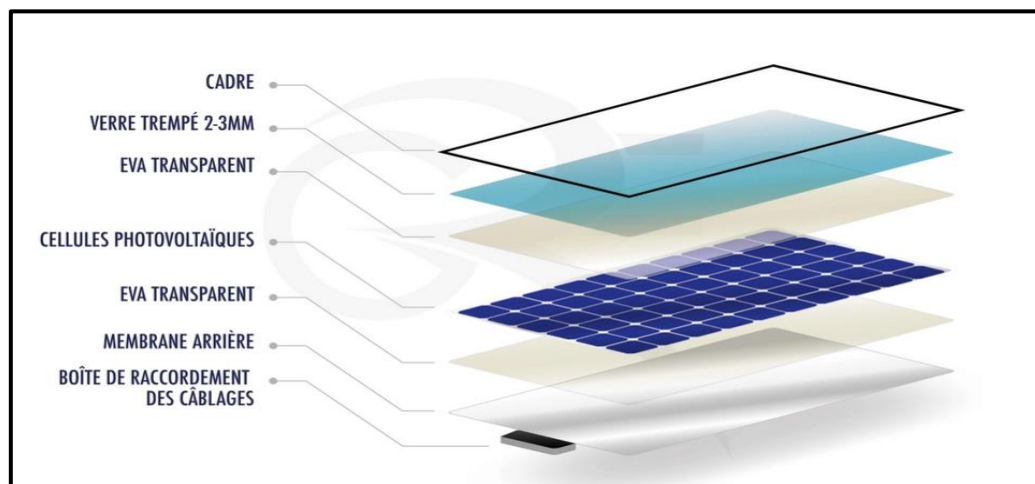
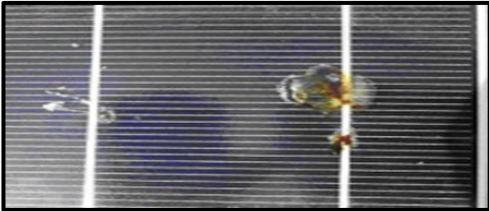
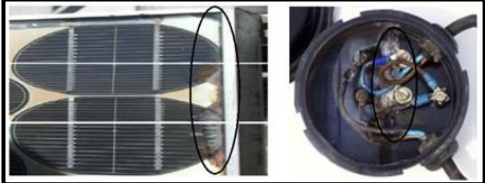


Figure I.5 : Les différentes parties d'un module photovoltaïque soumis aux dégradations [21]

I.5.2 Les modes de dégradation des modules PV

On peut classer les modes de dégradation en fonction de son emplacement en dégradation interne (**Tableau I.3**) et externe (**Tableau I.4**).

Tableau I.3: Les modes de dégradation interne

Défaut	Description
Les fissures cellulaires	 Un mode de dégradation peut être visuel par les yeux, peut arrivera au niveau du ruban d'interconnexion ou des bords de la cellule. Pendant le fonctionnement, des conditions climatiques comme le vent et la neige peuvent aggraver ces fissures [22].
Le hot spot	 Est une défaillance présentée par des point chauds sur la cellule solaire. Cette dégradation est liée au fait que les composants du module deviennent très chauds en raison d'un défaut de soudure, d'une rupture de ruban ou d'un courant inverse [23],[24].
La délamination	 Est la défaillance d'adhérence entre la couche d'encapsulation et la cellule, ou entre la cellule et le verre d'un module photovoltaïque. La perte d'adhérence se produit en raison d'une contamination telle que le non-nettoyage du verre ou de facteurs environnementaux tels que l'humidité pénétrant à l'intérieur de la structure du modules Photovoltaïques [24], [25].
La corrosion	 La corrosion est la réaction électrochimique du métal avec l'humidité du milieu environnant. La dégradation du revêtement antireflet, une température plus élevée, et l'absorption d'humidité de l'encapsulant accélèrent le processus de corrosion et d'oxydation [21], [26].

Décoloration de la couche Ethylène Vinyl Acetate



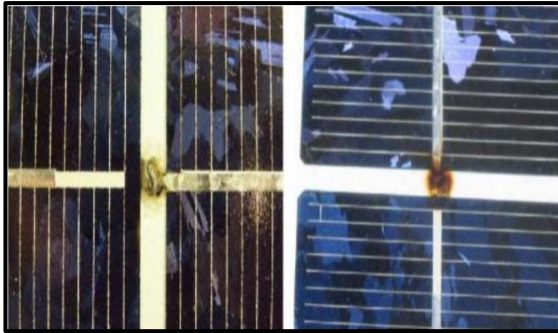
Cette couche garantie la protection des cellules PV de l'humidité et l'oxydation, la décoloration des modules PV peut survenir en raison du changement de couleur de la couche d'encapsulation (EVA) ou de l'adhésif entre le verre et les cellules, Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant [27].

Le potentiel induit de dégradation



Un groupe de mécanismes causés par une tension élevée et une différence de potentiel entre la surface du module et les cellules solaires individuelles qui peuvent endommager les cellules et provoquer une perte de puissance après l'installation [27], [28].

Dégradation des interconnexions de la cellule



Les liaisons métalliques sont susceptibles de défaillance au cours de fonctionnement du module photovoltaïque .il y a plusieurs cas comme :

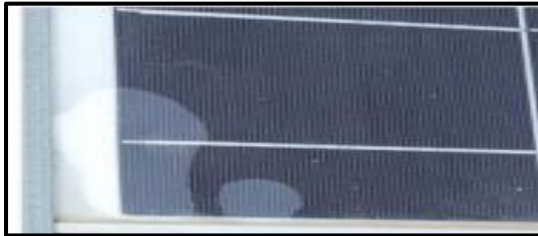
- Une mauvaise soudure de la connexion métallique entre les cellules solaire
- Une distance étroite entre les cellules favorise la défaillance de ces liaisons entre les cellules
- Les points chauds par ombrage partiel les cellules pendant des longues durées de fonctionnement force les contacts métalliques à se décomposer [27], [29].

Salissures (le vent du sable)

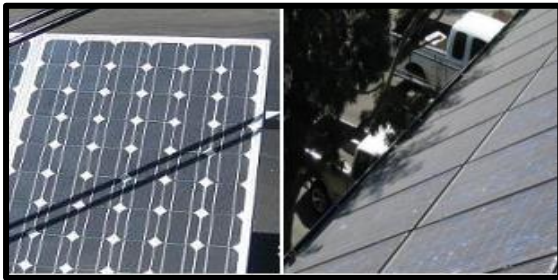


Dans le climat désertique, l'accumulation de poussière et de sable est une préoccupation majeure qui peut entraîner une détérioration significative de l'efficacité énergétique des systèmes PV [30].

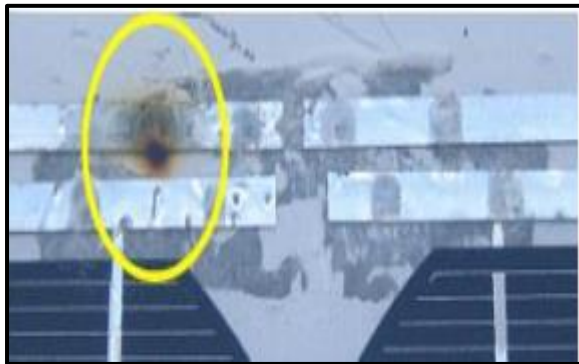
De nombreuses études ont montré que la région de Sahara algérien est l'une des plus touchées par les tempêtes de sable dans le monde [30] .

Les bulle d'air

Le manque d'adhérence de l'EVA n'affecte qu'une petite zone, il peut entraîner la formation d'une bulle d'air sous la couche de polymère ou la couverture arrière du module photovoltaïque. Cela peut être dû à une réaction chimique entre les matériaux ou à un dommage physique du panneau [24].

L'ombrage

Il existe deux types d'ombrage dans les systèmes photovoltaïques : l'ombrage dur causé par des objets solides tels que des bâtiments ou de la poussière, et l'ombrage doux causé par les nuages. Dans les deux cas, l'ombrage peut réduire les performances des modules photovoltaïques en entraînant une chute de tension dans le cas d'un ombrage dur et une réduction du courant dans le cas d'un ombrage doux [24], [31].

Augmentation de la résistance série

La résistance série est la somme des résistances de tous les éléments du circuit qui se trouvent entre les cellules photovoltaïques et la charge électrique, y compris les câbles, les connecteurs et les diodes de dérivation.

La corrosion ou un mauvais serrage des vis de connexion peuvent augmenter la résistance série dans le circuit électrique et causer une perte de tension, tout comme la corrosion des points de soudure entre les cellules. Cela peut entraîner une diminution du rendement du système en augmentant la résistance en série [24].

I.5.3 Les modes de dégradation externes

Tableau I.4: Les modes de dégradation externe

Défaut	Description
Défauts au niveau de convertisseur DC/DC	Parmi les pannes les plus courantes au niveau du convertisseur DC/DC [31] on peut citer : -des problèmes de conception et de fabrication -Les problèmes de contrôle -les défaillances des composants électriques
Pannes au niveau de la boîte de jonction	Les principales causes de défaillance de la boîte de jonction sont la mauvaise fixation à la tôle arrière, qui peut entraîner des infiltrations d'eau et d'humidité, ainsi que la corrosion des connexions. D'autres facteurs tels qu'un mauvais câblage, une mauvaise installation ou une dégradation thermique due à des températures élevées peuvent également causer des défaillances [31].
Défauts de diodes bypass	Si une cellule est polarisée en inverse avec une tension supérieure à la tension conçue pour la cellule, cela pourrait potentiellement provoquer des points chauds ou éventuellement un incendie. Des défaillances de diodes de by-pass peuvent se produire [31].
Défaut de terre	Plusieurs causes peuvent provoquer un défaut de terre dans une installation photovoltaïque, notamment une mauvaise installation des composants, des dommages aux câbles ou des problèmes avec les équipements de mise à la terre. Une installation incorrecte des panneaux solaires peut également causer des problèmes de terre [31].
Défaut de mismatching	Le "mismatching" externe peut être causé par des facteurs tels que des ombres, de la poussière ou des feuilles qui affectent la performance de certains panneaux par rapport aux autres. Ce qui peut entraîner une variation de tension ou de courant entre les panneaux, entraînant une baisse de la production d'énergie et des pertes de rendement. [31].

I.6 Technique d'identification des panneaux dégradés

Il existe différentes façons d'analyser, de mesurer et de caractériser le PV qualitativement et quantitativement. Dans la littérature, on utilise les méthodes suivantes :

I.6.1 L'inspection visuelle

L'inspection visuelle permet d'identifier facilement et par l'œil humain les dommages causés aux panneaux lors de l'installation ou dus aux influences environnementales au vieillissement, elle porte principalement sur les symptômes tels que la décoloration, le flou, les changements de texture, les dommages au panneau, la rupture, les bulles, etc..., plutôt que sur les 'diagnostics' par exemples (les points chauds, PID, etc...) [32].

I.6.2 La mesure des paramètres électriques (EPM)

Les caractéristiques courant-tension (I-V) et Suns-Voc (circuit ouvert presque fixe) contient de nombreuses informations sur l'état des modules .Les méthodes EPM sont principalement utilisées avec d'autres techniques lorsqu'il est nécessaire de localiser le défaut .La méthode de tracé des courbes I-V et P-V typiques d'une cellule solaire, mettant en évidence des paramètres importants tels que I_{SC} , V_{OC} , V_{MP} , P_{MP} (**Figure I.6**). Dans l'article [33] on a un exemple d'utilisation de tracker MPPT 3000 pour mesurer le même ensemble de paramètres toutes les 5 minutes entre février 2014 et juillet 2018. Malgré les informations nécessaires fournies par l'EMP, l'EMP est un mauvais indicateur des modules PV comportement mécanique .Ainsi, la classification de la dégradation du module PV par l'outil EPM a capacité limitée à identifier les différentes causes de modalité de dégradation [33].

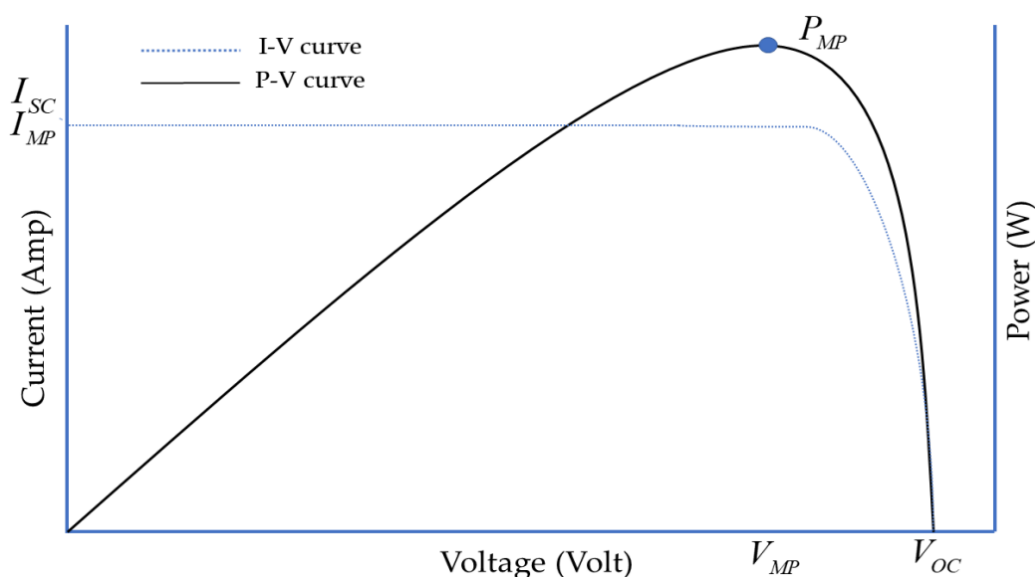


Figure I.6: Forme idéale des courbes caractéristiques des cellules solaires I-V et P-V [34]

I.6.3 Technique d'imagerie

Dans les littératures récentes, les techniques d'imagerie telles que la photoluminescence (PL), électroluminescence (EL), et les techniques d'imagerie par fluorescence UV sont des techniques de caractérisation d'imagerie populaires qui ils sont utilisés pour l'analyse de la dégradation des modules photovoltaïques. Ces techniques de caractérisation d'imagerie capable d'identifier divers modes de dégradation visuellement indétectables test, ce qui peut entraîner une diminution drastique des performances des modules photovoltaïques[35],[36].

I.6.3.1 EL imagerie

Photos d'EL pour caractériser l'atténuation photoélectrique comme un processus dans lequel un courant de polarisation directe est appliqué à modules et résultats de la recombinaison des rayonnements émetteurs de lumière infrarouge (gamme spectrale pour le silicium), prise avec un appareil photo doté d'un capteur CCD (Charging Combined Device) caractéristiques [37] . Les images en niveaux de gris capturées montreront des zones sombres épaisses qui reflètent les zones défectueuses qui contribuent à la perte de puissance du module (**Figure I.7**) [38] . Les patches gris foncé et noirs montrent les parties dégradées où les cellules se chargent séparer. De plus, EL image est a été appliquer au plusieurs étude comme au Brésil pour des images EL pour décrire les défauts y compris le brunissement et le délaminage sur les modules de silicium cristallin causés par vieillissement dès 15 ans d'exposition en plein air [39].

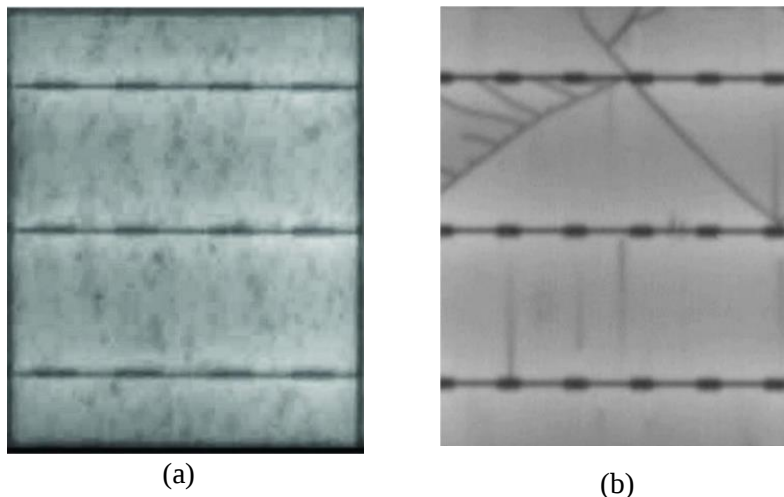


Figure I.7 : Images typiques en niveaux de gris d'une plaquette solaire. (a) sans dégradation, (b) dégradée [40]

I.6.3.2 PL imagerie

Tout comme l'imagerie EL, l'imagerie PL est une technique de caractérisation sans contact très répandu, d'analyser l'état des modules PV en fournissant des informations en termes de détermination de la qualité, des performances et des défauts de base résolus [41],[42].

Comme EL imagerie, PL imagerie basée sur la collecte des signaux de luminescence émis par les cellules solaires, mais elle a plus d'avantage ; peut détecter la durée de vie du porteur minoritaire et la résistance série en plus de la majorité mode que l'EL peut détecter. De plus, contrairement à EL, PL ne nécessite aucun changement dans câblage [43]. Comme pour les images EL, les zones claires de l'image indiquent les cellules actives, tandis que les régions plus sombres d'émission de lumière à bande basse représentent des régions défectueuses. Aussi, ils ont utilisé l'imagerie PL pour analyser les modules avec une résistance série ainsi qu'une erreur de diode de dérivation en circuit ouvert. Alors que PL relativement moins sensible à la manœuvre ainsi que très résistant aux éclats par rapport à EL [43].

I.6.3.3 Imagerie par fluorescence UV

Cette méthode consiste à analyser le spectre de fluorescence UV à l'aide d'un spectrophotomètre ainsi qu'Outil d'imagerie par fluorescence UV. Méthode d'imagerie par fluorescence UV exciter les fluorophores présents dans l'encapsulation du module [44]. La **Figure I.8** montre une image de fluorescence UV typique d'un module PV. Dans la littérature récente, de nombreux ont déployé une imagerie par fluorescence UV spéciale pour évaluer l'EVA, décoloration et fissures dans les modules PV. Bien que la technique d'imagerie par fluorescence UV peut être déployé pour identifier les fissures, plus efficacement lorsque le temps est limité exposition de la scène.

Emirats arabes unis, ont étudié les différents défauts et les modes de dégradation qui ont été observés dans certains modules PV installés depuis 5 ans en utilisant fluorescence UV, EL, inspection visuelle microscopique (MVI) et l'analyse I-V illuminée [45].

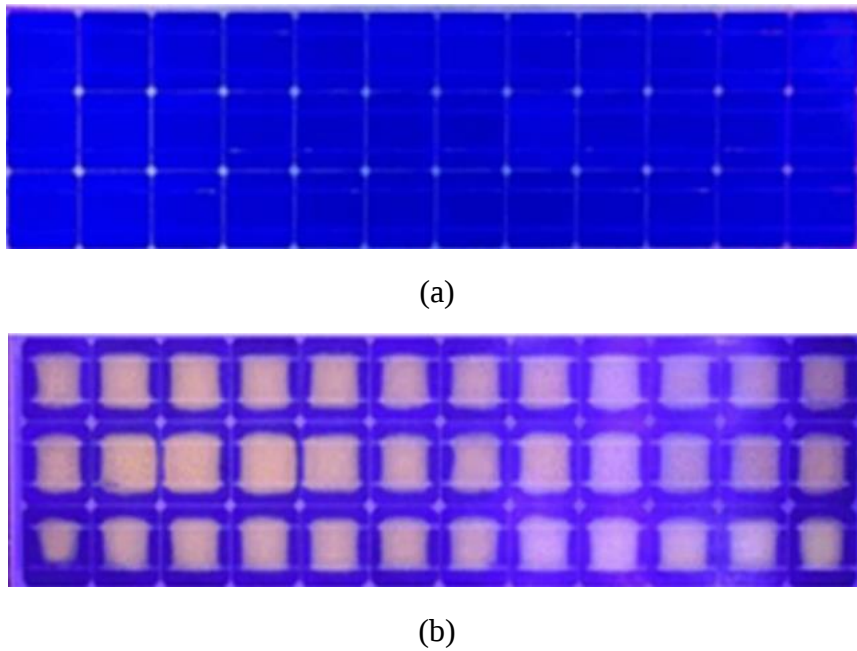


Figure I.8: Images types de fluorescence UV d'un module PV (a) non exposé à l'aide d'une caméra CMOS, (b) Image à échelle de gris avec CCD [46]

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des notions fondamentales pour comprendre les énergies renouvelables, en nous concentrant sur l'énergie solaire et en établissant une comparaison avec l'énergie éolienne. Nous avons examiné plusieurs critères, tels que la disponibilité des ressources, la densité de puissance et l'efficacité énergétique, afin d'évaluer la viabilité des deux sources d'énergie.

Nous avons également abordé le spectre solaire, qui décrit la distribution de la lumière du soleil en fonction de la longueur d'onde, et la manière dont il est utilisé pour maximiser l'efficacité des cellules photovoltaïques. Nous avons également présenté les différents modes de dégradation d'un système photovoltaïque, tels que la corrosion, l'ombrage et la défaillance des cellules, et exploré les techniques d'identification permettant de détecter et de résoudre ces problèmes.

Chapitre II : Modélisation d'un système PV

II.1 Introduction

Le processus de création d'un modèle pour un système photovoltaïque est un élément essentiel de la conception, de la simulation et de l'optimisation de son installation et facilite l'estimation de la production d'énergie électrique en fonction de divers facteurs, y compris, mais sans s'y limiter, l'irradiation solaire, la température ambiante et les propriétés des modules photovoltaïques. L'utilisation de modélisation facilite une compréhension plus complète de la fonctionnalité du système et l'identification des problèmes potentiels avant qu'ils ne se manifestent lors d'une éventuelle dégradation.

Le présent chapitre entreprend un examen complet des diverses facettes impliquées dans la modélisation d'un système photovoltaïque. Il comprendra une analyse des modèles mathématiques, des outils de simulation, des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et des techniques d'optimisation de la production d'énergie.

II.2 Les normes d'une installation photovoltaïque

Nous avons abordé le sujet des normes relatives aux installations électriques en raison de l'importance de la qualité dans le secteur photovoltaïque, qui est étroitement liée à la performance. C'est pourquoi il est essentiel de procéder à des tests spécifiques sur tous les composants d'un système photovoltaïque. En se conformant aux essais définis par les normes internationales, le fabricant peut garantir que le système photovoltaïque en cours de test satisfait aux exigences en termes d'efficacité énergétique, de résistance mécanique, de résistance aux chocs thermiques, de sécurité, de conformité et de facilité d'entretien de l'installation. Cela contribue à assurer son fonctionnement optimal à long terme. En respectant les normes, nous renforçons l'intégrité à long terme de nos installations [27].

Les deux principaux organismes de normalisation internationaux dans le domaine électrotechnique sont la CEI (Commission Electrotechnique Internationale) et l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) [47].

Le **Tableau II.1** montre les principales normes d'une installation photovoltaïque.

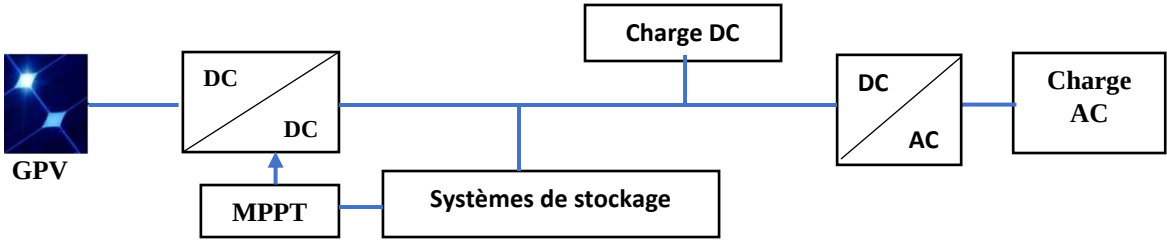
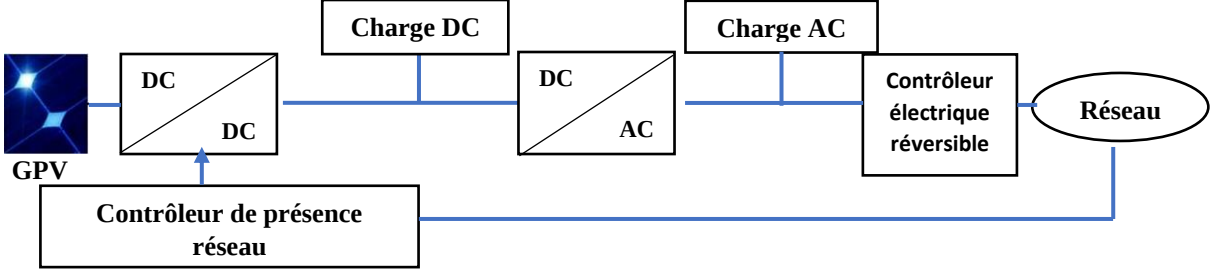
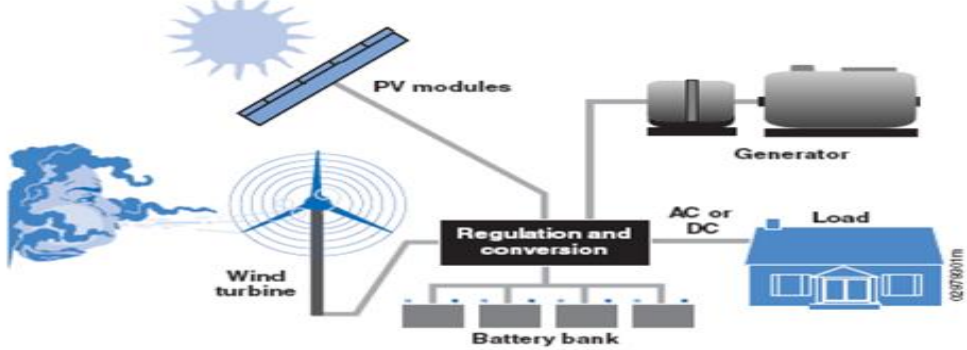
Tableau II.1: Les normes d'une installation photovoltaïque

Normes du module photovoltaïque	-La norme IEC 61215 qui définit les exigences pour les modules solaires en silicium cristallin destinés à une utilisation dans des applications en extérieur. -La norme IEC 61730 qui spécifie les exigences de sécurité pour les modules solaires. -La norme IEC 61701 qui évalue la résistance à la corrosion des modules photovoltaïques dans des environnements salins. -La norme IEC 62716 qui évalue la résistance des modules solaires aux conditions environnementales telles que la chaleur, l'humidité et la lumière.
Normes de la Partie courant continu	-La norme IEC 60364-7-712 :2017 "Installations électriques à basse tension - Partie 7-712. -La norme IEC 60947-2 :2016 "Appareillage de connexion et de commande basse tension - Partie 2. -La norme IEC 62548 :2015 "Systèmes photovoltaïques - Exigences générales pour les composants, les configurations et les performances de test".
Normes de l'onduleur	-Norme IEC 62109-1 : "Sécurité des onduleurs électroniques de puissance - Partie 1 : Exigences générales". -Norme IEC 62109-2 : "Sécurité des onduleurs électroniques de puissance - Partie 2 : Exigences particulières pour les onduleurs". -Norme IEC 61683 : "Systèmes photovoltaïques - Exigences de performance" -Norme IEEE 1547 : "Norme pour les interconnexions d'énergie distribuée avec les réseaux électriques"
Normes de la partie courant alternatif	-Norme IEC 62446 : "Exigences pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau". -Norme CEI 61727 : "Systèmes photovoltaïques - Caractéristiques de conception". -Norme CEI 61683 : "Systèmes photovoltaïques - Exigences de performance".

