



République Algérienne Démocratique et Populaire
Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN RESEAU ELECTRIQUE
Spécialité :..... Electrotechnique

Par
BENKADDOUR MOHAMED
&
HAMMOU YOUSSEUF

Thème :

Conception et mise en œuvre d'un système SCADA pour une mini-station photovoltaïque

Soutenue le 24/06/2026 devant