II.3 Les différents types de systèmes photovoltaïques

Le **Tableau II.2** montre les principaux types de système photovoltaïque.

Tableau II.2: Les types du système photovoltaïque

Système PV	Description
Système PV autonome	Les installations autonomes ne sont pas connectées au réseau et doivent garantir une couverture de charge constante. Les générateurs photovoltaïques ne produisent pas suffisamment de puissance pour répondre à la demande de la charge, ce qui nécessite un système de stockage d'énergie pour maintenir l'autonomie de l'installation [24]. 
Système PV connecté au réseau	Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau produisent de l'énergie localement, ce qui réduit le besoin d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Cette mutualisation de la production permet de sous-dimensionner les équipements complémentaires, comme les batteries d'accumulateurs, qui peuvent servir d'alimentation de secours en cas de panne de réseau [24]. 
Système PV hybride	Les systèmes hybrides, également indépendants du réseau électrique, sont constitués d'un GPV combiné à une autre source d'énergie telle qu'une éolienne ou un générateur à base de carburant, ou les deux. La production d'électricité d'un tel système hybride est plus constante et fluctue moins que celle de chacun des deux sous-systèmes composants [24], [48]. 

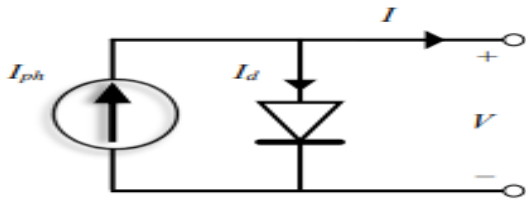
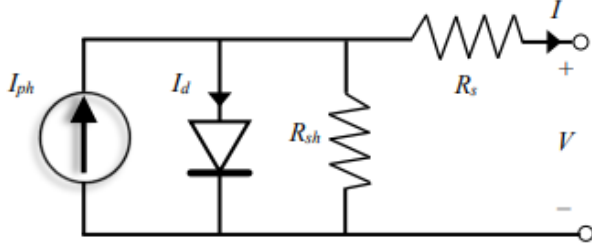
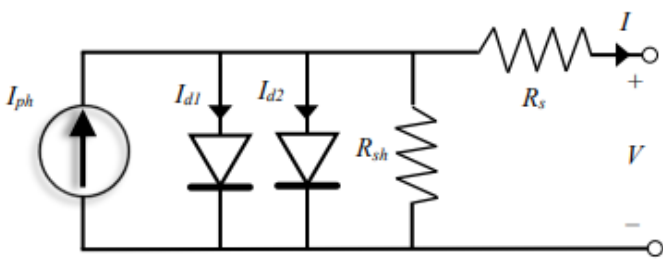
II.4 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs modèles électriques caractérisant le fonctionnement de la cellule photovoltaïque, et ils ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. En général, nous avons trois modèles différents en fonction de la modélisation [49].

Il est important de comprendre que ces modèles sont conçus pour décrire la relation entre les caractéristiques électriques de la cellule et les conditions externes telles que la lumière, la température et la charge [49].

Les modèles électriques de la cellule photovoltaïque (**Tableau II.3**) ont comme facteur commun la considération de la cellule PV comme générateur du courant idéal. Cela signifie que le courant généré par la cellule photovoltaïque est considéré comme étant indépendant de la tension aux bornes de la cellule, ce qui est une approximation raisonnable dans de nombreuses situations [49].

Tableau II.3: Modèles électriques de la cellule photovoltaïque [19]

Modèle	Schéma électrique
Modèle simplifié	
Modèle à une diode (à 5 paramètres)	
Modèle à deux diodes (à 7 paramètres)	

Dans le reste de notre travail, nous avons utilisé le modèle à une diode avec prise en compte des pertes ohmiques (résultant des fuites de courant et des résistances de contact) pour les technologies des panneaux solaires sur lesquels nous travaillons, car il est reconnu comme suffisamment représentatif (Mambrini, 2014). Les équations qui régissent le fonctionnement de ce circuit électrique équivalent sont rappelées ci-dessous. Le photocourant I_{ph} produit par le générateur de courant dépend des caractéristiques du semi-conducteur utilisé [19].

Le courant généré par ce modèle est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (II.1)$$

Avec:

$$I_{sh} = \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right) \quad (II.2)$$

Donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{A \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \right) \quad (II.3)$$

Avec :

$$V_t = \frac{K \cdot T}{q} \quad (II.4)$$

Tel que :

R_s : la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

R_{sh} : la résistance modélisant les courants de fuites de la jonction.

I_s : courant de saturation inverse de la diode.

V_t : potentielle thermodynamique.

K : la constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Joules/Kelvin).

T : la température de la cellule en Kelvin.

q : la charge d'un électron $= 1,6 \cdot 10^{-19} C$.

A : le facteur d'idéalité de la jonction.

V : la tension aux bornes de la cellule.

II.5 Association des cellules photovoltaïques

Les associations de panneaux photovoltaïques sont un élément clé pour obtenir une installation solaire fonctionnelle. Les panneaux peuvent être connectés en série, en parallèle ou en une combinaison de ces deux types d'association, appelée association mixte. L'association en série consiste à connecter les panneaux les uns à la suite des autres pour augmenter la tension du système, tandis que l'association en parallèle consiste à connecter les panneaux côte à côte

pour augmenter l'intensité du courant électrique. L'association mixte combine ces deux méthodes pour augmenter la tension et l'intensité [50]. (Comme illustre la **Figure II.1**)

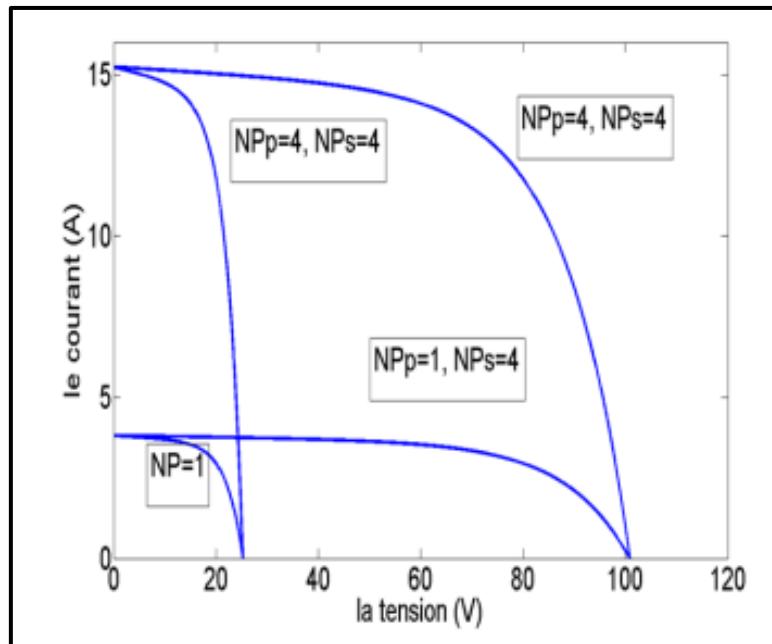


Figure II.1: Association des cellules photovoltaïque [24]

La manière dont les panneaux sont associés dépend des besoins électriques de l'installation et des spécifications des panneaux eux-mêmes. Une association en série est souvent utilisée pour des installations à haute tension, tandis qu'une association en parallèle est souvent utilisée pour des installations à haute intensité. L'association mixte est utilisée pour des installations nécessitant à la fois une haute tension et une haute intensité [51].

II.6 Protection classique d'un GPV

Lorsqu'un système photovoltaïque est destiné à produire de l'énergie électrique sur une longue période, il est essentiel de garantir sa durée de vie en ajoutant des protections électriques. Les pannes destructrices peuvent être évitées par l'ajout de ces protections, qui préviennent les dommages dus à la combinaison de cellules en série et de panneaux en parallèle [52].

Dans les installations photovoltaïques actuelles, deux types de protections classiques sont utilisés comme illustre la **Figure II.2**.

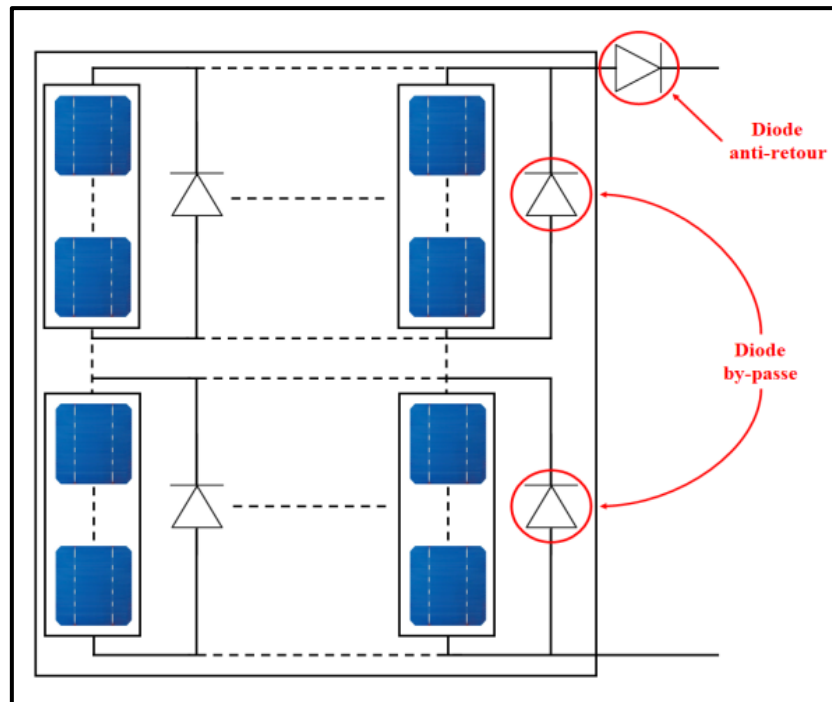


Figure II.2: Diodes de protection du module photovoltaïque [1]

La diode anti-retour est utilisée pour empêcher un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut se produire lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou lorsqu'une charge en connexion directe bascule du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit [53].

Les diodes by-pass sont également utilisées pour isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène. Cette technique permet d'éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. Cependant, la mise en conduction de ces diodes peut affecter la caractéristique de sortie du générateur en perdant une partie de la protection d'énergie et en présence de deux maximums de puissance [53].

Il est donc important de prendre en compte ces éléments lors de la conception et de l'installation d'une installation photovoltaïque afin d'optimiser sa performance et d'assurer sa durabilité [1].

II.7 Eléments d'un système photovoltaïque

Les éléments constitutifs d'un système photovoltaïque (**Figure II.3**) varient en fonction de l'usage prévu, qu'il s'agisse d'une habitation isolée ou connectée à un réseau, d'une utilisation avec ou sans batterie, et des besoins en convertisseurs de puissance. Plusieurs composants sont nécessaires pour former un système photovoltaïque [54] :

- les cellules solaires ou panneaux solaires qui créent le champ photovoltaïque.
- les régulateurs de charge qui optimisent le transfert d'énergie vers les batteries.
- Les convertisseurs DC/DC ou DC/AC.
- les batteries de stockage qui stockent l'énergie produite pour une utilisation ultérieure, d'autres éléments peuvent également être inclus selon les besoins spécifiques du système.

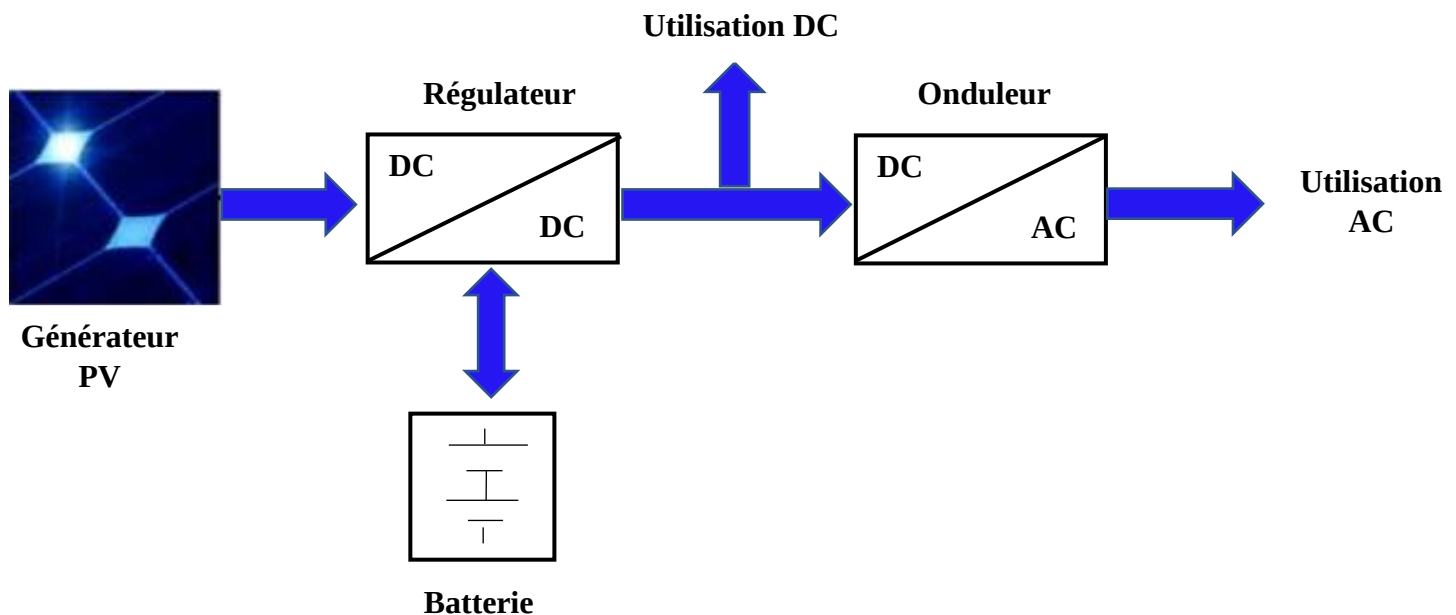


Figure II.3 : Architecture globale d'un système photovoltaïque

II.7.1 Convertisseur DC/DC

Les hacheurs sont des convertisseurs d'entrée de type DC qui permet d'augmenter ou diminuer la tension de sortie grâce à la commande des interrupteurs intégrées dans son circuit électrique. Il est utilisé pour contrôler le transfert d'énergie provenant d'une source continue vers une charge, avec un haut rendement énergétique, dans certaines situations, il peut également renvoyer de l'énergie à l'alimentation. Les hacheurs sont couramment utilisés dans les alimentations électriques ainsi que pour piloter des moteurs [55].

Le **Tableau II.4** montre le schéma électrique de trois types d'hacheur.

Tableau II.4: Les types de convertisseur DC /DC [56]

Type	Schéma électrique
Hacheur Buck	
Hacheur Boost	
Hacheur Buck-Boost	

Dans le chapitre suivant, nous avons adopté l'hacheur boost. Parce qu'il est capable d'élever la tension continue d'entrée du panneau solaire à un niveau supérieur de sortie, ce qui permet d'augmenter l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en énergie électrique. Car une tension plus élevée permet de réduire les pertes de puissance lors du transport de l'énergie.

De plus, l'hacheur boost permet également de réguler la tension et le courant de sortie, ce qui contribue à prolonger la durée de vie des appareils connectés au système photovoltaïque. La valeur moyenne de la tension de sortie donné par l'équation suivante :

$$V_{DC} = \frac{V_{PV}}{1-\alpha} \quad (II.5)$$

Avec :

V_{PV} : la tension d'entrée du convertisseur.

α : le rapport cyclique.

II.7.2 La commande MPPT

Diverses études ont été menées sur les algorithmes de suivi du point de puissance maximale MPP, en prenant en considération les paramètres du système ainsi que les variations climatiques [57].

Le rôle de la commande MPPT "Maximum Power Point Tracking", est d'optimiser la production d'énergie du générateur PV en ajustant en temps réel la tension et le courant de sortie afin de maximiser la puissance fournie par le panneau solaire. Cela permet d'assurer un rendement maximal et une utilisation optimale de l'énergie solaire disponible [58].

Il existe plein de méthode MPPT moderne, classique [59]. On aura basé sur deux méthode MPPT classique *P&O* et *INC-COND* dans la simulation.

II.8 Vieillissements d'un panneau photovoltaïque

II.8.1 Approche basée sur les circuits

Pour modéliser le vieillissement des modules photovoltaïques, une approche basée sur les circuits électriques est utilisée. Chaque composant électrique du circuit suit une loi de vieillissement établie à partir de mesures discrètes effectuées lors de tests accélérés représentant des conditions environnementales spécifique (chaud/froid, aride/humide, tempéré/tropical, montage ,etc.) afin de reproduire une utilisation précise du module photovoltaïque (**Figure II.4**). Les variables physique telles que la transmittance $\tau(t)$ de l'encapsulant et de verre ,les résistances $R_i(t)$, les capacités $C_i(t)$ ou les inductances $L_i(t)$ peuvent être intégrées dans le modèle pour refléter les différentes conditions d'exposition en extérieur [60].

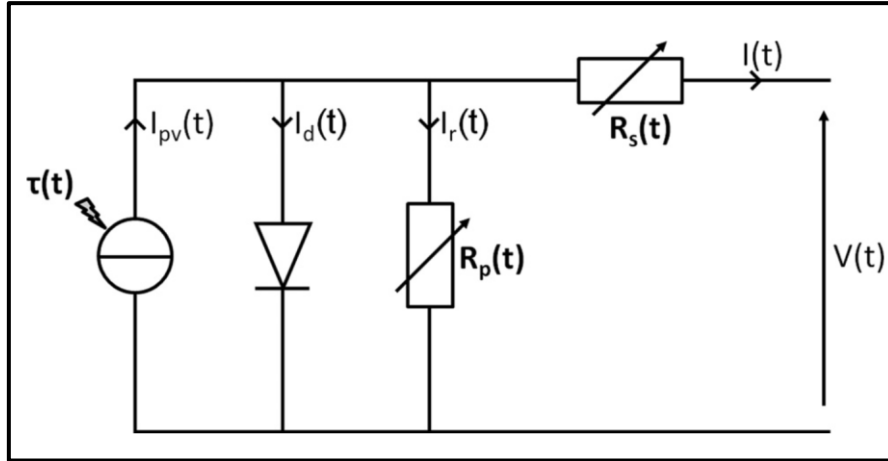


Figure II.4 : Circuit équivalent de module photovoltaïque avec des variables pour prendre en compte le vieillissement [60]

Notre étude se concentre sur deux aspects spécifiques : l'augmentation de la résistance série et la diminution de la transmissivité.

II.8.2 Mise en œuvre le cas du module photovoltaïque en Silicium

Il est courant de modéliser le courant électrique et la tension produits par un module photovoltaïque en silicium à l'aide d'un circuit équivalent à une diode, qui comprend une source de courant idéale en parallèle avec une diode reproduisant la recombinaison, une résistance en série correspondant à la résistance de la jonction PN et des contacts métalliques, ainsi qu'une résistance de fuite en parallèle représentant la résistance des contacts métalliques et les résistances de fuite aux bords de la cellule solaire. Cependant, avec le temps, les caractéristiques du circuit se détériorent, entraînant une variation temporelle du courant et de la tension produits. À un instant t donné, l'intensité I est liée à la tension V par l'équation (II.3) et les équations suivantes [60]:

$$I_{ph}(t) = (I_{ph,n} + K_I \cdot \Delta T) \frac{G(t)}{G_n} \quad (\text{II.6})$$

$$I_s = \frac{I_{sc,n} + K_I \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_v \cdot \Delta T}{a \cdot V_t}\right) - 1} \quad (\text{II.7})$$

$$G(t) = \tau(t) \cdot G_0 \quad (\text{II.8})$$

Tel que :

$I_{ph,n}$: le photo-courant nominal dans les conditions STC (A).

$V_{oc,n}$: la tension nominale du circuit-ouvert (V).

K_I : le coefficient (courant du court-circuit/température) ($A \cdot K^{-1}$).

K_v : le coefficient (tension du circuit ouvert/température) ($V.K^{-1}$).

$$\Delta T = T - T_n \text{ (K)}.$$

$G(t)$: L'irradiance incidente effective sur la cellule, transmise par le verre et le matériau d'encapsulation ($W.m^{-2}$).

$\tau(t)$: La diminution du transmittance optique en fonction du temps de vieillissement (t).

G_0 : L'irradiance incidente sur la cellule, transmise par le verre et le matériau d'encapsulation.

G_n : L'irradiation nominale en ($W.m^{-2}$).

II.8.3 Lois de vieillissement d'un panneau photovoltaïque

Pour tenir compte du vieillissement des modules photovoltaïques, les effets de dégradation optique et électrique sont pris en compte [60]. Les vitesses de dégradation de la transmissivité (pertes optiques du verre et des pertes d'encapsulation) α_{opt} et de la résistance série (détérioration des pièces électriques) α_{RS} sont définies par des valeurs accélérées.

Les pertes optiques à la fois de l'encapsulant EVA et du verre sont évaluées avec la mesure de la transmittance hémisphérique spectrale après 10 ans d'exposition avec un échantillon en anneau retiré des modules vieillis sur le terrain.

L'abaissement de la transmittance est calculé avec des valeurs spectrales comprises dans la plage de longueurs d'onde de 450-1200 nm.

Les taux de dégradation de la résistance série est déterminé en considérant une variation linéaire des valeurs mesurées acquises toutes les 500 heures pour un test accéléré de la chaleur effectué sur des cellules de silicium encapsulées en considérant que 1000 heures d'essai équivalent à 20 ans de service [61] .

La dispersion des valeurs expérimentales est de $\pm 10\%$. Les coefficients de dégradation obtenus sont :

$$\alpha_{opt} = 0,6\% / \text{an et}$$

$$\alpha_{RS} = 0,23\% / \text{an}.$$

Les lois de dégradation, la réduction de la transmissivité τ et l'augmentation de la résistance en série R_s en fonction du temps T, sont données par les expressions (II.9) et (II.10) ci-dessous :

$$\tau(T) = \tau_0(-\alpha_{opt} \cdot T + 100\%) \quad (\text{II.9})$$

$$R_s(T) = R_{s0}(+\alpha_{RS} \cdot T + 100\%) \quad (\text{II.10})$$

Le point de puissance maximale diminue de 1% / an. Sur un grand échantillon, un taux de dégradation moyen de 0,8% et une valeur médiane de 0,5% / an ont été calculés [62].

II.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté une étude approfondie de la modélisation des systèmes photovoltaïques, qui comprend une analyse des modèles mathématiques, des outils de simulation, des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) et des techniques d'optimisation de la production d'énergie.

Nous avons également passé en revue les différents types de cellules photovoltaïques et leur association pour obtenir une puissance suffisante, ainsi que les convertisseurs DC/DC et la commande MPPT.

En outre, nous avons abordé les normes d'installation d'une centrale photovoltaïque et les lois de vieillissement des panneaux photovoltaïques.

Ce chapitre fournit des éléments clés pour une conception et une simulation précise ainsi qu'une optimisation efficace de la production d'énergie électrique dans les systèmes photovoltaïques.

Chapitre III : Validation de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide de la commande MPPT : une approche par simulation

III.1 Introduction

Il est crucial de surveiller la dégradation d'un système photovoltaïque autonome afin de garantir son bon fonctionnement à long terme. Nous savons que l'utilisation d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) peut considérablement optimiser la production d'énergie électrique. Cependant, l'efficacité de cette commande peut être impactée par divers facteurs de dégradation tels que la détérioration de la qualité des cellules photovoltaïques, les variations climatiques et les interférences électromagnétiques, entre autres.

Dans ce chapitre, nous examinerons le comportement d'un système photovoltaïque dégradé, avec et sans commande MPPT, afin de mieux comprendre l'effet de la dégradation sur le rendement de l'installation photovoltaïque. Nous utiliserons un modèle mathématique pour déduire les paramètres de dégradation et évaluer leur influence.

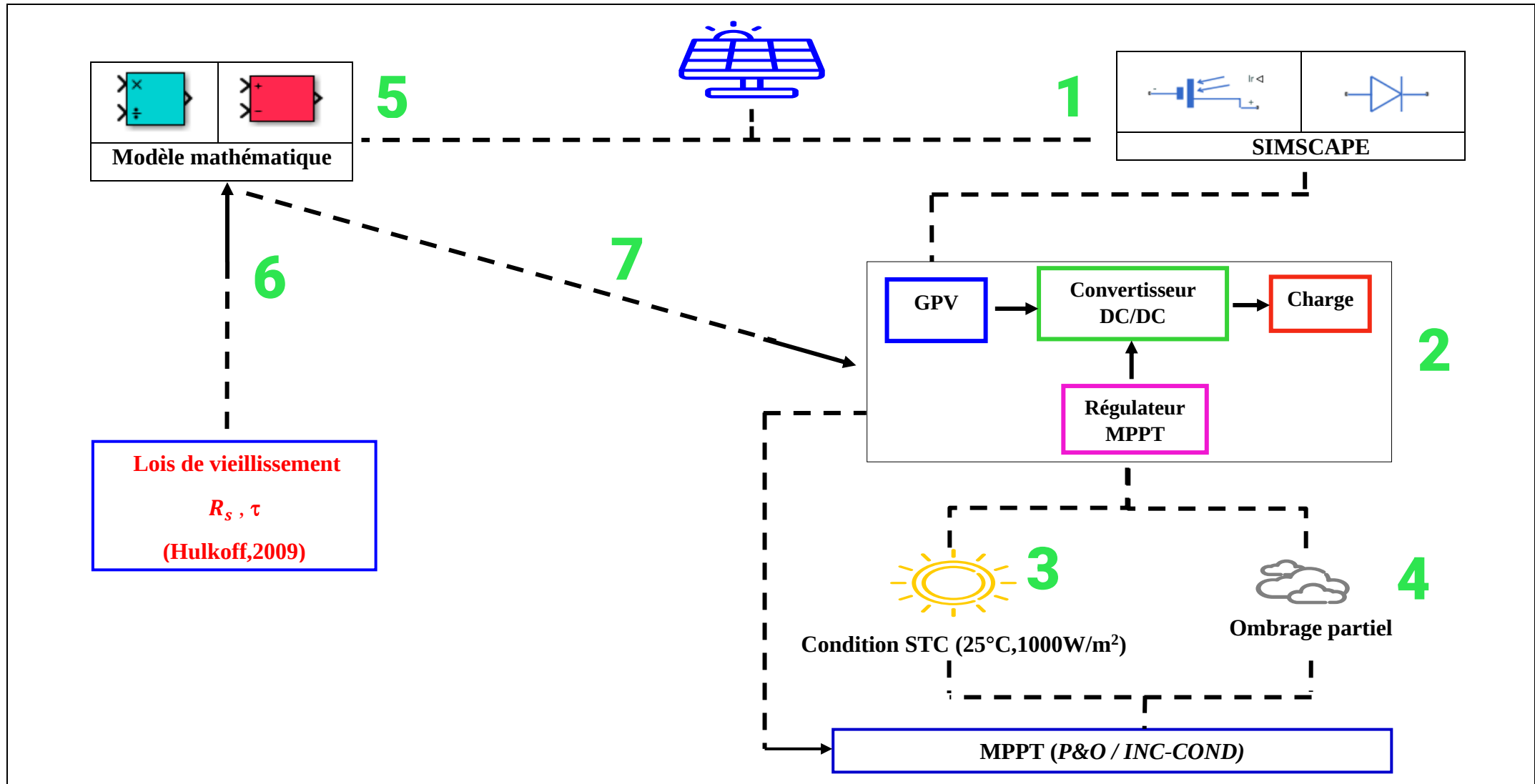


Figure III.1 : Résumé graphique des différentes étapes de la simulation

III.2 Simulation d'un système photovoltaïque avec SIMSCAPE

SIMSCAPE est la plateforme de modélisation physique et multi-physique disponible dans Simulink. Dans la catégorie "monde SIMSCAPE", les utilisateurs peuvent accéder à une grande variété de composants physiques sous forme de blocs de modélisation physique tels que des résistances, des condensateurs, des sources, des amortisseurs, etc [63].

L'utilisation de Simulink avec SIMSCAPE dans les simulations MATLAB peut apporter plusieurs avantages [64] . Voici quelques-unes :

- Simplicité de modélisation : SIMSCAPE permet de modéliser des systèmes physiques de manière plus intuitive et plus rapide que la programmation traditionnelle.
- Simulation plus précise : Les modèles créés avec SIMSCAPE peuvent être plus précis que les modèles traditionnels, car ils prennent en compte les effets physiques réels qui peuvent affecter la performance du système. Cela permet aux utilisateurs de simuler des systèmes plus complexes et plus précisément que les approches traditionnelles.
- Intégration avec d'autres outils MATLAB : SIMSCAPE est intégré avec d'autres outils MATLAB, tels que Simulink ce qui permet aux utilisateurs de créer des modèles de systèmes complets et de les simuler dans un environnement commun.

III.2.1 Présentation la chaine de conversion photovoltaïque

La chaine de conversion modélisée est représentée sur la **Figure III.2**. Elle se compose d'un panneau photovoltaïque de l'installation de type RG-P250W examinée par notre étude de cas et qui sera présenter dans le prochain chapitre, d'un convertisseur DC/DC (BOOST) avec commande MPPT (*P&O / INC-COND*), et d'une charge résistive.

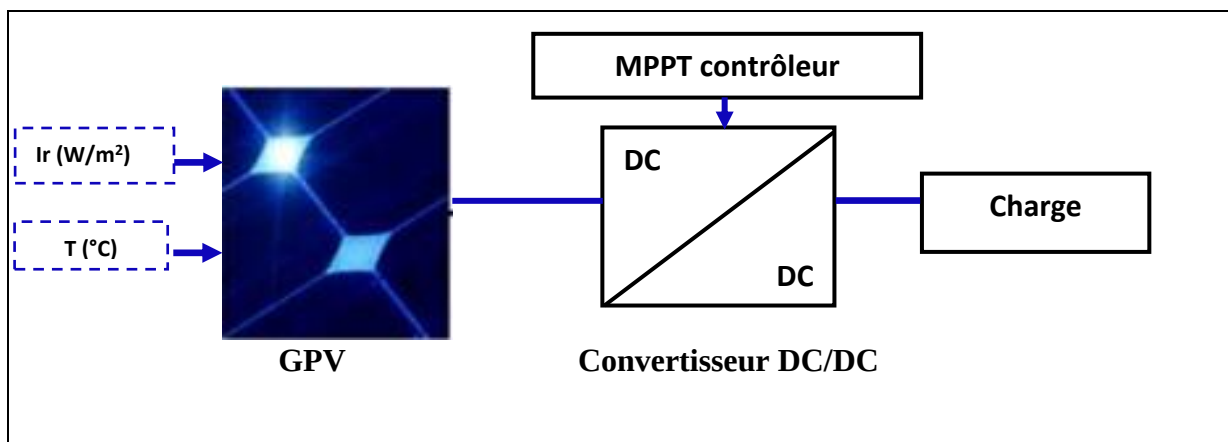


Figure III.2: Diagramme synoptique de la chaine de conversion photovoltaïque

III.2.2 Les schémas blocs de la simulation

Les schémas blocs de système photovoltaïque à étudier ainsi que les commandes MPPT utilisées sont présentés dans les figures suivantes : **Figure III.3**, **Figure III.4**, **Figure III.5** et **Figure III.6**.

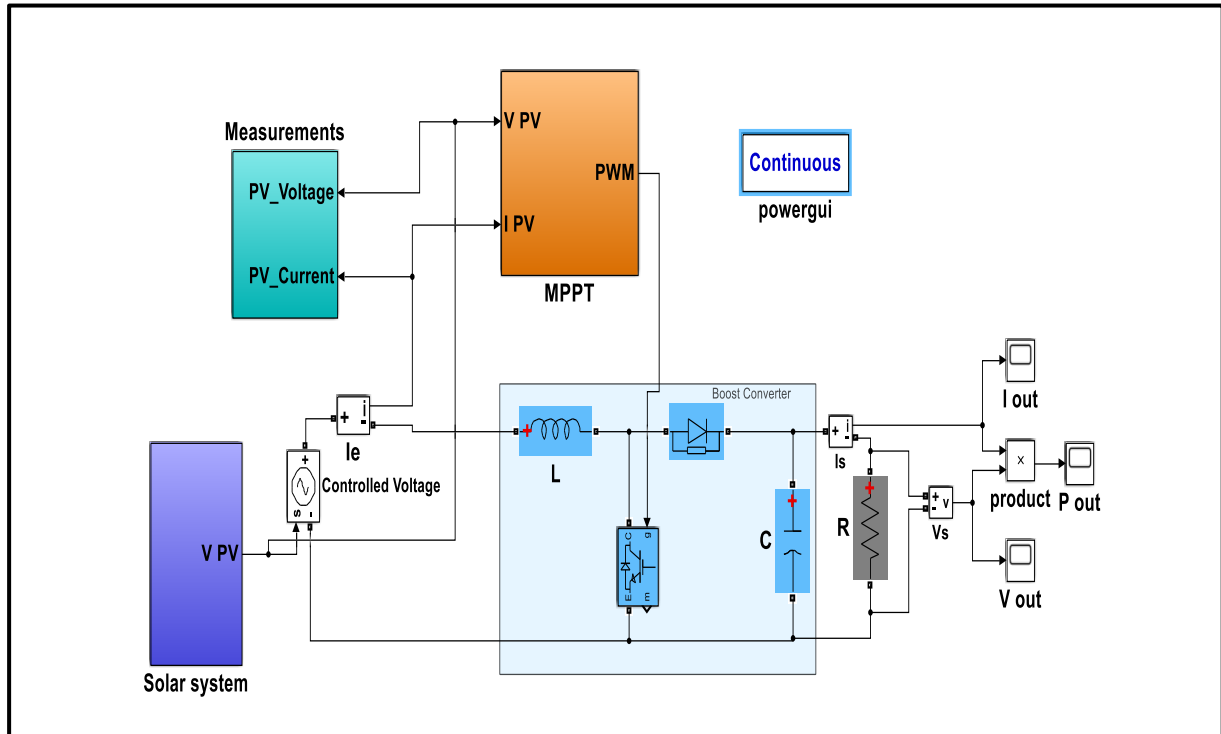


Figure III.3: Système photovoltaïque

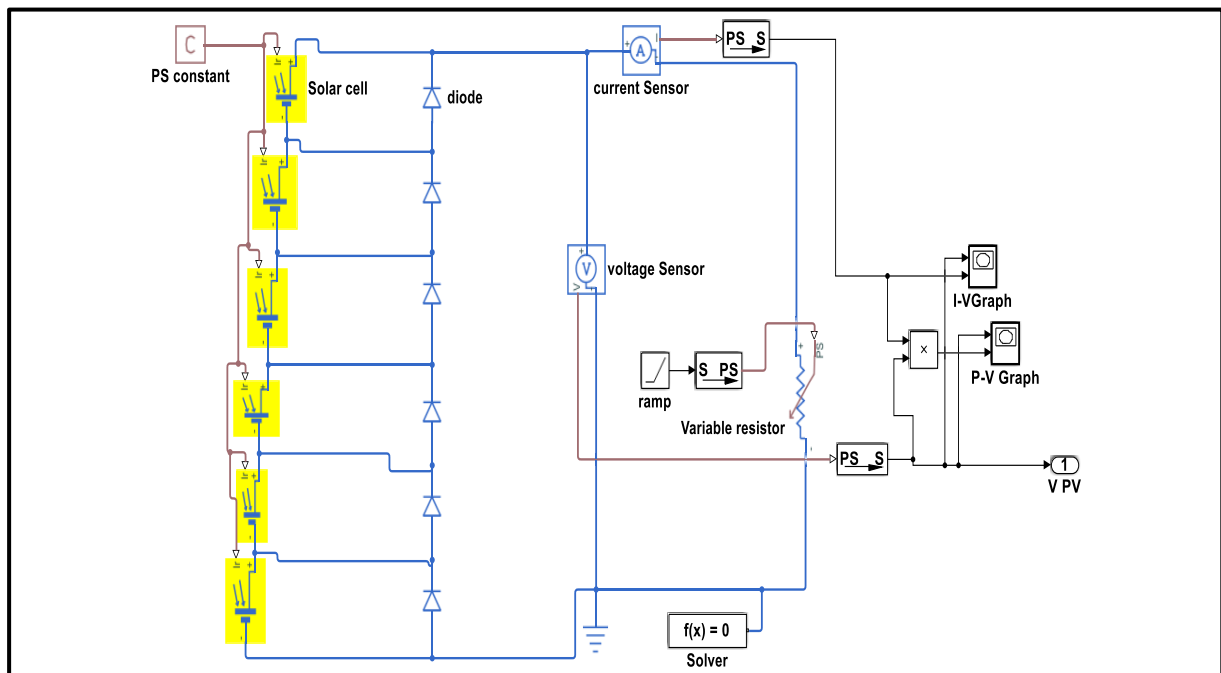


Figure III.4: Sous-système du module photovoltaïque avec SIMSCAPE

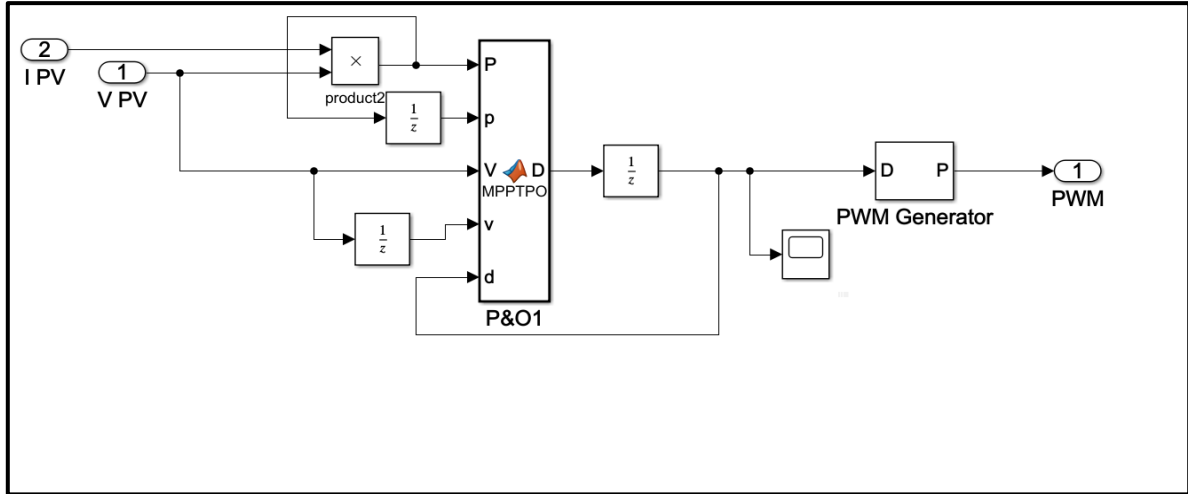


Figure III.5: Sous-système de la méthode MPPT P&O

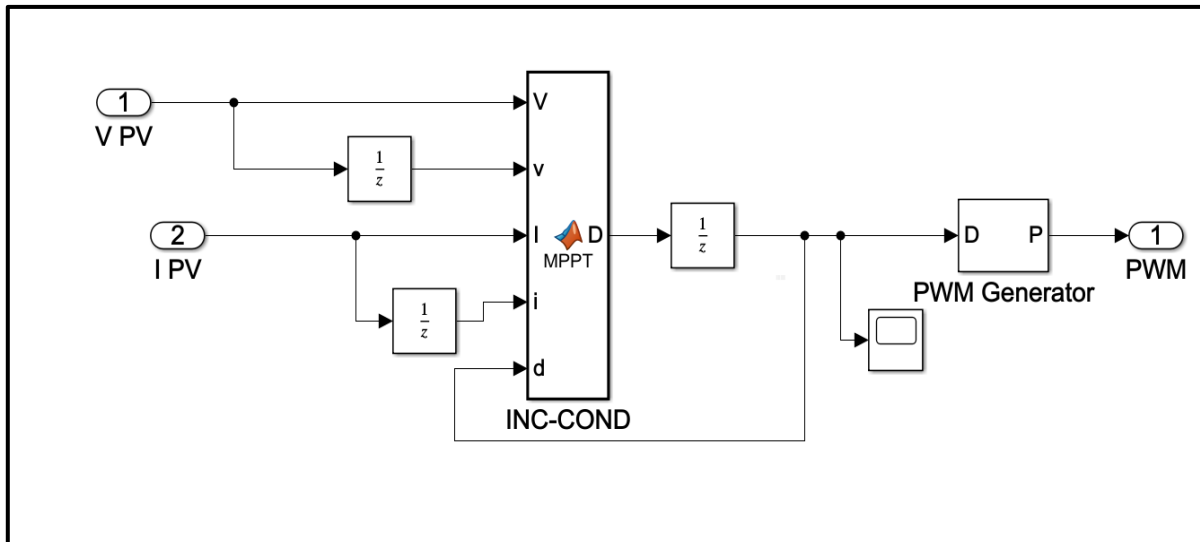


Figure III.6: Sous-système de la méthode MPPT INC-COND

Les paramètres de la simulation du système sont mentionnés dans l'annexe.

III.2.3 Les résultats de la simulation sans défaut avec les deux commande MPPT (P&O et INC-COND)

Nous avons procédé à une évaluation des performances de la commande MPPT en utilisant deux méthodes, à savoir *P&O* et *INC-COND*. Pour ce faire, nous avons simulé le fonctionnement d'un système photovoltaïque complet constitué d'un générateur photovoltaïque, d'un convertisseur élévateur (GPV-BOOST), d'une commande MPPT et d'une charge. Les simulations ont été effectuées sous des conditions atmosphériques fixes, avec un éclairement de 1000 W/m^2 et une température ambiante de 25°C .

Chapitre III Validation de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide de la commande MPPT

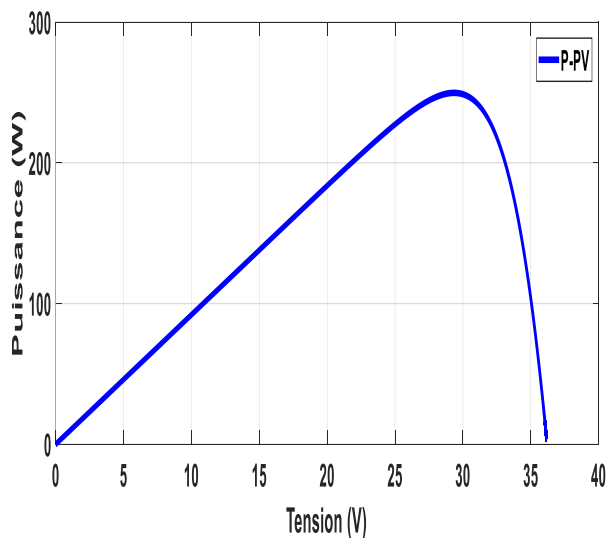
Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque ont été analysés et visualisés sous forme de figures, que nous présentons ci-dessous. Ces résultats permettent de déterminer les performances de chaque méthode de commande MPPT, notamment en termes de puissance de sortie du système photovoltaïque, de tension de sortie et de courant de sortie.

Les figures obtenues offrent ainsi une analyse détaillée des performances du système photovoltaïque sous différentes conditions de fonctionnement et permettent de comparer l'efficacité des deux méthodes de commande MPPT étudiées.

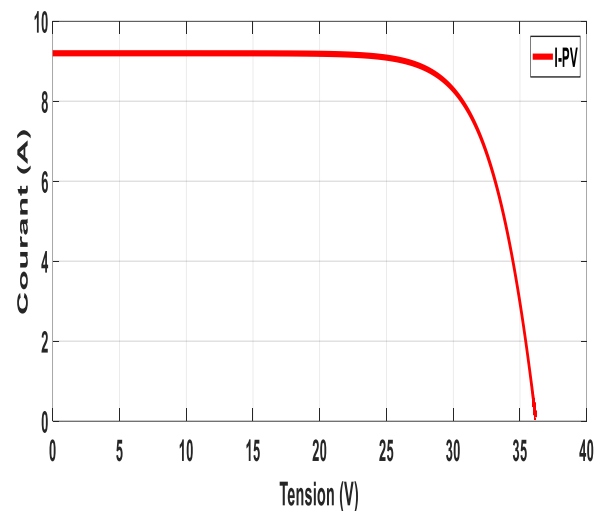
Il est à noter que le fonctionnement optimal du panneau photovoltaïque est atteint lorsque le point de puissance maximale (MPP) est atteint, correspondant à une puissance approximative de $P \approx 250\text{W}$.

Tableau III.1: Caractéristique du panneau dans les conditions STC

La caractéristique P-V du panneau sans défaut.



La caractéristique I-V du panneau sans défaut.

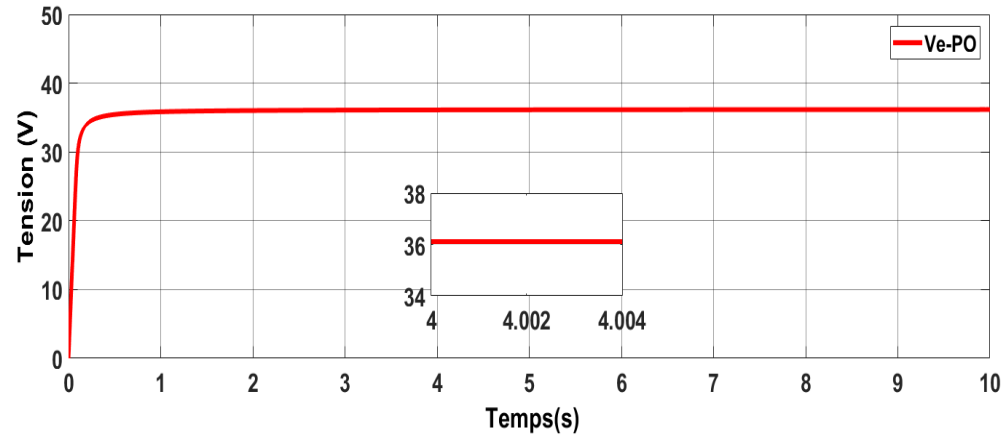


Chapitre III Validation de la dégradation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide de la commande MPPT

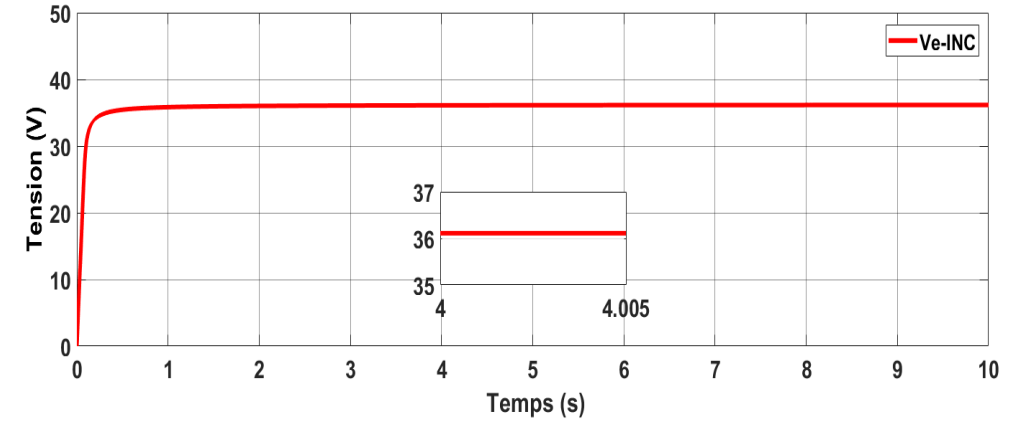
Tableau III.2: Les tensions d'entrée, sortie sans défaut avec les deux commande MPPT (*P&O* et *INC-COND*)

La méthode *P&O*

La tension d'entrée du convertisseur



La méthode *INC-COND*



La tension de sortie du convertisseur

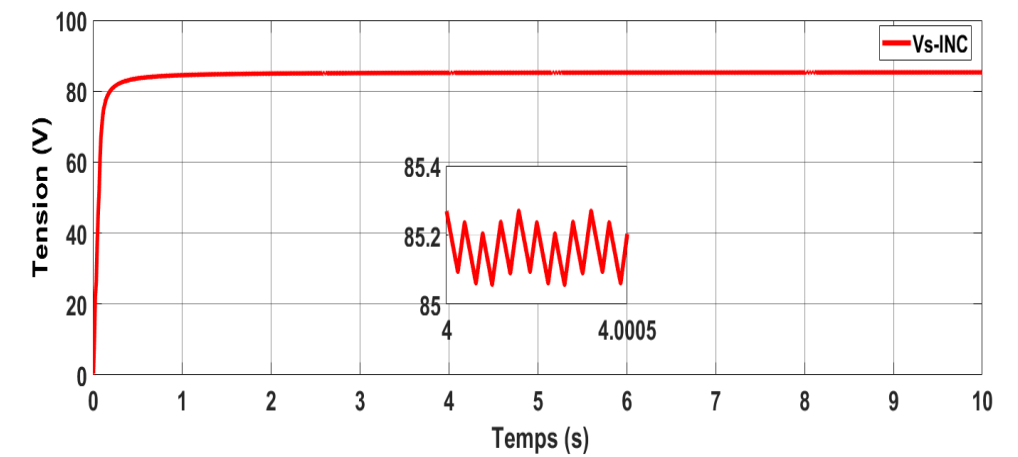
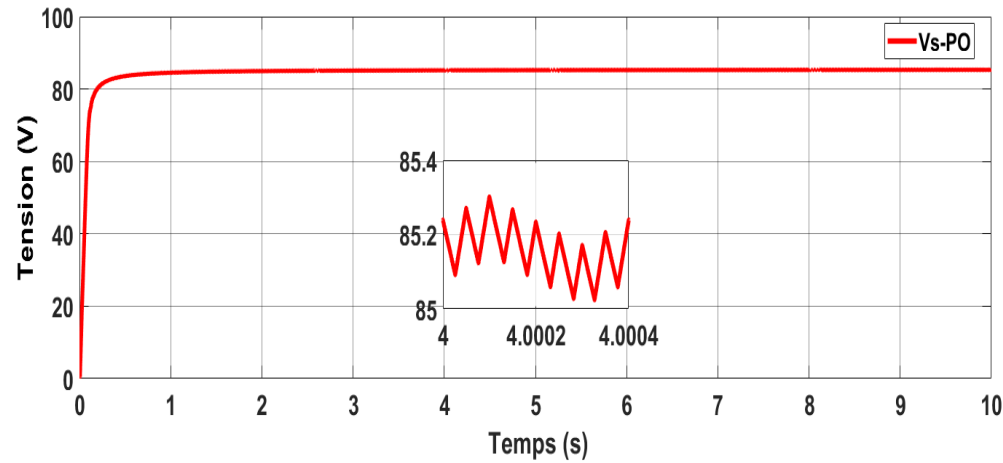
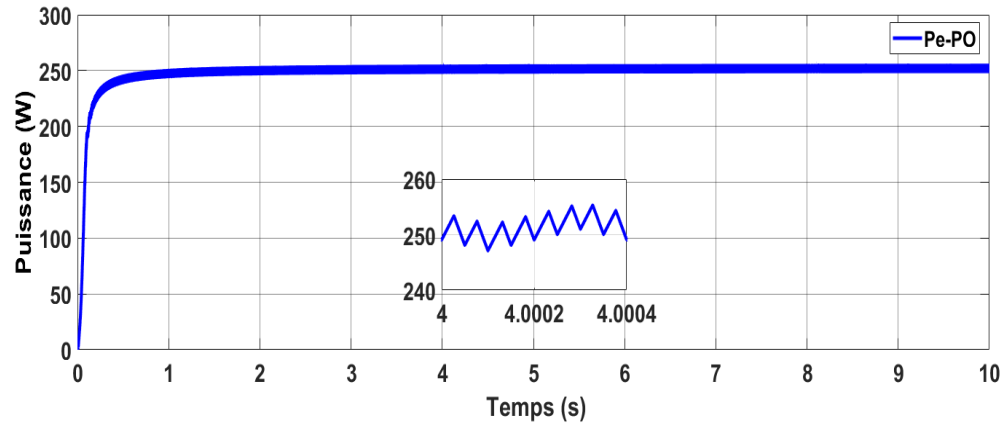


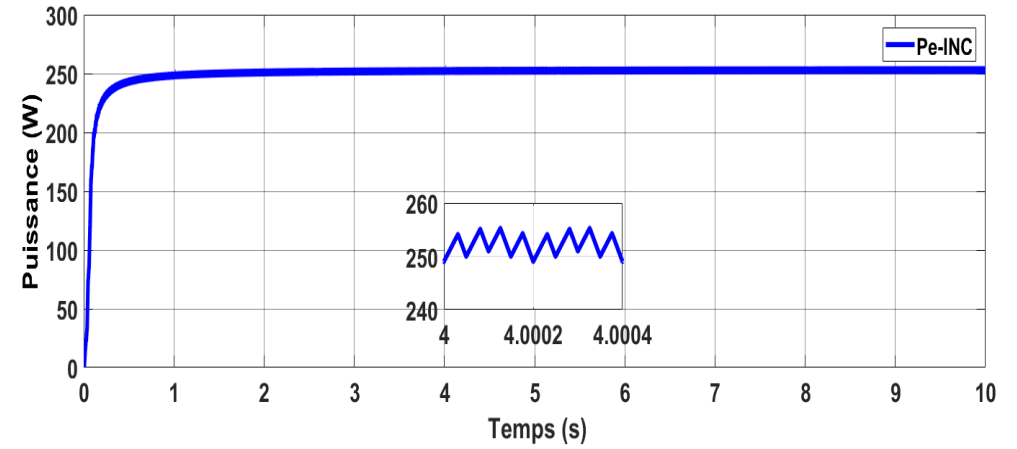
Tableau III.3: Les puissances d'entrée, sortie sans défaut avec les deux commande MPPT (*P&O* et *INC-COND*)

La méthode *P&O*

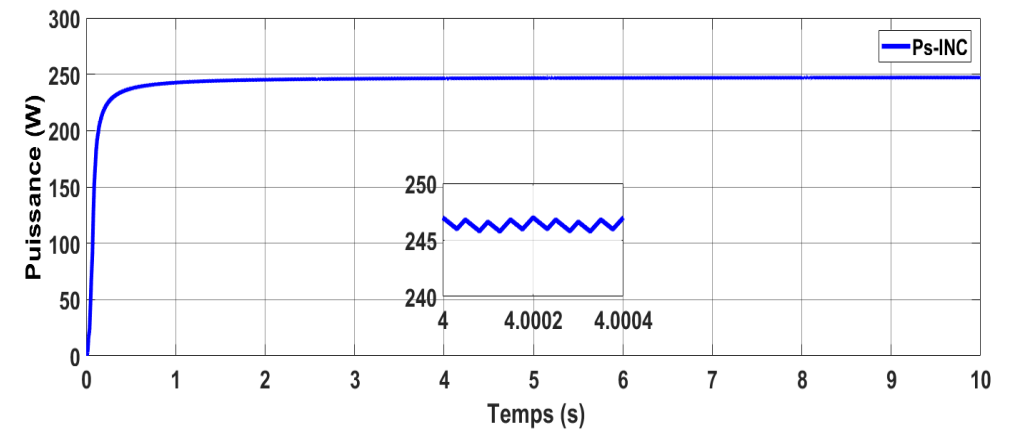
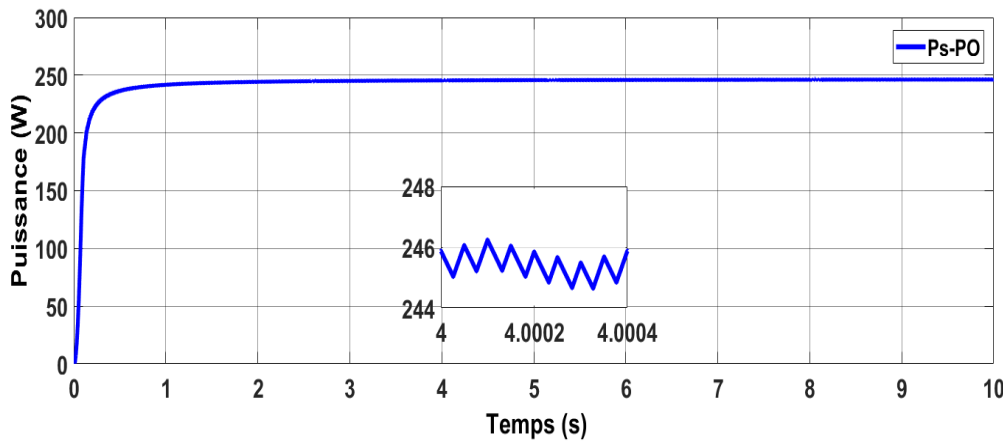
La puissance d'entrée du convertisseur



La méthode *INC-COND*



La puissance de sortie du convertisseur



Basant sur les conditions STC (Standard Test Conditions) : éclairement 1000 W/m^2 ; température de 25°C , les tableaux (**Tableau III.2** et **Tableau III.3**) ont permis de recueillir des données sur le fonctionnement du système photovoltaïque étudié.

Les résultats de ces simulations ont été compilés dans le **Tableau III.4** pour une meilleure présentation et une analyse approfondie des performances :

Tableau III.4: Comparaison entre les maximaux de *P&O* et *INC-COND* sans défaut

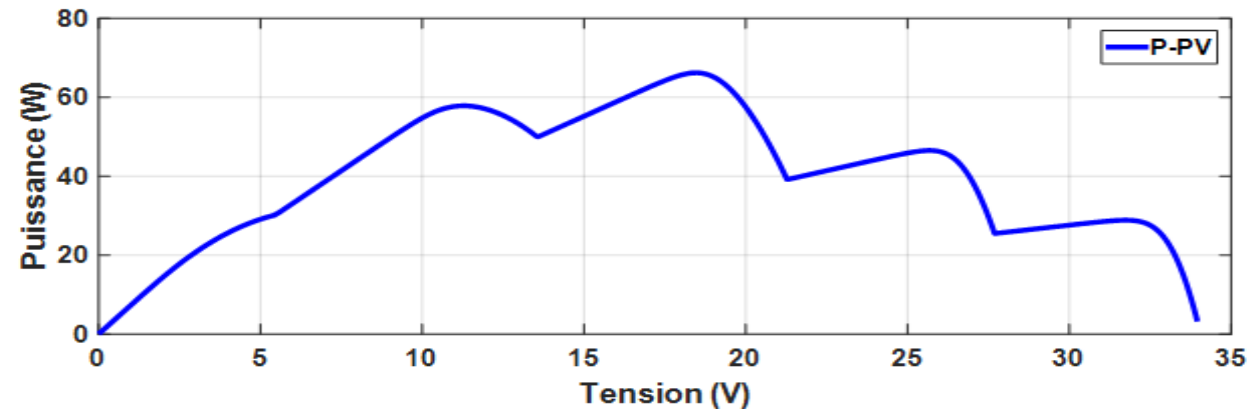
	<i>P&O</i>	<i>INC-COND</i>
La tension d'entrée (V_e)	36.16	36.16
Le courant d'entrée (I_e)	6.908	6.906
La puissance d'entrée (P_e)	249.8	249.8
La tension de sortie (V_s)	85.37	85.4
Le courant de sortie (I_s)	2.889	2.901
La puissance de sortie (P_s)	246.6	247.7
Le rendement de la méthode (η_{MPPT})	0.987	0.991

III.2.4 Évaluation des performances de deux commandes MPPT (type *P&O* et *INC-COND*) en présence d'un défaut d'ombrage partiel : résultats de simulation

Cette partie de l'étude a pour objectif d'évaluer le comportement du système en question face à un défaut d'ombrage partiel en effectuant des simulations à une température constante de 25°C et à différents niveaux d'éclairement (1000 W/m^2 , 800 W/m^2 , 600 W/m^2 , 400 W/m^2 , 200 W/m^2 , 100 W/m^2) avec l'utilisation de deux types de commande MPPT. Cette démarche vise à évaluer l'impact de l'ombrage partiel sur les performances du système.

Tableau III.5: Caractéristique du panneau avec défaut d'ombrage partiel

La caractéristique P-V du panneau avec défaut.



La caractéristique I-V du panneau avec défaut.

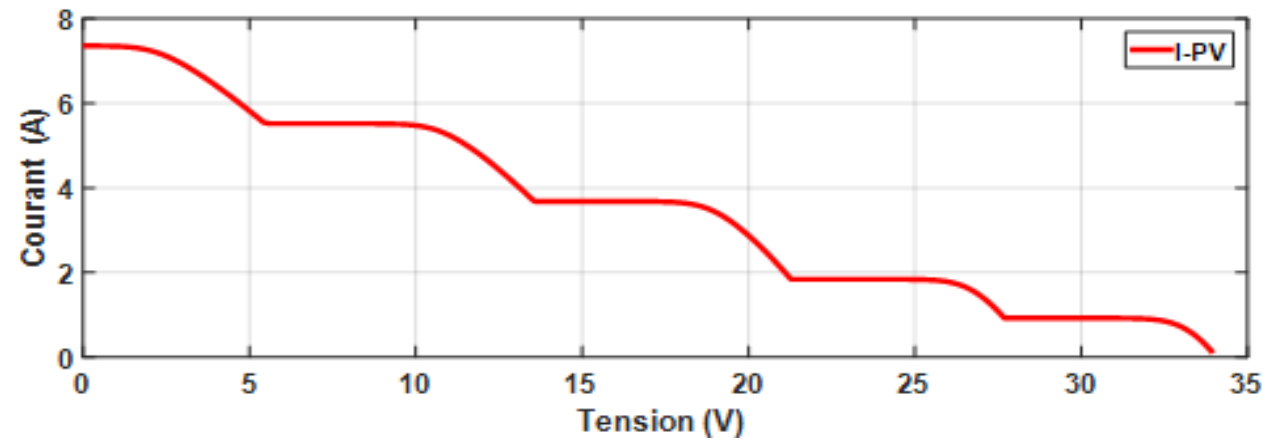
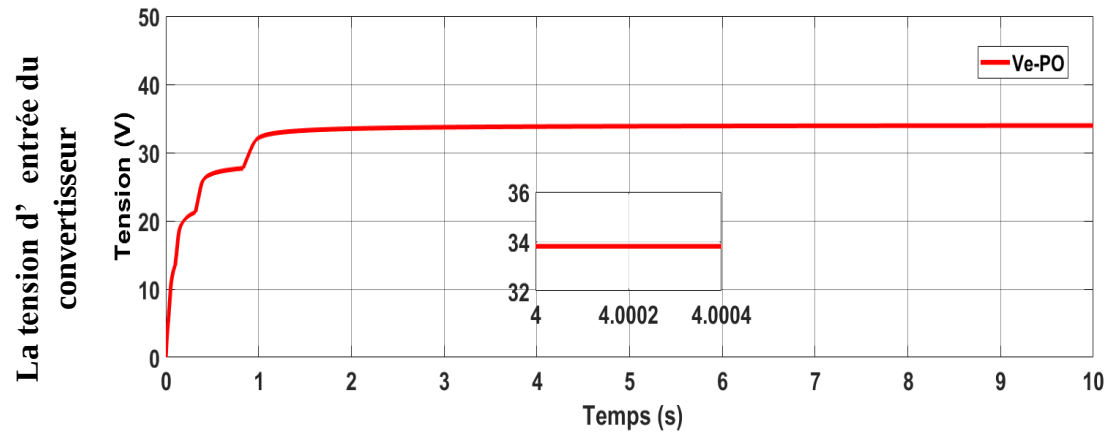


Tableau III.6: Les tensions d'entrée, sortie avec un défaut d'ombrage partiel par les deux commande MPPT (*P&O* et *INC-COND*)

La méthode *P&O*



La méthode *INC-COND*

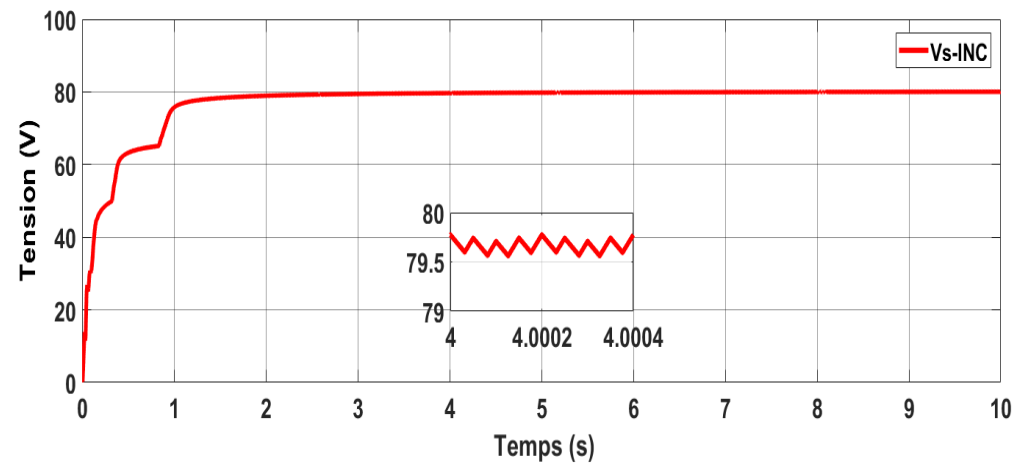
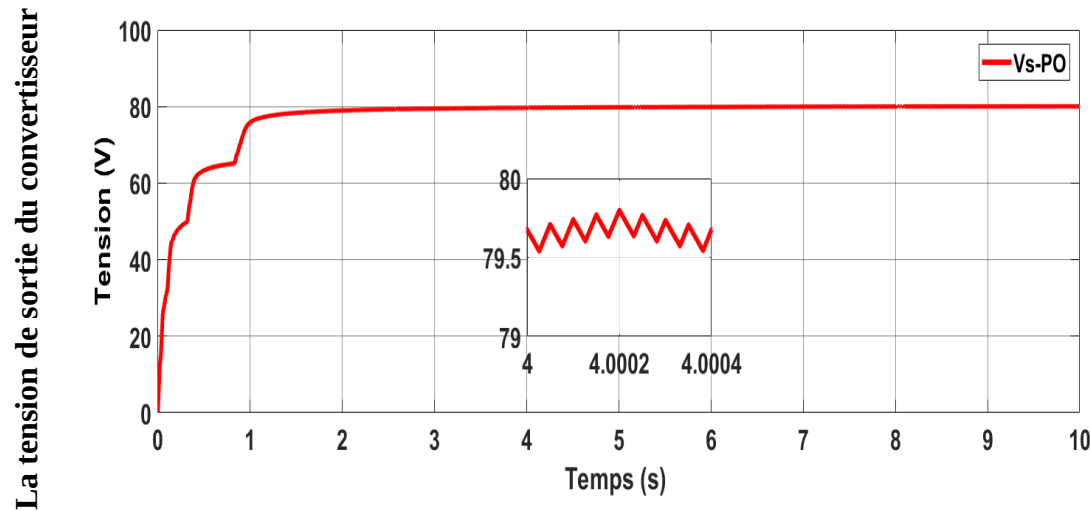
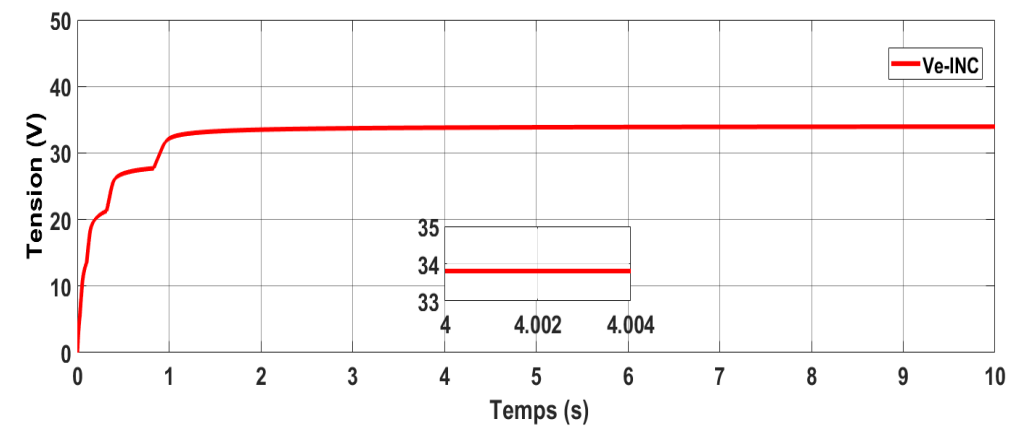
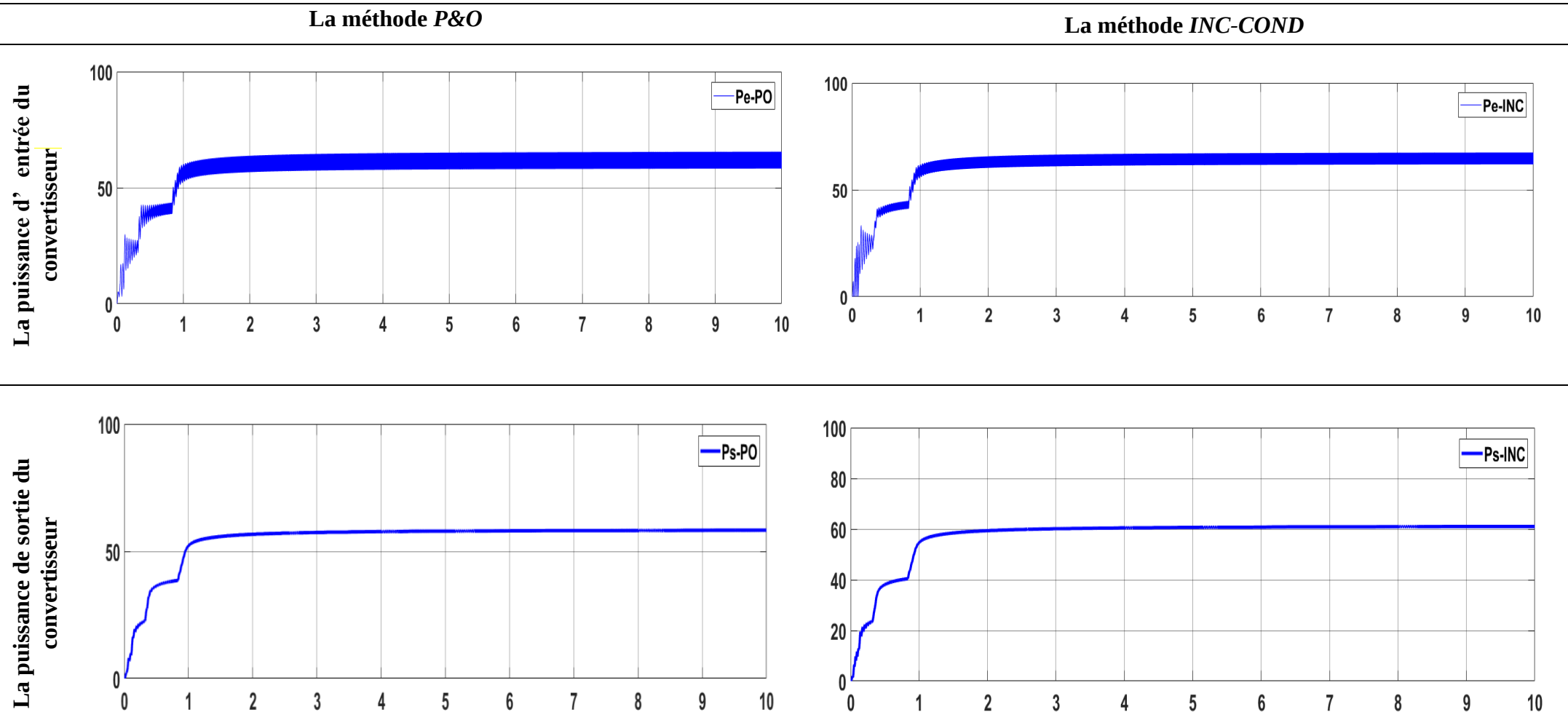


Tableau III.7: Les puissances d'entrée, sortie avec un défaut d'ombrage partiel par les deux commande MPPT (*P&O* et *INC-COND*)



Selon les conditions d'ombrage partiel et d'après les tableaux (Tableau III. 6 et Tableau III.7) on résume les résultats obtenus dans le Tableau III.8 :

Tableau III.8: Comparaison entre les maximaux de *P&O* et *INC-COND* (avec défaut d'ombrage partiel)

	<i>P&O</i>	<i>INC-COND</i>
La tension d'entrée (Ve)	33.96	33.96
Le courant d'entrée (Ie)	1.816	1.823
La puissance d'entrée (Pe)	61.69	61.92
La tension de sortie (Vs)	80.05	80.08
Le courant de sortie (Is)	0.7278	0.7627
La puissance de sortie (Ps)	58.26	61.07
Le rendement de la méthode (η_{MPPT})	0.944	0.986

III.2.5 Interprétation des résultats

Les résultats de simulation obtenus ont révélé que, sous des conditions de température et d'éclairement constantes, les courbes obtenues avaient une forme normale. Cependant, en modifiant l'éclairement, les courbes ont subi une déformation, présentant de nombreux maximal local qui peuvent affecter le fonctionnement des MPPT classiques qui s'arrêtent au premier maximum local. Les deux types de commande MPPT (*P&O* et *INC-COND*) ont permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau dans des conditions standards, mais en cas d'ombrage partiel, il n'a pas été possible d'atteindre la puissance maximale du panneau.

Le phénomène d'ombrage partiel a entraîné une diminution de la puissance d'entrée et de sortie du régulateur, ainsi qu'une légère diminution de la tension de sortie. Cependant, la tension d'entrée est restée pratiquement constante.

La méthode MPPT utilisée a influencé la puissance d'entrée et de sortie du régulateur. La méthode *P&O* a permis d'extraire moins de puissance que la méthode *INC-COND*, qui a garanti une extraction maximale de puissance pour la charge. Ainsi, plus la méthode utilisée est évoluée, plus elle garantit une précision et une extraction de puissance maximale, tout en minimisant les pertes de puissance, en particulier dans le cas d'ombrage partiel.

En examinant les courbes présentées pour les différents cas de simulation, il a été observé que l'hacheur survolteur (BOOST) fournissait une tension de sortie V_s supérieure à la tension d'entrée V_e , ce qui vérifie l'équation (II.5) du chapitre II.

Enfin, les résultats ont montré que le rendement des deux méthodes MPPT *P&O* et *INC-COND* est diminué dans le cas d'ombrage partiel par rapport aux conditions STC. Ainsi, la méthode *INC-COND* s'est révélée plus efficace que la méthode *P&O* dans des conditions anormales (en dehors des conditions STC), comme cela a été confirmé par les résultats présentés dans les tableaux (Tableau III.4 et Tableau III.8).

III.3 Simulation de la dégradation d'un panneau photovoltaïque avec le modèle mathématique

Dans la présente partie de la simulation, le même panneau photovoltaïque de type RG-P250W a été utilisé en vue de déterminer la dégradation (augmentation de la résistance en série et baisse de l'irradiation) après 10 ans et 20 ans, respectivement.

Les conditions environnementales sont les conditions de test standard :

Irradiation $G = 1000 \text{ W.m}^{-2}$ et température du module $T_m = 25^\circ\text{C}$.

D'après les lois de vieillissement mentionnée dans le chapitre II on trouve qu'après le calcul :

- Après 10 ans d'exploitation du générateur PV, l'irradiation effective est réduite de 6% et la résistance en série est augmentée de 2,3%, autrement dit $G(T = 10 \text{ ans}) = 940 \text{ W.m}^{-2}$ et $R_s(T = 10 \text{ ans}) = 0,350 \Omega$.
- Après 20 ans, l'irradiance effective est réduite de 12% et la résistance série est augmentée de 4,6% plus précisément $G(T = 20 \text{ ans}) = 880 \text{ W.m}^{-2}$ et $R_s(T = 20 \text{ ans}) = 0,358 \Omega$.

III.3.1 Les schémas blocs de la simulation

Les figures suivantes (Figure III.7, Figure III.8, Figure III.9, Figure III.10, Figure III.11) illustrent les détails du modèle mathématique du panneau PV qui ont été utilisés pour simuler le fonctionnement du GPV sous conditions STC et en cas de vieillissement en appliquant les équations de dégradation.

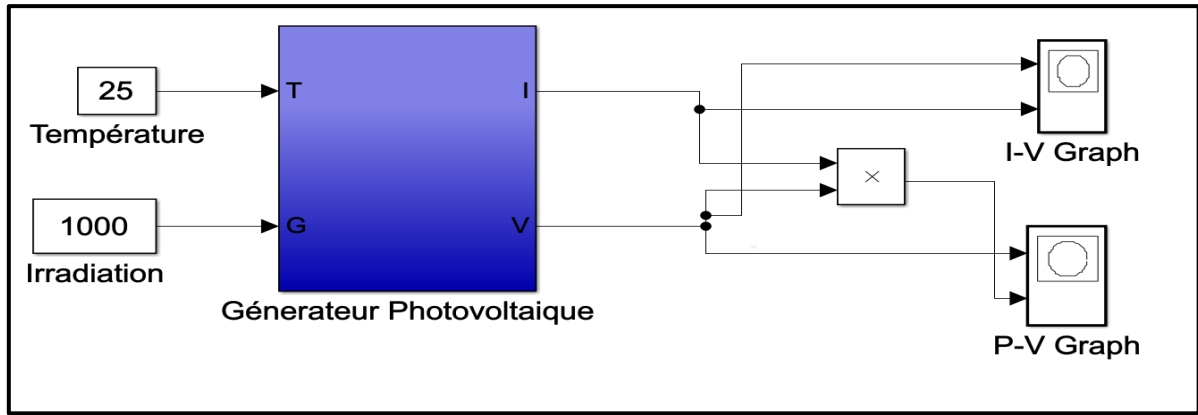


Figure III.7: Générateur Photovoltaïque

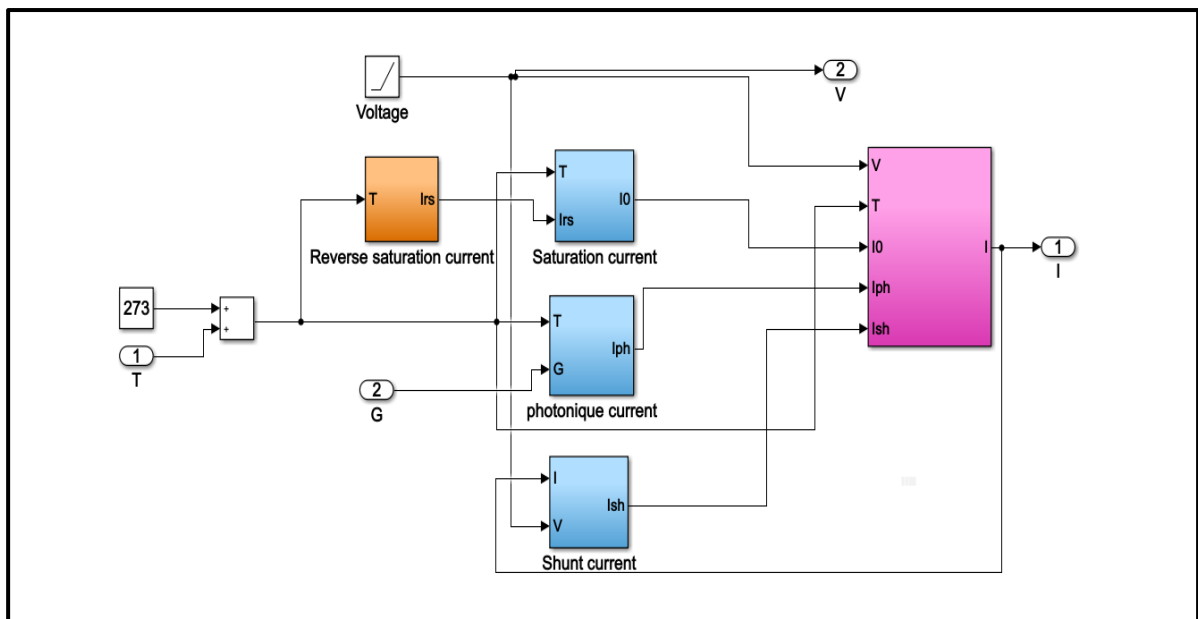


Figure III.8: Sous système du Générateur Photovoltaïque

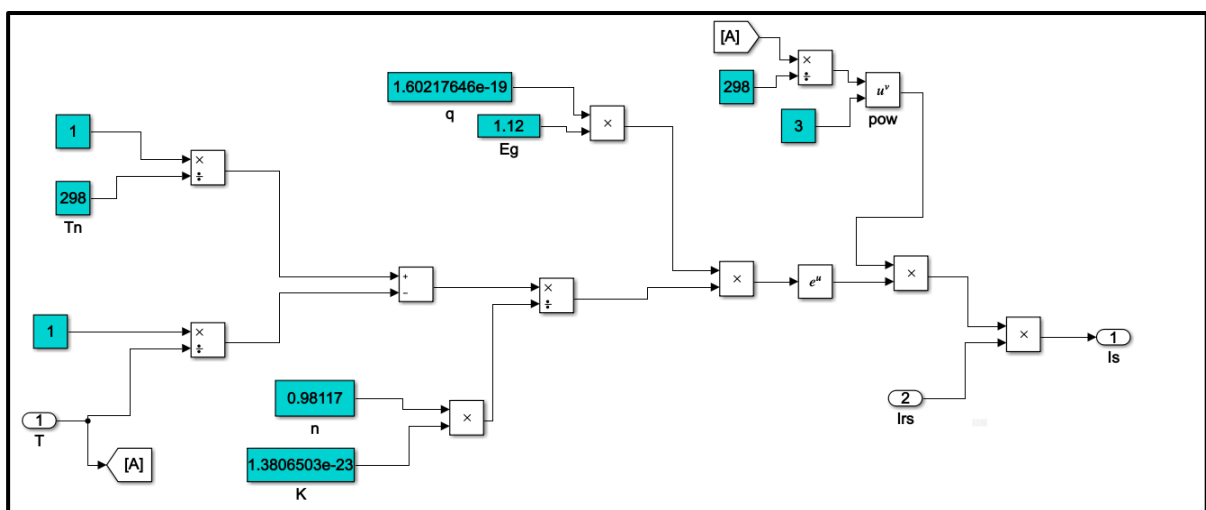


Figure III.9: Sous système du courant de saturation

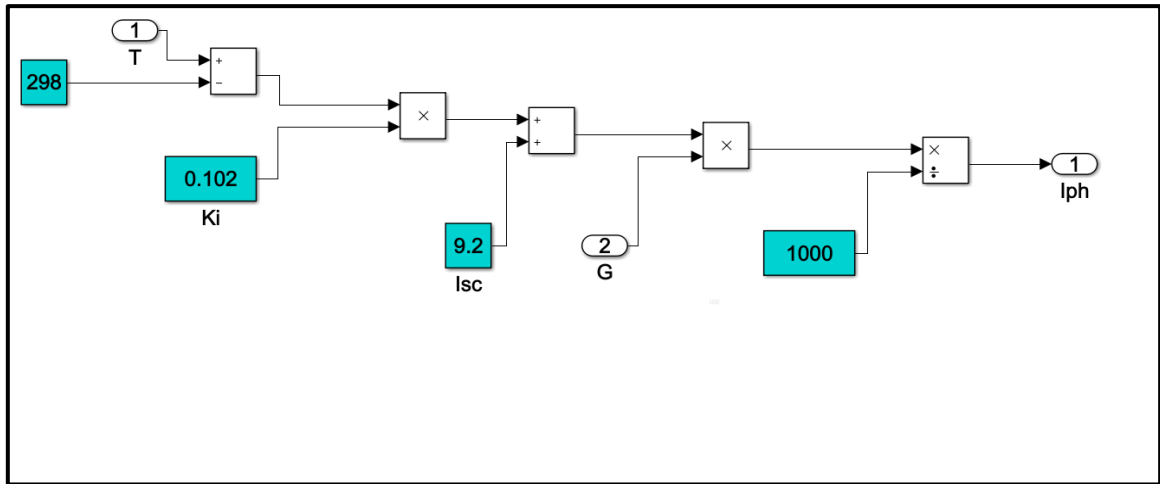


Figure III.10: Sous système du courant photonique

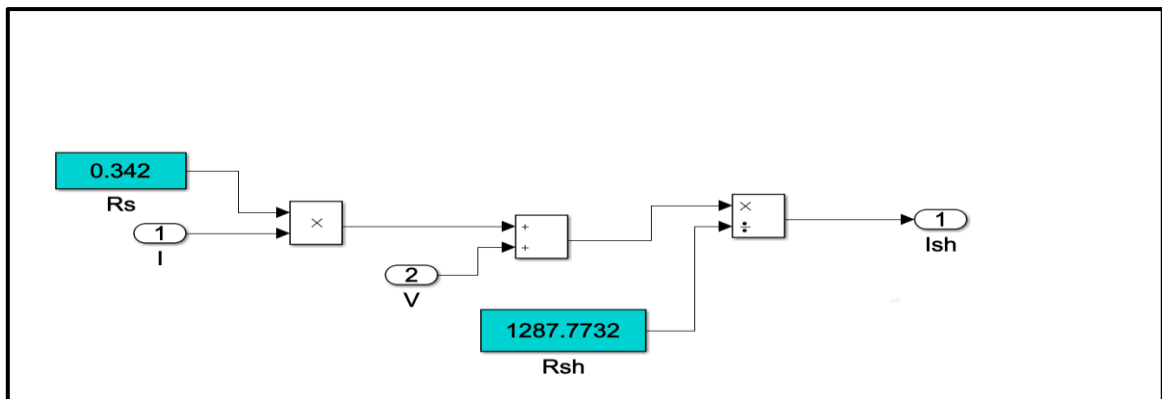


Figure III.11: Sous système du courant shunt

III.3.2 Les résultats de la simulation

Le tableau III.9 reprend la décroissance de la puissance en fonction de la tension sur deux durées de vie du générateur PV : 10 ans et 20 ans.

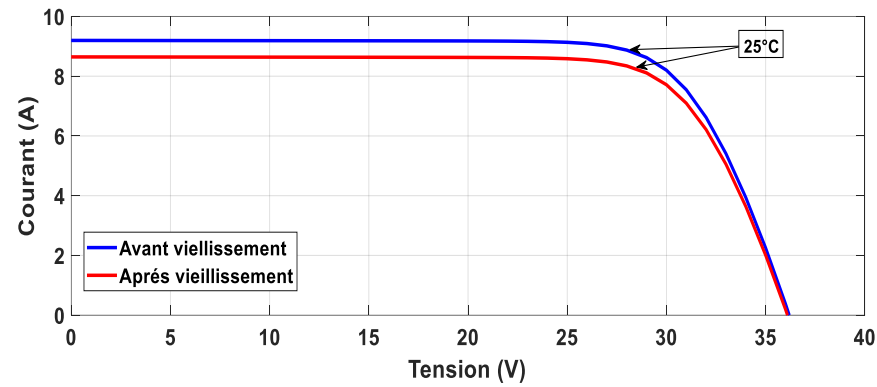
Ces valeurs sont issues de résultats de simulation, révélant une baisse plus importante de la puissance avec des tensions supérieures à la tension de circuit ouvert (V_{co}). Cette baisse de puissance apparaît plus prononcée quand la durée de vie est de 20 ans plutôt que de 10 ans.

De tels résultats permettent d'estimer les performances du générateur photovoltaïque sur une durée de vie prolongée et de planifier la maintenance du système.

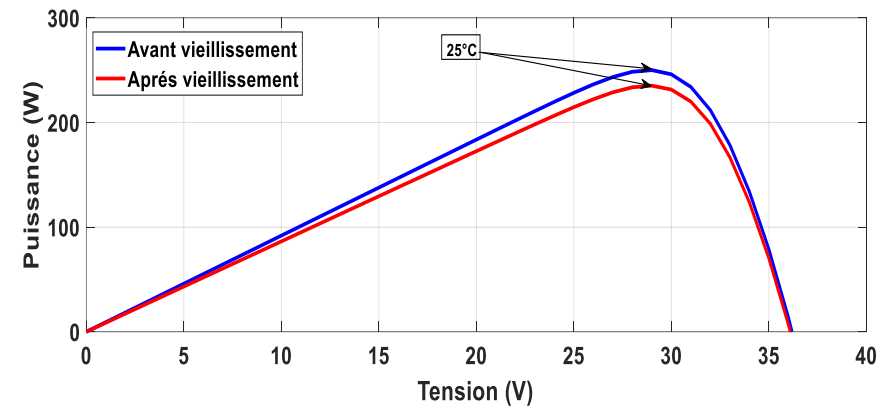
Tableau III.9: Les caractéristiques en T=10 ans, T=20 ans

T= 10 ans

I(V)

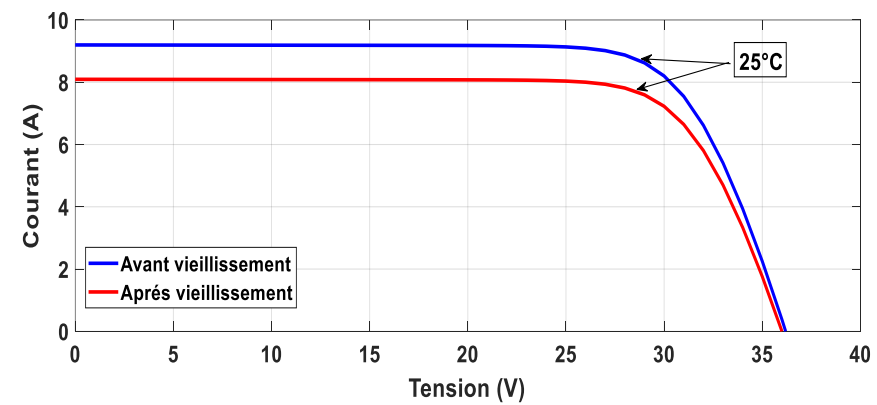


P(V)

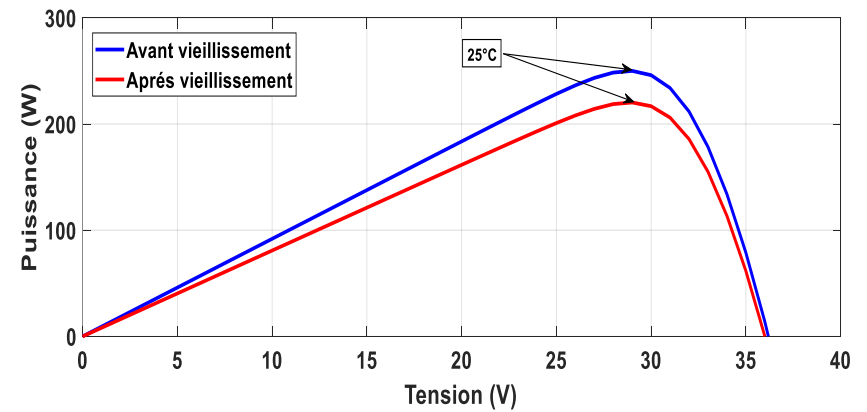


T= 20 ans

I(V)



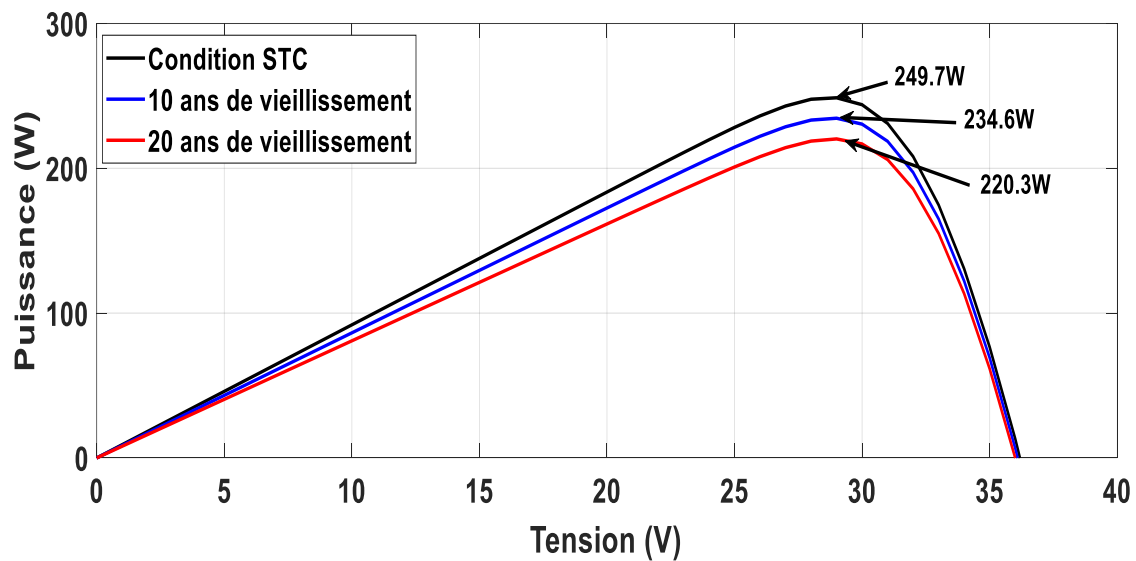
P(V)



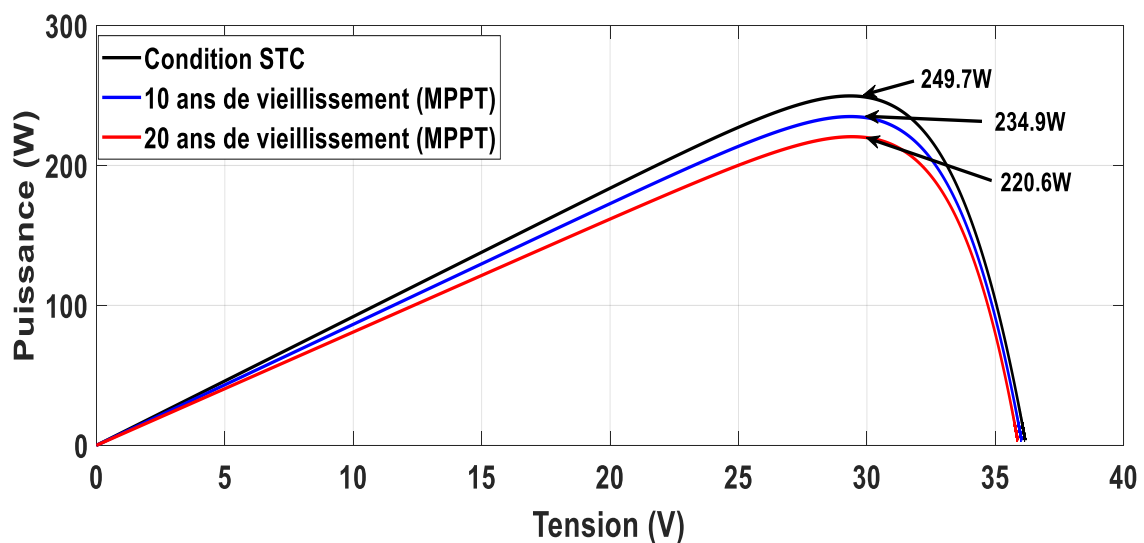
III.3.3 Evaluation de l'impact de l'utilisation de MPPT sur le vieillissement du système PV

Tableau III.10: Le vieillissement du GPV sans et avec MPPT

Sans MPPT				
$P_{STC}(W)$	$P_{10ans}(W)$	η_{10ans}	$P_{20ans}(W)$	η_{20ans}
249.7	234.6	0.939	220.3	0.882



Avec MPPT						
$P_{STC}(W)$	$P_{10ans MPPT}(W)$	$\eta_{10ans MPPT}$	$\Delta P_{10ans} (W)$	$P_{20ans MPPT}(W)$	$\eta_{20ans MPPT}$	$\Delta P_{20ans} (W)$
249.7	234.9	0.940	0.3	220.6	0.883	0.3



III.3.4 Interprétation des résultats

- La progression du taux de dégradation réduit le courant de court-circuit (I_{sc}), entraînant une baisse de sa valeur initiale après le vieillissement. Cependant, la tension en circuit ouvert (V_{oc}) connaît une baisse mineure.
- La dégradation des panneaux photovoltaïques entraîne une augmentation de la résistance en série, ce qui limite le courant de sortie vers la charge et, par conséquent, la puissance de sortie.
- Le point de puissance maximale présente une baisse de 6 % sur une décennie. La comparaison de nos résultats avec la littérature existante montre que le taux, comme mentionné précédemment, est cohérent avec les valeurs rapportées dans les études expérimentales.
- Le **Tableau III.10** indique que la mise en œuvre du MPPT (soit *P&O*, soit *INC-COND*) entraîne une augmentation modeste de 0.3W au point de puissance maximale. Par conséquent, pour les applications à forte puissance, l'utilisation de la technologie MPPT peut atténuer efficacement les pertes subies au cours du processus de vieillissement du GPV.

III.4 Conclusion

Le présent chapitre se concentre principalement sur la simulation d'un système PV à partir d'un modèle PV normalisé construit avec MATLAB/SIMSCAPE, d'un convertisseur Boost réalisé avec MATLAB/SIMULINK et d'une charge.

Le processus de vieillissement du panneau photovoltaïque a été simulé à l'aide d'un modèle mathématique du panneau, incorporant les paramètres responsables de la dégradation du GPV.

Le recours au MPPT dans un système vieillissant a eu un impact notable par rapport à l'absence de MPPT.

Chapitre IV : Surveillance et diagnostic d'une installation photovoltaïque par le logiciel WatchPower

IV.1 Introduction

Cette partie porte sur l'étude de cas d'une installation endommagée, qui est actuellement exploitée et surveillée par un logiciel de suivi en temps réel *WatchPower*.

Cette application permettra de surveiller efficacement le fonctionnement de l'installation photovoltaïque.

Les paramètres recueillis et les résultats d'une inspection visuelle de l'installation ont été utilisés pour tirer des conclusions et faire des observations.

IV.2 Le logiciel WatchPower

WatchPower est un logiciel de surveillance connecté à l'onduleur qui peut surveiller plusieurs appareils simultanément via le port série.

Les principales fonctions du logiciel de surveillance *WatchPower* comprennent l'enregistrement des données pour les appareils, les messages d'alarme, les messages d'erreur et le réglage des paramètres pour les appareils [65] .

IV.3 Caractéristiques du logiciel

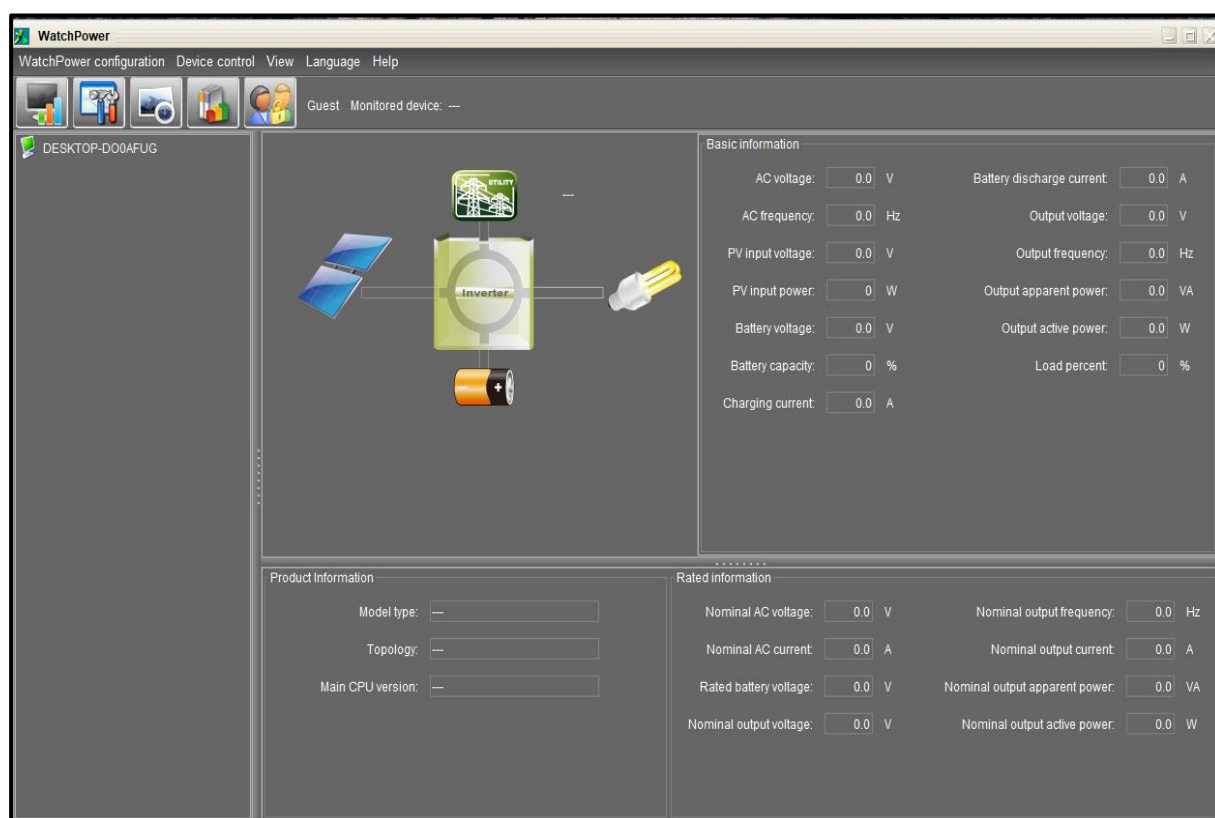


Figure IV.1: L'interface principal du logiciel *Watch Power*

Ses caractéristiques sont :

- Les données des périphériques sont automatiquement acquises en temps réel et sauvegardées de manière sécurisée dans un journal.
- Les données de chaque appareil sont affichées graphiquement pour permettre une lecture rapide et facile.
- Le logiciel envoie des notifications d'alerte et d'alarme par messagerie mobile, message vocal et e-mail en cas de défaut.
- Les statistiques des événements peuvent être facilement diagnostiquées.
- Il est possible de suivre à distance le système photovoltaïque via l'application Watch Power sur un téléphone Android, en utilisant la connectivité Bluetooth ou Wifi.
- La possibilité de la surveillance de plusieurs onduleurs simultanément en configurant les paramètres adéquats.

Parameters setting

Buzzer alarm: ☒ Enable ☐ Disable

Beeps while primary source interrupt: ☒ Enable ☐ Disable

Backlight: ☒ Enable ☐ Disable

Overload bypass: ☐ Enable ☒ Disable

Overload auto restart: ☐ Enable ☒ Disable

LCD screen returns to default display screen after 1 min.: ☒ Enable ☐ Disable

Over temperature auto restart: ☐ Enable ☒ Disable

Charger source priority: Solar first

Output frequency: 50 Hz

Output source priority: Utility

Back to grid voltage: 48.0 V

AC input range: Appliance

Max. charging current: 60 A

Battery type: AGM

Max. AC charging current: 30 A

Output Mode: Single

Back to discharge voltage: 57.0 V

Bulk charging voltage(C.V. voltage): 56.4 V

Max. charging time(C.V. stage): 0 Min

Float charging voltage: 54 V

Battery cut-off voltage: 42 V

Battery equalization setting

Battery equalization: ☐ Enable ☒ Disable

Real-time activate battery equalization: ☐ Activate ☒ Cancel

Equalization time: 30 Min

Equalization voltage: 58.4 V

Equalization period: 30 Day(s)

Equalization timeout: 120 Min

Figure IV.2: Configuration des paramètres d'onduleur

IV.4 Flux de puissance et sa signification

Mode de mise sous tension et de veille : l'onduleur n'allume pas la charge jusqu'à ce que l'interrupteur "ON" soit pressé. L'utilité qualifiée ou la source PV peut charger la batterie en mode veille (Figure IV.3, Figure IV.4) [65].

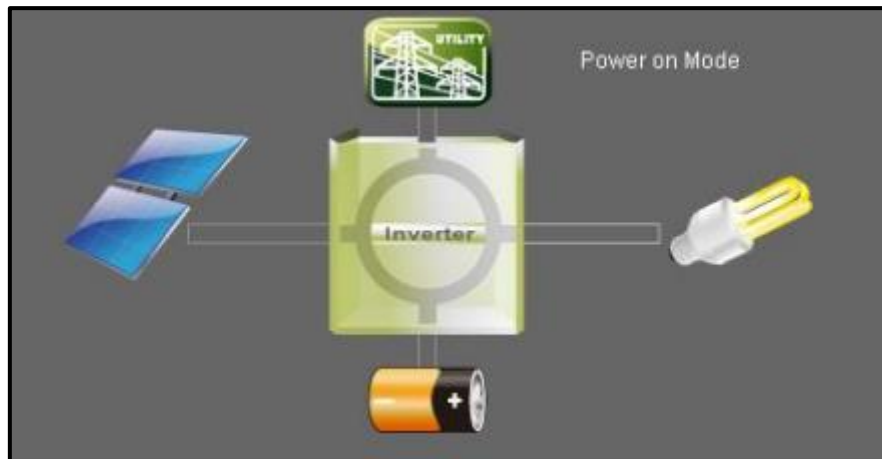


Figure IV.3: Mode mise sous tension

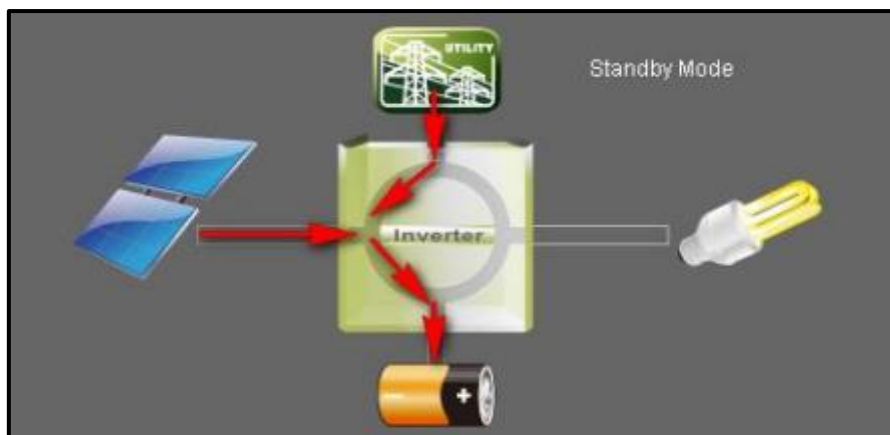


Figure IV.4: Mode veille

Mode ligne : la charge du réseau est alimentée par l'onduleur, le réseau qualifié ou la source PV peut charger la batterie (Figure IV.5) [65].

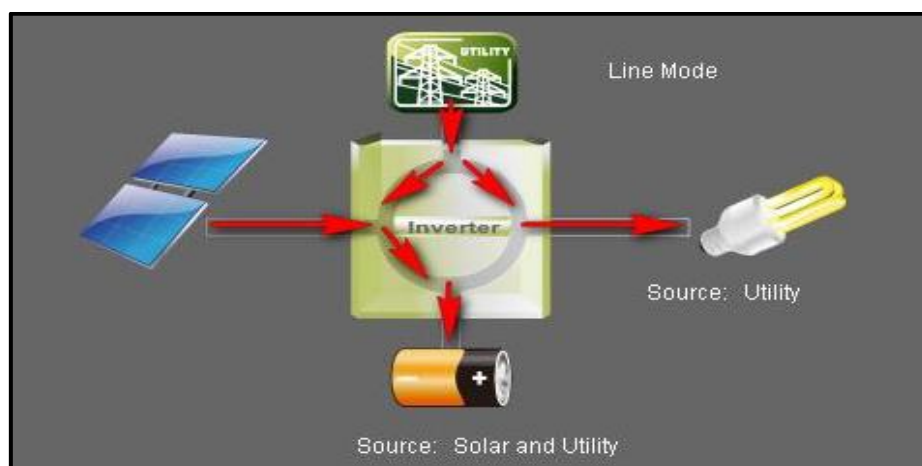


Figure IV.5: Mode ligne

Mode batterie : La charge de la batterie ou du panneau PV sera alimenté par l'onduleur. Cependant seule une source PV est capable de charger la batterie (Figure IV.6) [65].

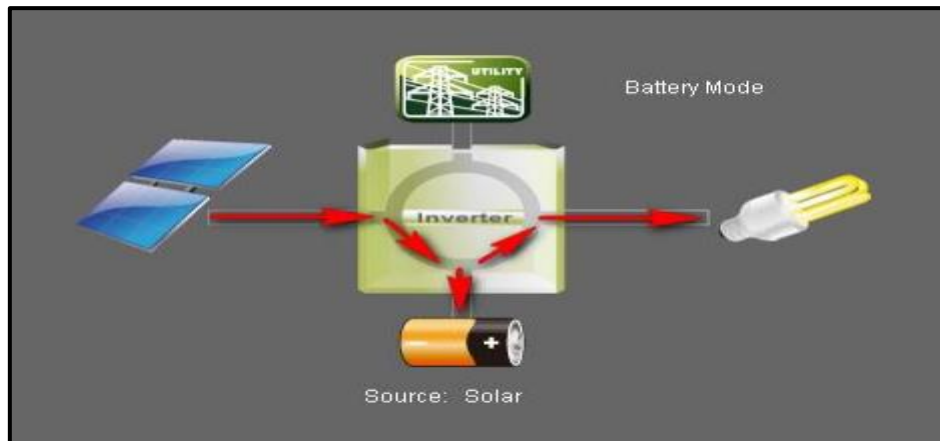


Figure IV.6: Mode batterie

Mode défaut : l'onduleur à certains défauts qui l'empêchent de générer toute la sortie de la puissance. la batterie peut être toujours être chargée par le réseau qualifié ou la source PV (Figure IV.7) [65].

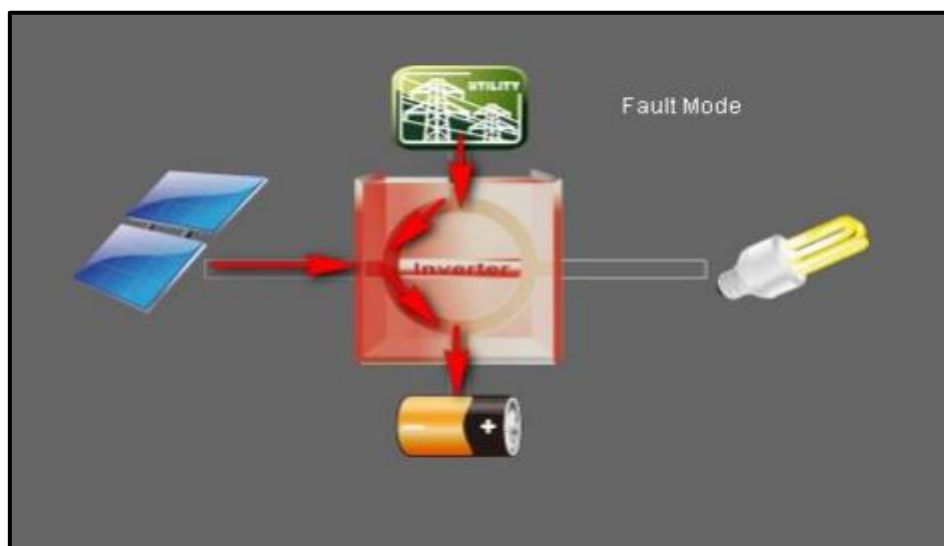


Figure IV.7: Mode défaut

IV.5 Connexion du WatchPower avec application wifi

Pour surveiller les installation PV à distance à travers des application Android ou IOS en utilisant le WI-FI (Figure IV.8).



Figure IV.8: WatchPower en utilisant le WI-FI [66]

IV.6 Surveillance et diagnostics d'une installation PV par le logiciel WatchPower

Nous avons effectué un suivi de la performance d'une installation photovoltaïque de huit panneaux pendant une journée ensoleillée du 20 mars 2023. Le suivi a été effectué pendant la plage horaire la plus ensoleillée de la journée, entre 11h30 et 13h45, afin de maximiser la production d'énergie solaire.

Au cours de cette période, nous avons collecté des données précises sur les différents paramètres de l'installation, tels que la tension, l'intensité, la puissance et la température, qui ont été enregistrées à intervalles réguliers.

Ces données ont ensuite été analysées et interprétées pour évaluer la performance globale de l'installation et pour déterminer les éventuels problèmes ou défauts pouvant affecter son efficacité.



Figure IV.9: Générateur PV de 8 panneaux de 48V (connexion mixte)



Figure IV.10: La connexion de les 8 panneaux



Figure IV.11: La plaque signalétique de panneau

Le **Tableau IV.1** montre les caractéristiques électriques du panneau (RG-P250W).

Tableau IV.1: Caractéristiques électriques du panneau (RG-P250W)

Caractéristiques électriques	RG-P250W
Puissance maximale produise par panneau (P _m)	250W
Tension de circuit ouvert (sans charge) (V _{oc})	36.2V
Courant de court-circuit (sans charge) (I _{sc})	9.2A
Tension maximale produise par panneau (V _{mpp})	30V
Intensité maximale produise par panneau (I _{mpp})	8.47
Tension maximale du système (V _{max})	1000VDC



Figure IV.12: Le régulateur MPPT



Figure IV.13: Les batteries de l'installation (4 batteries en série de 12V)

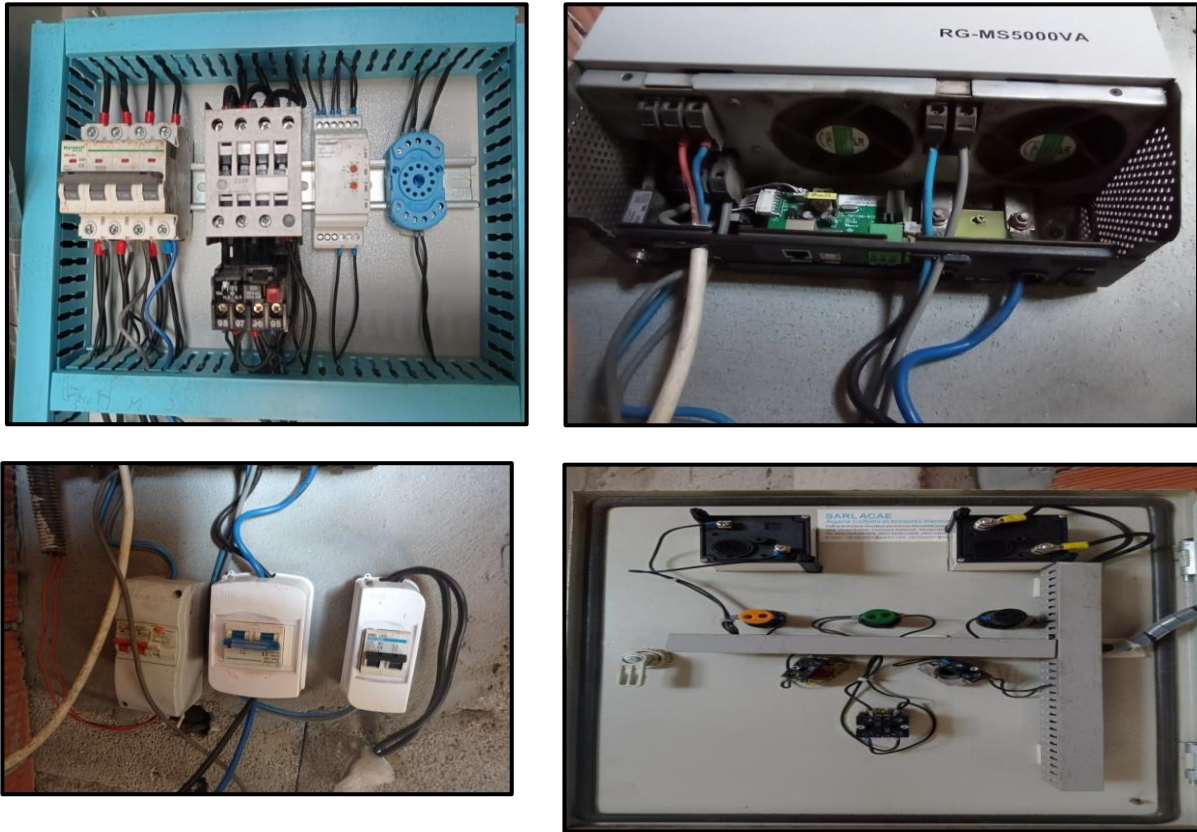


Figure IV.14: Les auxiliaires de l'installation (armoire électrique et disjoncteur différentiel...)

IV.6.1 Les modes de dégradation détectée dans l'installation

Les deux **Figures IV.15** et **IV.16** montrent les modes de dégradation détectés dans l'installation par la méthode de l'inspection visuelle.

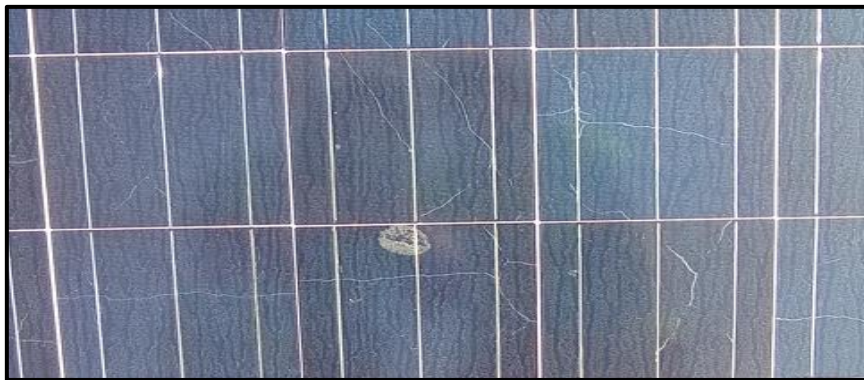


Figure IV.15: Délamination entre le verre et la cellule



Figure IV.16: Fissures cellulaires

IV.6.2 La connexion avec WatchPower

Les résultats obtenus de la période de surveillance de l'installation sont si dessus :

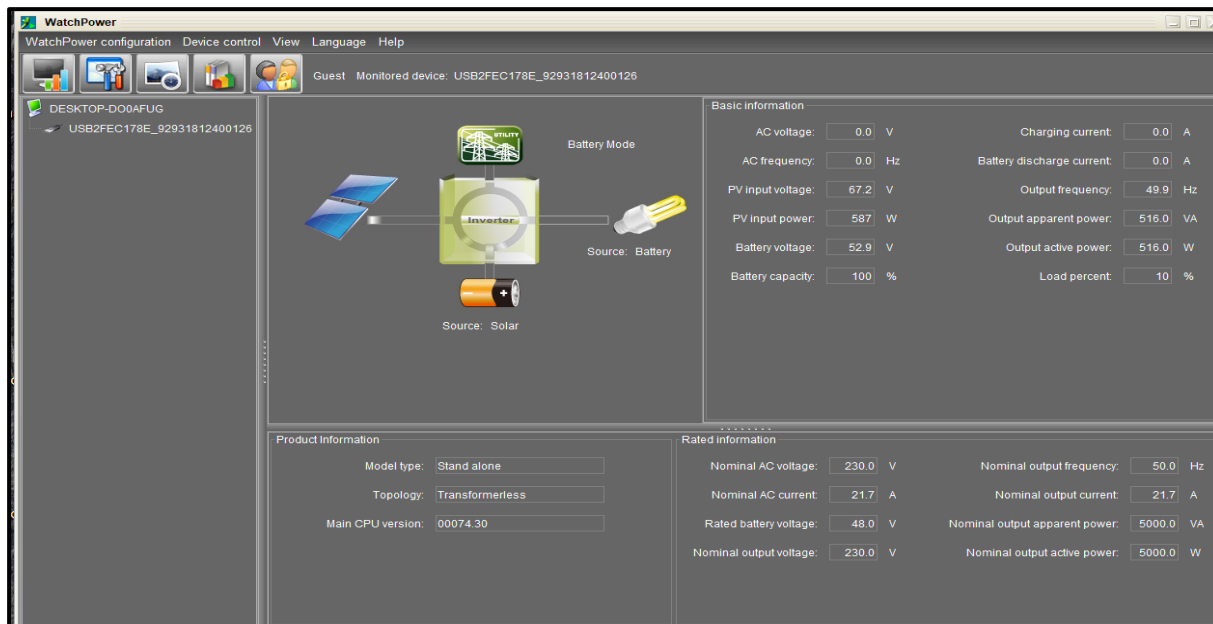


Figure IV.17: Interface de WatchPower avec la connexion de l'installation

Les informations basiques et nominales de l'installation PV étudiée ont donné par le logiciel Watch Power si dessus :

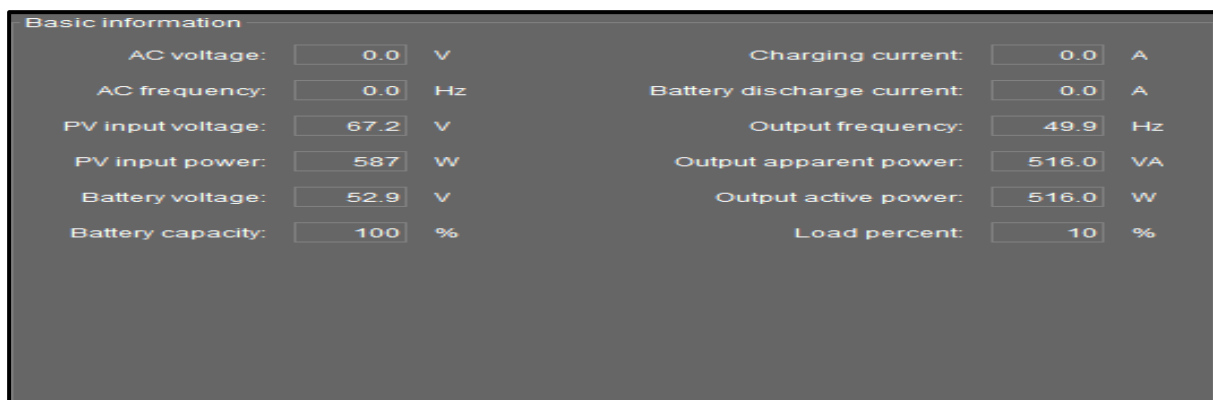


Figure IV.18: Les informations basiques

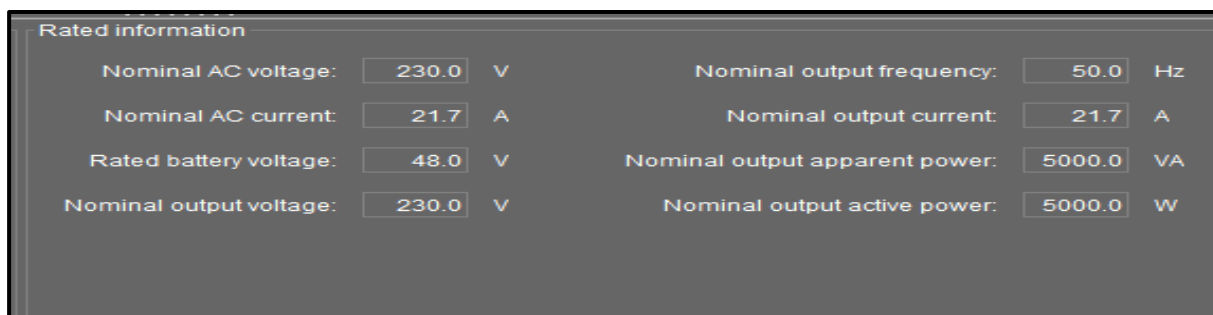


Figure IV.19: Les informations nominales

IV.7 Les résultats de simulation données par logiciel

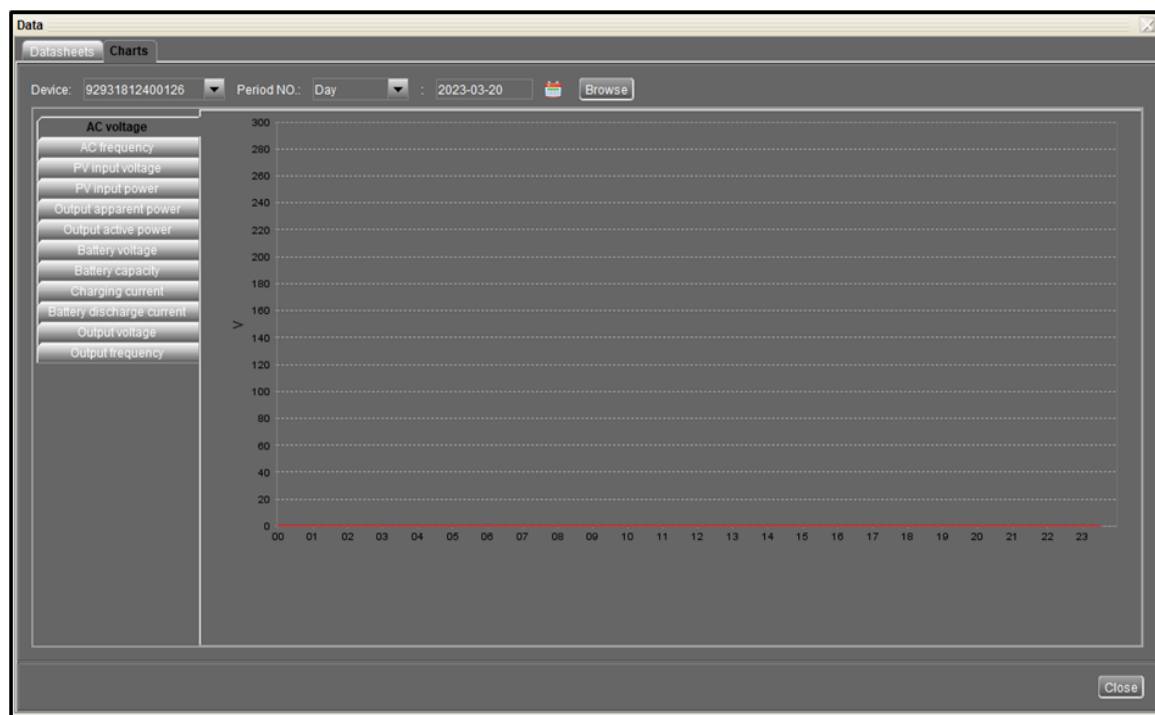


Figure IV.20: Tension en AC

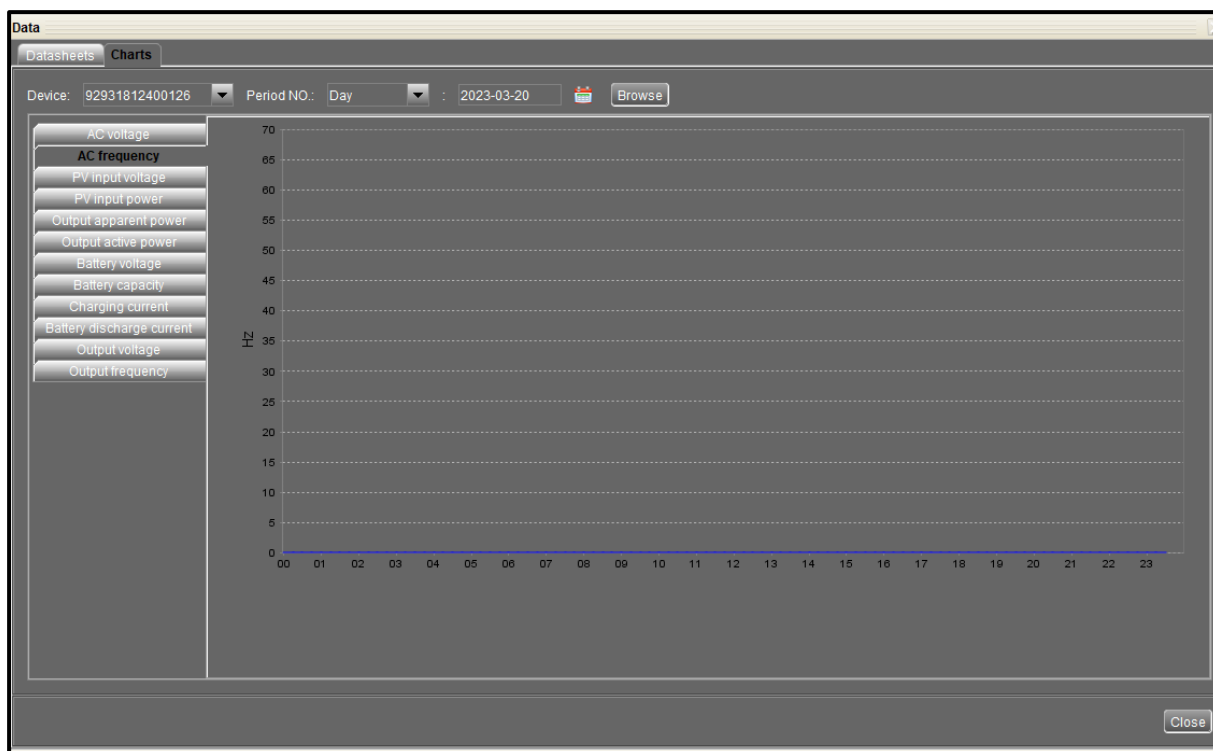


Figure IV.21: Fréquence en AC

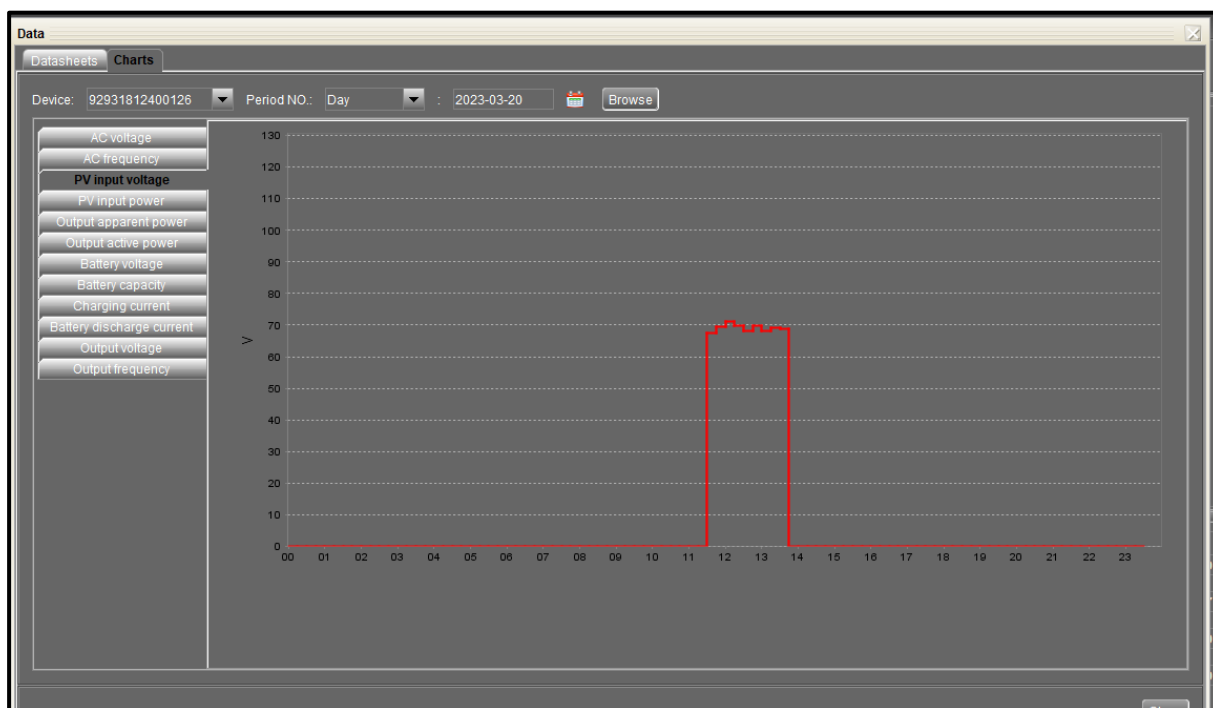


Figure IV.22: Tension d'entrée de l'installation PV

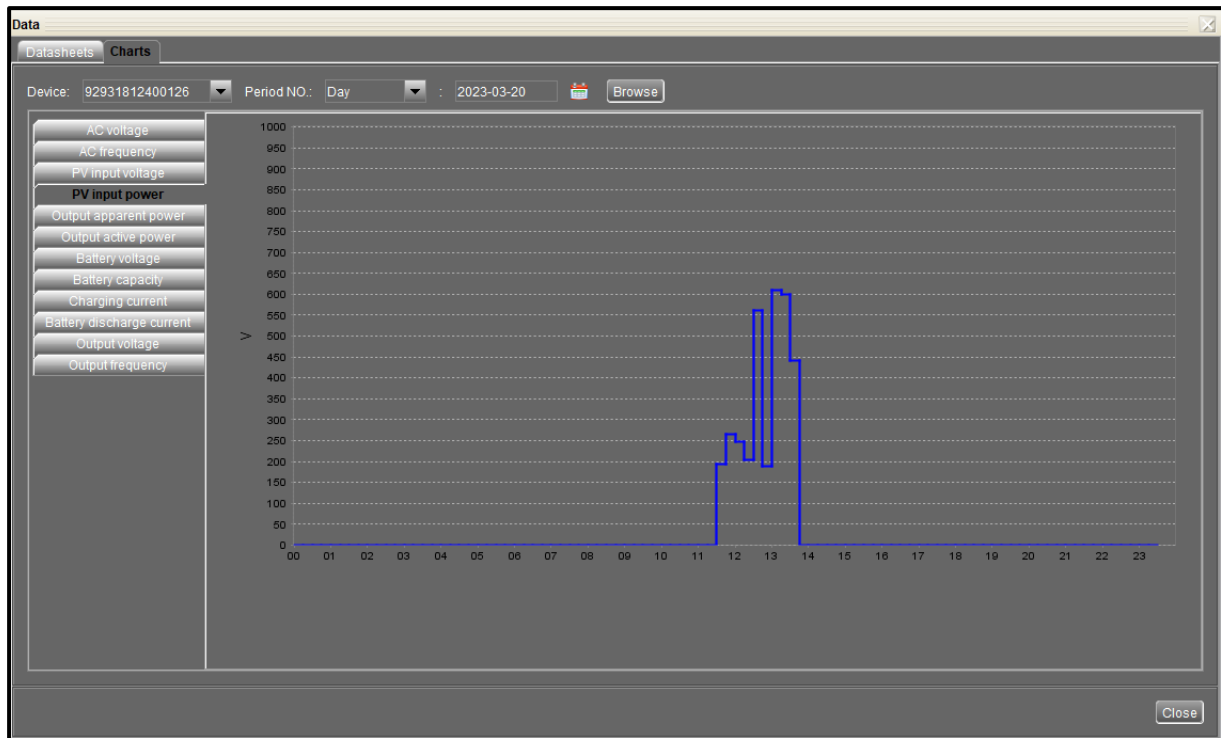


Figure IV.23: La puissance d'entrée de l'installation PV

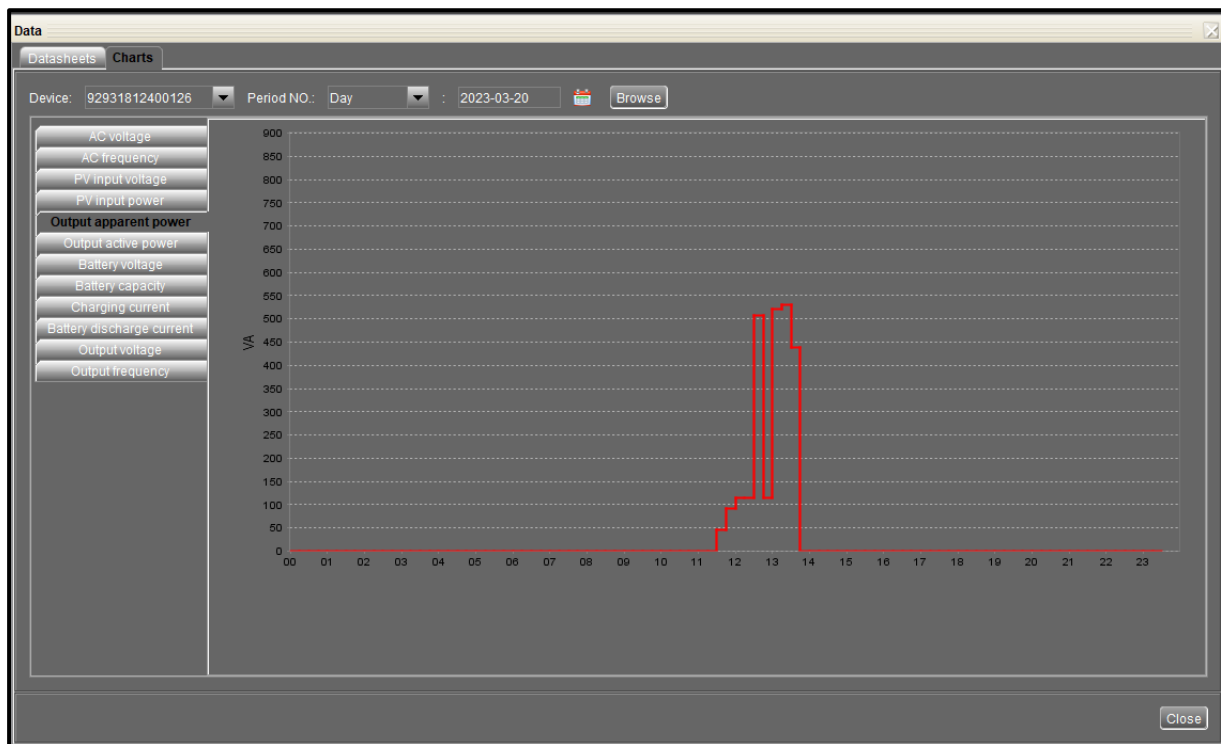


Figure IV.24: La puissance apparente de la sortie

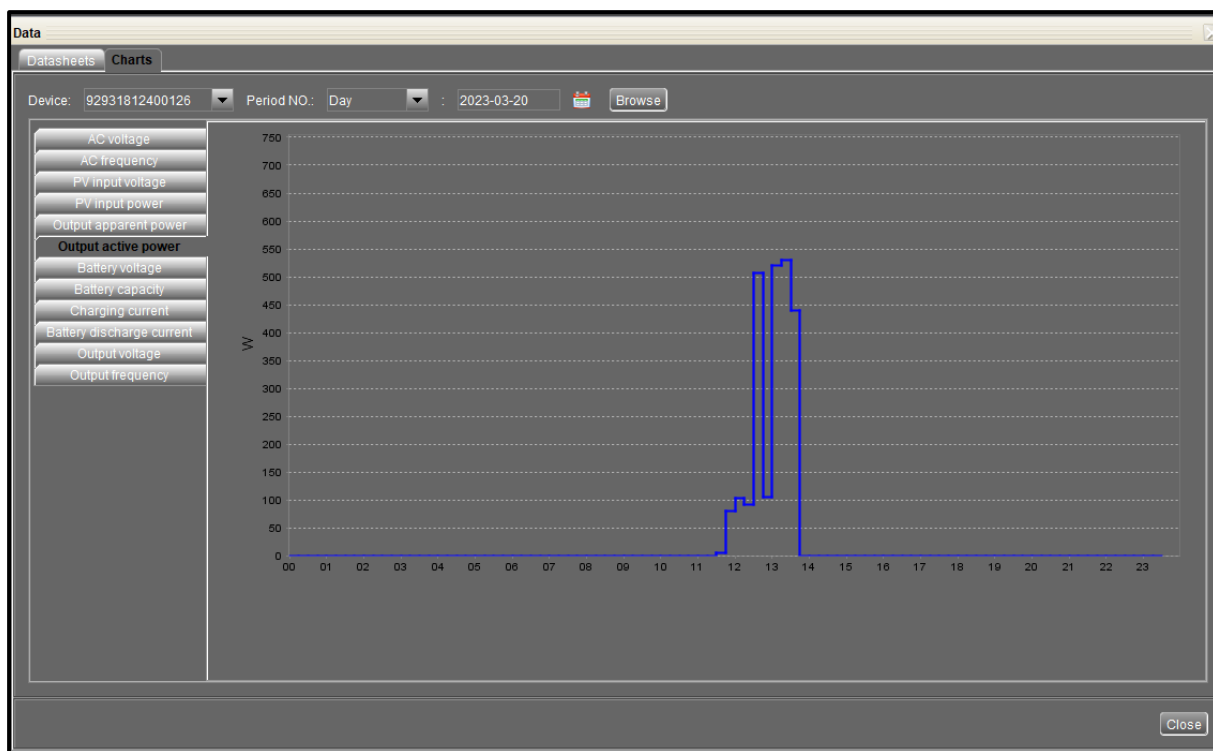


Figure IV.25: La puissance active de la sortie

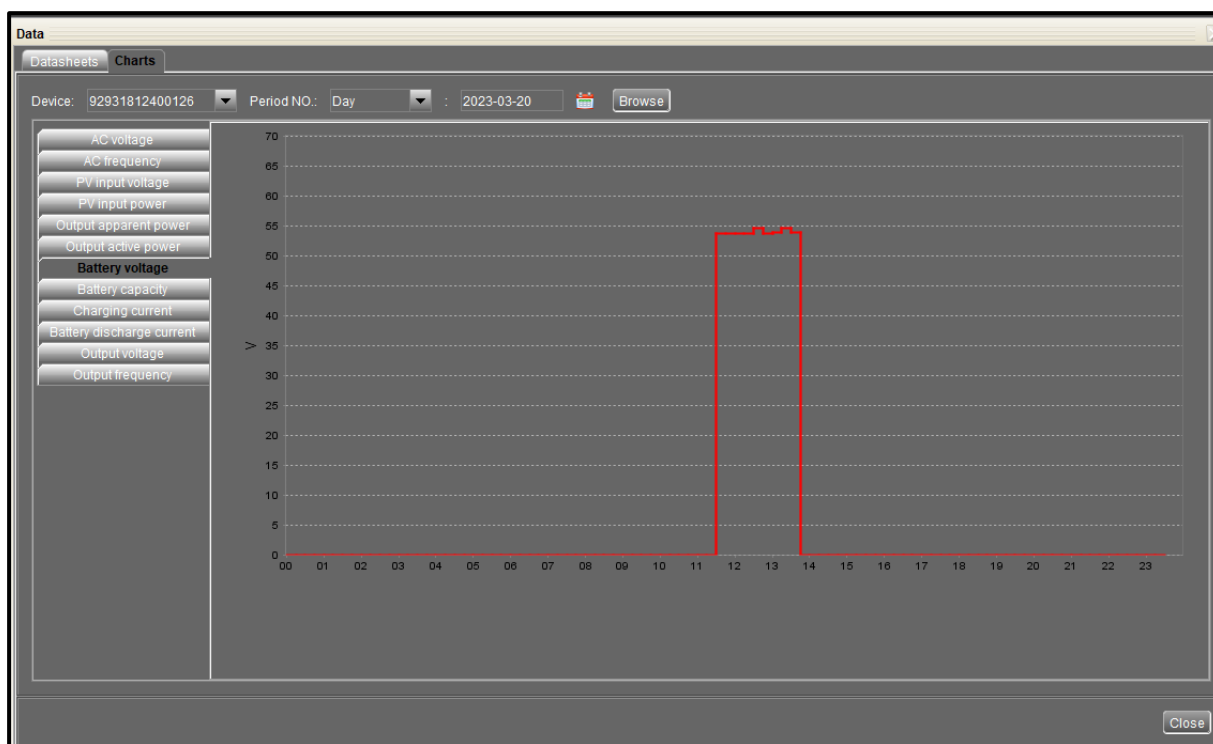


Figure IV.26: La tension des batteries

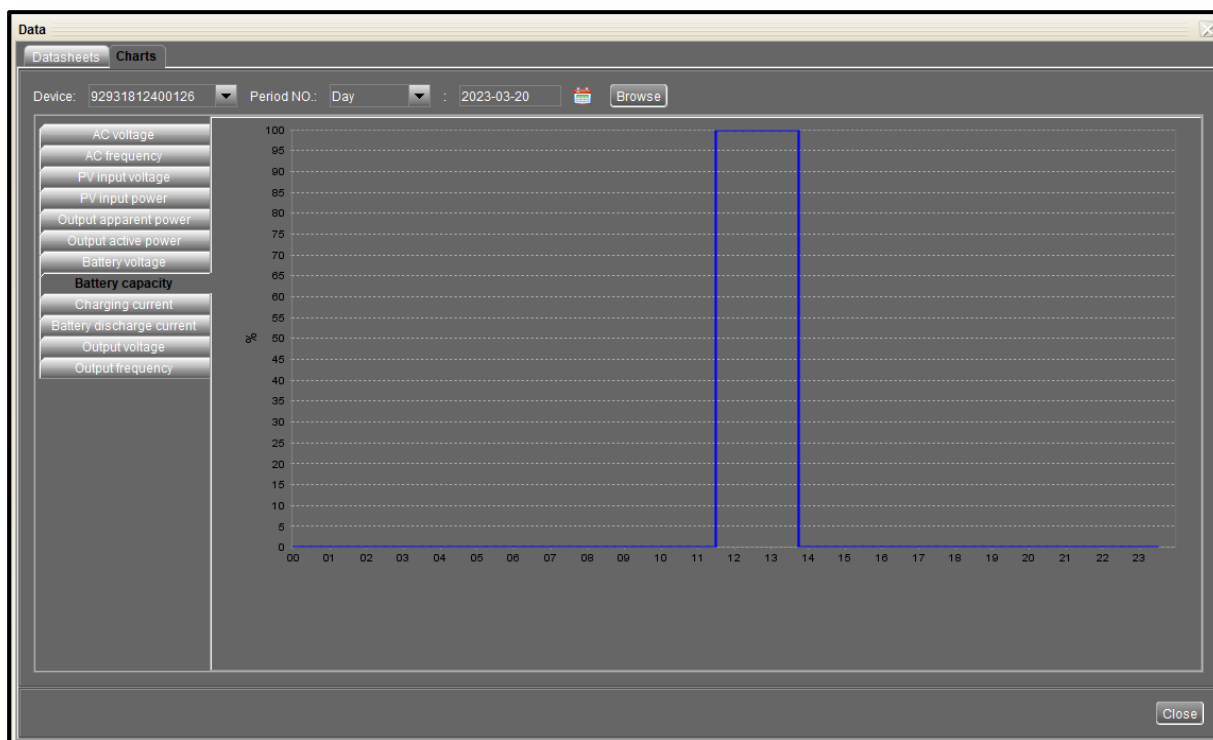


Figure IV.27: La capacité des batteries

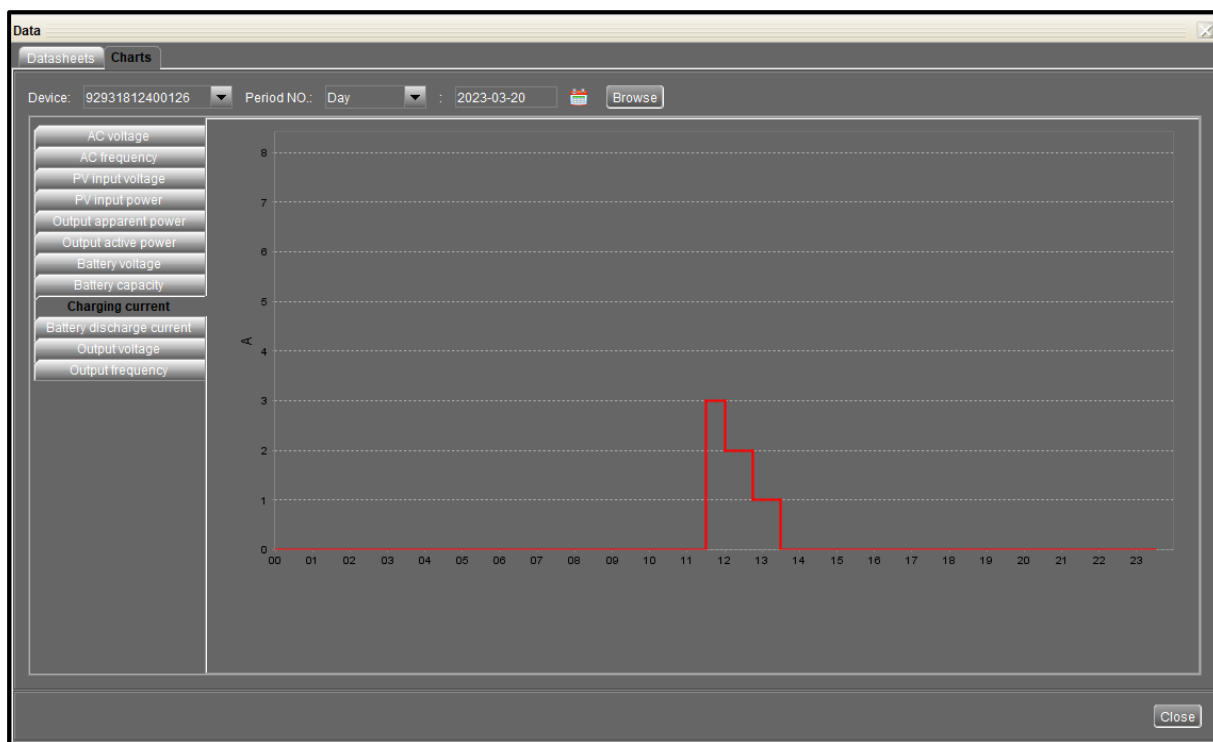


Figure IV.28: Courant de charge

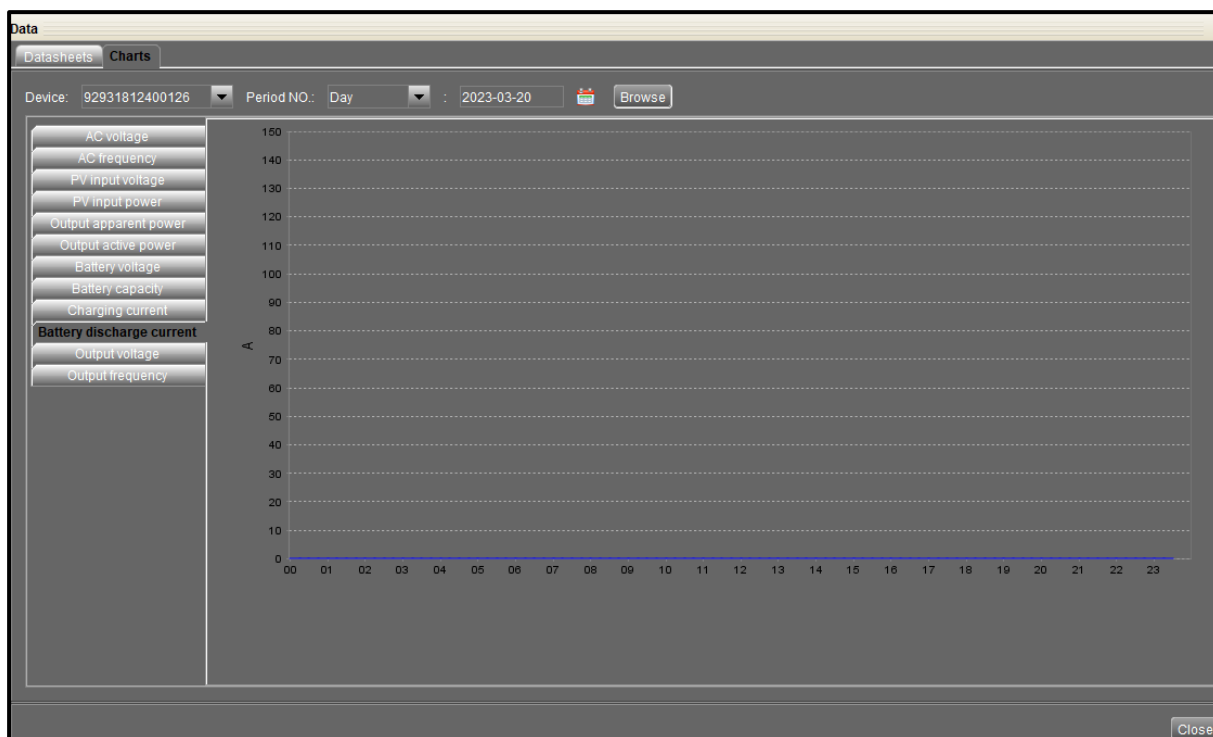


Figure IV.29: Le courant de décharge des batteries

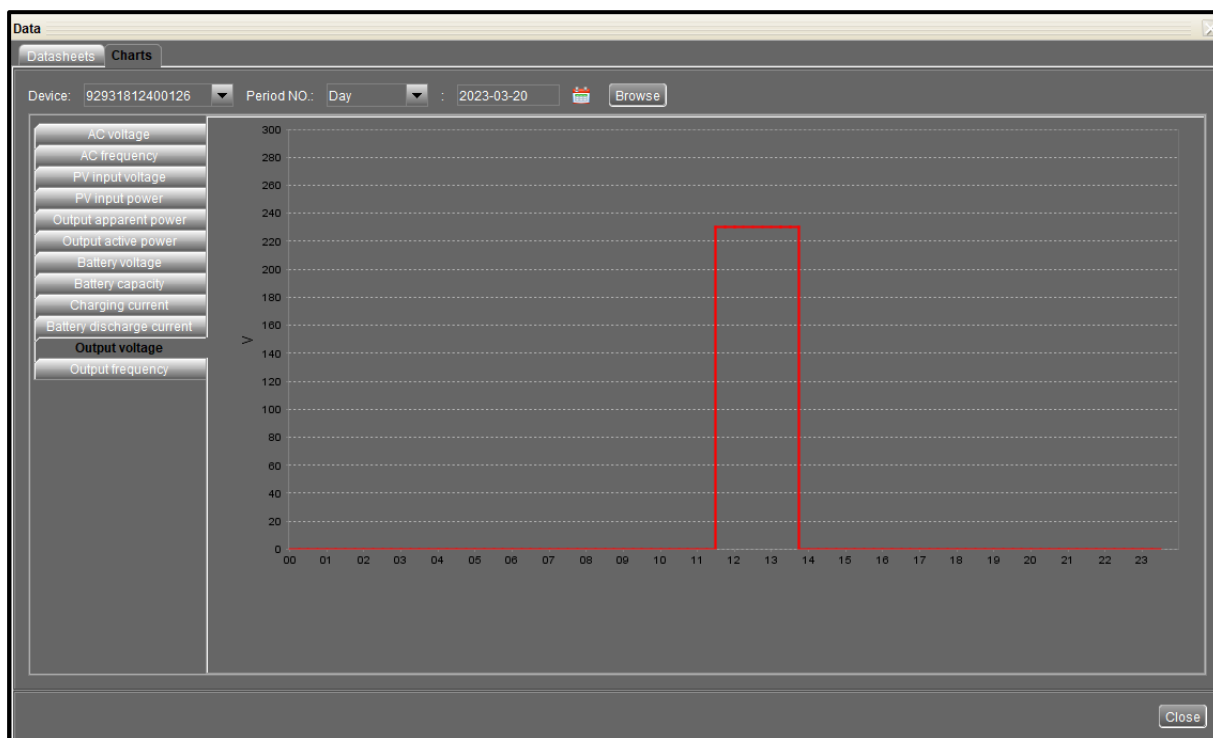


Figure IV.30: La tension de sortie

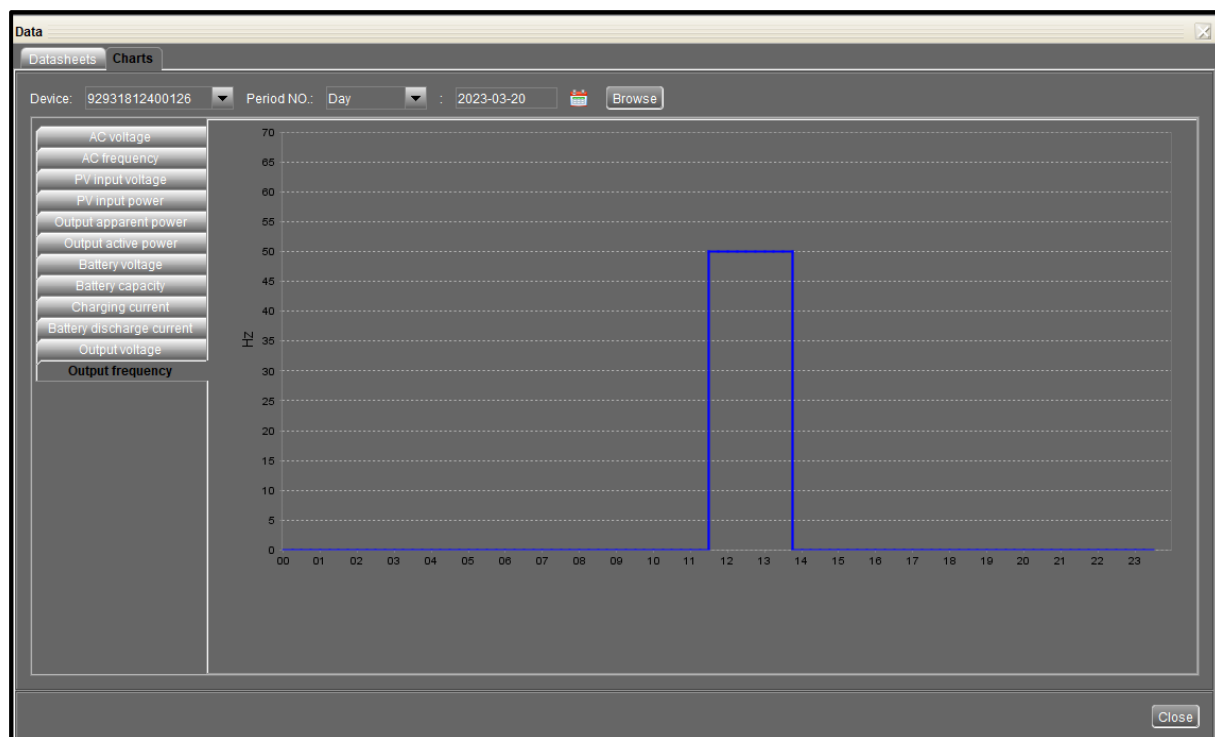


Figure IV.31: La fréquence de la sortie

IV.8 Interprétation des résultats

- Au cours de la période d'étude, la tension et la fréquence en courant alternatif sont demeurées à zéro car aucune utilisation d'énergie électrique n'a été enregistrée, étant donné que l'observation a été effectuée tôt le matin (voir **Figures IV.20 et IV.21**). En revanche, la tension de sortie générée par les cellules photovoltaïques du panneau solaire a varié en fonction de l'intensité de l'ensoleillement, atteignant son maximum de 71V aux alentours de midi, l'heure où le taux d'irradiance est le plus élevé dans la journée (voir **Figure IV.22**).
- La puissance active d'entrée, mesurée à 587W, et la puissance active de sortie, mesurée à 516 W (voir **Figure IV.18**), montrent que le Maximum Power Point Tracker (MPPT) fournit un rendement élevé de conversion entre le générateur PV et la charge. Cependant, une différence de puissance d'environ 1413W a été constatée entre la puissance nominale des panneaux (2000W) et la puissance d'entrée mesurée, pouvant être imputée aux modes de dégradation observés dans l'installation, tels que la délamination et les fissures cellulaires (voir **Figures IV.15 et IV.16**).
- La tension de batterie a oscillé entre 54V et 55V, restant dans l'intervalle de tension admissible pour les batteries, à l'exception de deux pics de tension (voir **Figure IV.26**). La capacité des batteries est demeurée à 100 %, car il n'y a pas eu d'utilisation de l'électricité pendant la période d'observation. Toutefois, pour prolonger la durée de vie des batteries et éviter les dommages, il est conseillé de ne pas les charger à plus de 95 %. En effet, une

surcharge excessive peut réduire la durée de vie des batteries et compromettre la capacité de stockage en cas de besoin, comme l'illustre la **Figure IV.7**.

- Le courant de charge des batteries a diminué progressivement de 3A à 2A, puis à 1A, reflétant la diminution de l'irradiance solaire au fil de la journée (voir **Figure IV.28**). Comme les batteries étaient chargées à leur maximum, aucun courant de décharge n'a été mesuré pendant cette période d'observation (voir **Figure IV.29**). Enfin, la tension et la fréquence de sortie sont demeurées stables à des valeurs admissibles de 230V et 50 Hz, respectivement (voir **Figures IV.30** et **IV.31**).
- Ces résultats sont importants car ils fournissent des informations précieuses sur la performance et l'efficacité de l'installation photovoltaïque étudiée. Ils permettent également de comprendre les processus de dégradation des panneaux solaires et des batteries, ainsi que les stratégies d'optimisation pour maximiser la production d'énergie renouvelable.

IV.9 Conclusion

Au terme de l'analyse, les capacités du logiciel *WatchPower* et ses différents modes de surveillance ont été élucidés. L'importance de cet outil pour faciliter le diagnostic rapide des systèmes photovoltaïques a été soulignée, permettant l'identification et la surveillance des dysfonctionnements potentiels.

En résumé, l'utilisation de *WatchPower* facilite l'atténuation des problèmes et l'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques, renforçant ainsi leur durabilité et leur viabilité financière.

Les résultats théoriques et numériques, ainsi que les remarques obtenues par simulation en utilisant les formules de dégradation, ont été validés par l'analyse des données obtenues à l'aide de ce logiciel. En effet, bien que la commande MPPT permette d'augmenter le rendement des systèmes photovoltaïques, il n'est pas réaliste d'attendre des performances équivalentes à celles d'un nouveau système dans le cas d'un système dégradé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce projet de fin d'études, nous avons constaté à quel point les systèmes photovoltaïques sont susceptibles de présenter des défauts et des anomalies dus à la détérioration et au vieillissement provoqués par les conditions météorologiques et les matériaux de construction.

Ceux-ci entraînent des baisses au niveau de la performance et des perturbations au niveau de l'alimentation en énergie. Ce phénomène est naturel et inévitable et, à l'heure actuelle, nous pouvons seulement l'analyser et le diagnostiquer pour évaluer les performances énergétiques et économiques de ces systèmes.

Après avoir reproduit la représentation physique et mathématique d'un système photovoltaïque, nous avons analysé sa dégradation.

Une étude de cas réelle a démontré les avantages d'employer des logiciels de monitoring tel que *WatchPower* afin d'établir un diagnostic rapide des systèmes photovoltaïques, en permettant l'identification et la surveillance des dysfonctionnements potentiels grâce à l'analyse des données.

Le logiciel *WatchPower* a validé les résultats théoriques et numériques des simulations et des formules de dégradation. Bien que le contrôle MPPT puisse améliorer les performances des systèmes PV, il est essentiel de noter qu'il n'est pas réaliste de s'attendre à ce qu'un système dégradé fonctionne aussi bien qu'un système neuf.

Néanmoins, en appliquant les connaissances acquises et en s'appuyant sur des outils tels que des logiciels intelligents, nous pouvons atténuer les problèmes et accroître l'efficacité des systèmes photovoltaïques, améliorant ainsi leur viabilité à long terme.

Bibliographie

Les références bibliographiques

- [1] A. Azizi, « Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride,» Thèse de Doctorat de l'Université de Annaba, Annaba, 2019.
- [2] A. B. Boudghene Stambouli, «Algerian renewable energy assessment: the challenge of sustainability,» *Energy Policy*, vol. 39, pp. 4507-4519, 2011.
- [3] A. K. Z. F. S. K. Y. Stambouli, «A review on the renewable energy development in Algeria : current perspective,energy scenario and sustainability issues,» *Renew.Sustain.Energy Rev*, 2012.
- [4] F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani et A. Reciou, «A contribution in the actualization of wind map of Algeria. Renew.,» *Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, pp. 993-1002, 2011.
- [5] A. B. Stambouli, Y. Himri et S. Himri, «Assessing the wind energy potential projects in Algeria,» *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 13, pp. 2187-2191, 2009a.
- [6] Y. Himri, , A. Stambouli, B. Draoui et S. Himri, «Review of wind energy use in Algeria,» *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 13, pp. 910-914., 2009b.
- [7] S. Saiah et A. Stambouli, «] SProspective analysis for a long-term optimal energy mix planning in Algeria: towards high electricity generation security in 2062,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 26-43., 2017.
- [8] A. Akbi, M. Saber, M. Aziza et N. Yassaa, «n overview of sustainable bioenergy potential in Algeria,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017.
- [9] A. B. Stambouli, «Promotion of renewable energies in Algeria: strategies and perspectives,» *Renew. Sustain. Energy Rev*, vol. 15, pp. 1169-1181., 2011.
- [10] A. Maafi, « A survey on photovoltaic activities in Algeria. Renew. Energy,» *Renew. Energy* , vol. 20, pp. 9-17, 2000.
- [11] H. Maammeur, A. Hamidat, L. Loukarfi, L. Loukarfi, M. Missoum, K. Abdeladim et T. Nacer, «Performance investigation of grid-connected PV systems for family farms: case study of North-West of Algeria.,» *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2017.

- [12] «<https://slideplayer.fr/slide/3274136/>».
- [13] A. Stambouli, B. Khiat, S. Flazi et Y. Kitamura, «Stambouli,A.B;A review on the renewable energy development in Algeria: current perspective, energy scenario and sustainability issues,» *Renew.Sustain.Energy Rev*, 2012.
- [14] «[14] Algeria global horizontal irradiation [WWW Document], n.d. URL <http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/algeria>».
- [15] G. Oreski et G. M. Wallner, «Evaluation of the Aging Behavior of Ethylene Copolymer Films for Solar Applications under Accelerated Weathering Conditions,» *Solar Energy*, vol. 83, pp. 1040-1047, 2009.
- [16] M. OULED HADJ YUCEF et A. HAMIDA, «Etude comparative entre système de pompage solaire (photovoltaïque) et système de pompage classique (conventionnel),» Mémoire master de l'Université de Ghardaia, Ghardaia, 2021.
- [17] A. M. Ansar et A. E. Djebaili Imed , «L'efficacité énergétique dans le bâtiment architectural.Cas d'étude : Évaluation des performances énergétiques du rectorat de,» Mémoire de master de l'Université de Oum El Bouaghi, Oum El Bouaghi, 2017.
- [18] P. Stéphane, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques,» Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III , Toulouse, 2009.
- [19] S. FADHEL, «Efficacité énergétique et Surveillance d'un microgrid à courant continu alimenté par des panneaux photovoltaïques,» Thèse présentée et soutenue à l'ENI Sousse, Sousse, 2020.
- [20] A. Lannoy et H. Procaccia , *Evaluation et maîtrise du vieillissement industriel*. Lavoisier, 2005.
- [21] D. R, «Modélisation du vieillissement d'une cellule photovoltaïque au silicium et de ses matériaux d'encapsulation,» Thèse de Doctorat de l'Université de Boumerdes, Boumerdes, 2018.

- [22] E. Andenæs, B. P. Jelle, K. Ramlo, S. E. Foss, T. Kol\aaas et J. Selj, «The influence of snow and ice coverage on the energy generation from photovoltaic solar cells,» *Solar Energy*, vol. 159, p. 318–328, 2018.
- [23] A. Hemza, H. Abdeslam, C. Rachid et N. Aoun, «Simplified methods for evaluating the degradation of photovoltaic module and modeling considering partial shading,» *Measurement*, vol. 138, p. 217–224, 2019.
- [24] K. R., «Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétiques,» Thèse de Doctorat de l'Université de Setif, Setif, 2015.
- [25] A. B. e. al, « Analysis and evaluation of the impact of climatic conditions on the photovoltaic modules performance in the desert environment,» *Energy Conversion and Management*, vol. 106, p. 1345–1355, 2015.
- [26] M. Santhakumari et N. Sagar, «A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques,» 2019.
- [27] A. NDIAYE, «Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques - Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance,» Thèse de Doctorat DE L'Université de Dakar, Dakar, 2013.
- [28] <https://www.pv-magazine.fr/2021/12/14/les-causes-de-leffet-pid-sur-les-cellules-solaires-bifaciales/>.
- [29] A. Hemza, «Etude de fiabilité et du vieillissement des panneaux photovoltaïques,» Thèse de Doctorat de l'Université Constantine, Constantine, 2019.
- [30] N. Sahouane , A. Ziane, R. Dabou, A. Neçaibia, A. Rouabhia, S. Lahctar, M. Blal, A. Slimani et T. Boudjamaa, «Technical and economic study of the sand and dust accumulation impact on the energy performance of photovoltaic system in Algerian Sahara,» 2023.
- [31] A.BENAKARA, «Détection et isolation de défauts pour une installation photovoltaïque,» Mémoire de master de l'Université de Guelma, Guelma, 2022.

- [32] A. Bouraiou, M. Hamouda, A. Chaker, A. Neçaibia, M. Moustefaoui, N. Boutasseta, A. Ziane, R. Dabou, N. Sahouane et S. Lachtar, «Experimental investigation of observed defects in crystalline silicon PV modules under outdoor hot dry climatic conditions in Algeria.,» *Sol. Energy*, vol. 159, p. 475–487, 2018.
- [33] A. Gok, E. Ozkay, G. Friesen et F. Frontini, «Power Loss Modes of Building-Integrated Photovoltaic Modules: An Analytical Approach Using Outdoor \$I-V\$ Curves,» *IEEE J. Photovolt.*, vol. 11, p. 789–796, 2021.
- [34] I. Høiaas, K. Grujic, A. G. Imenes, I. Burud, E. Olsen et N. Belbachir, «Inspection and condition monitoring of large-scale photovoltaic power plants: A review of imaging technologies.,» *Renew. Sustain , Energy Rev*, vol. 161, pp. 112-353, 2022.
- [35] L. Koester, A. Astigarraga, S. Lindig et D. Moser, «Development of Daylight Photoluminescence Technique for Photovoltaic Modules and Investigation of Temperature Dependency,» *In Proceedings of the 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Online*, pp. 908–913 , 7–11 , 2020.
- [36] R. Bhoopath, O. Kunz, M. Juhl, T. Trupke et Z. Hameiri, « Outdoor photoluminescence imaging of photovoltaic modules with sunlight excitation.,» *Prog. Photovolt. , Vols. %1 sur %226,*, pp. 26, 69–73, 2017.
- [37] X. Ma, W. H. Huang, E. Schnabel, M. Köhl, J. Brynjarsdittir, J. L. Braid et R. H. French, «Data-Driven I–V Feature Extraction for Photovoltaic Modules,» *IEEE J. Photovolt*, vol. 9, p. 1405–1412, 2019.
- [38] M. K. Da Silva, M. S. Gul et H. Chaudhry, « Review on the Sources of Power Loss in Monofacial and Bifacial Photovoltaic Technologies.,» *Energies*, vol. 14, pp. 79-35, 2021.
- [39] J. E. Da Fonseca, F. S. de Oliveira, C. W. Prieb et A. Krenzinger, «Degradation analysis of a photovoltaic generator after operating for 15 years in southern Brazil,» *Sol. Energy*, vol. 196, p. 196–206, 2020.
- [40] M. Islam, M. Hasanuzzaman et N. A. Rahim, «A comparative investigation on in-situ and laboratory standard test of the potential induced degradation of crystalline silicon photovoltaic modules,» *Renew. Energy*, vol. 127, p. 102–113, 2018..

- [41] J. Lorentzen, D. Scheiman, W. Yoon, R. Walters et P. Jenkins, «Photoluminescence Imaging and Characterization of Single and Multi-Junction Solar Cells,» *In Proceedings of the 2020 47th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Calagary, AB*, vol. Canada , pp. 1694-1696, 2020.
- [42] J. S. e. al, «Photoluminescence-Imaging-Based Evaluation of Non-Uniform CdTe Degradation,» *In Proceedings of the 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, Vols. %1 sur %2Washington DC , USA, p. 3305–3308, 2017.
- [43] R. Bhoopathy, O. Kunz, M. Juhl, T. Trupke et Z. Hameiri, «Inspecting Series Resistance Effects and Bypass Diode Failure Using Contactless Outdoor Photoluminescence Imaging,» *In Proceedings of the 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC),,* vol. Waikoloa Hi USA, pp. 337-380, 2018.
- [44] D. B. e. all, « Photoluminescence for Defect Detection on Full-Sized Photovoltaic Modules,» *IEEE J. Photovolt*, vol. 11, p. 1419–1429, 2021.
- [45] K. e. all, «Investigation and Analysis of Defects and Degradations in Desert Fielded Photovoltaic Modules,» *In Proceedings of the 2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, Vols. %1 sur %2FL, USA, p. 788–792, 2021.
- [46] I. N. e. all, «Multiscale Characterization of Photovoltaic Modules—Case Studies of Contact and Interconnect Degradation,» *IEEE J. Photovolt*, vol. 12, p. 62–72, 2021.
- [47] L. BESSOLTANE, Z. Azzouz et D. Toumi, «Emissions BF des chargeurs commandés par régulateur à Hystérésis embarqués dans les véhicules électriques hybrides rechargeables (V.E.H.R),» *International Journal of Control, Energy and Electrical Engineering (CEEE)*, vol. 10, pp. 1-4, 2019.
- [48] M. Gapderou, Atlas Solaire de L’Algérie, Tomel2, OPU 1983.
- [49] M. Sarniak, «Modeling of photovoltaic modules in Simulink and Simscape packages of Matlab software ,ECONTECHMOD.AN INTERNATIONAL QUARTERLY JOURNAL-2017,Vol 06,No.1,133-138,» *ECONTECHMOD.AN INTERNATIONAL QUARTERLY JOURNAL*, vol. 1, pp. 133-138, 2017.

- [50] A. Bilbao, «le arreta réalisation de commandes mppt numériques,» *diplome ingénieur technique industriel*, 2006.
- [51] S. Boumaraf et A. C. Bouhnik , «Etude expérimentale du phénomène de refroidissement des panneaux photovoltaïques,» Mémoire master de l'Université de Annaba, Annaba, 2022.
- [52] H. Lensari et Y. Sdiri, «Optimisation et réalisation d'un système de conversion photovoltaïque à base de l'approche MPPT,» Mémoire master de l'Université de Adrar, Adrar, 2018.
- [53] Y. Abdelaziz, «Contribution à l'optimisation des performances d'un générateur photovoltaïque en présence d'ombrage partiel,» Thèse de Doctorat de l'Université de Sidi bel-abbes, Sidi bel-abbes, 2017.
- [54] A. Klalib et F. Remidi, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque à base de logique floue,» Mémoire de master de l'université de Medea, Medea, 2018.
- [55] M. Pinard, *Convertisseurs et électronique de puissance*, Dunod, 2007.
- [56] W. Z. Chouikhi, «Réalisation d'une commande buck-boost pour PV,» Mémoire master de l'Université de Tlemcen, Tlemcen, 2018.
- [57] M. R. e. all, «[57 Comparative analysis of P&O and incremental conductance method for PV system,» *International Journal of Engineering & Technology*, vol. 7, pp. 519-523, 2018.
- [58] S. S. e. all, «Solar Tracking and Automated Water Pumping System,» [58] S Sushruthi Pai, Yashaswini Y Acharya, Vibha K P , *International Journal of Engineering Research & Technology* , pp. ISSN: 2278-0181.
- [59] C. TIGRINE et O. Ait Ouali, « Etude et simulation des techniques MPPT d'un système photovoltaïque,» Mémoire de master de l'Université de Bejaia, Bejaia, 2019.
- [60] R. Doumane, M. Balistrrou, P. O. Logerais, O. Riou, J. F. Durastanti et A. Chakri, «A circuit-based approach to simulate the characteristics of a silicon photovoltaic module

- with aging,» *ASME-Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 137(2), pp. 0212020-0212020-7, 2015.
- [61] A. Azizi, O. Amar , L. Pierre-Olivier et A. Adel , «Impact of the aging of a photovoltaic module on the performance of a grid-connected system,» vol. 174, pp. 445- 454, 2018.
- [62] D. C. Jordan et S. R. Kurtz, «Photovoltaic Degradation Rates-an Analytical Review,» *Research and applications*, vol. 21, pp. 12-29, 2018.
- [63] B. A, «Simulation des caractéristiques électriques des panneaux photovoltaïques,» Mémoire de master de l'Université de Biskra, Biskra, 2019.
- [64] M. Mokhtari et N. Martaj, *Electronique Appliquée, Electromécanique sous Simscape & SimPowerSystems (Matlab/Simulink)*, Springer Science & Business Media, 2012, pp. M. Mokhtari, N. Martaj, *Electronique Appliquée, Electromécanique sous Simscape & SimPowerSystems (Matlab/Simulink)* : Springer Science & Business Media, 2012..
- [65] [http://www.mppsolar.com/manual/Watchpower%20\(off-grid\)/WatchPower%20user%20manual.pdf](http://www.mppsolar.com/manual/Watchpower%20(off-grid)/WatchPower%20user%20manual.pdf).
- [66] <https://www.mppsolar.com/v3/portfolio/watchpower-wifi-new/>.

Annexe

Annexe

Module Photovoltaïque	$P_m=250W$
	$V_{oc}=36.2V$
	$I_{sc}=9.2A$
	$V_{mpp}=30V$
	$I_{mpp}=8.47A$
	$R_s=0.342 \Omega$
	$R_{sh}=1287.7732 \Omega$
	$N_s=60$
Convertisseur	$L=8 \times 10^{-3}H$
	$C=53.6 \times 10^{-5}F$
Charge	$R=29.55 \Omega$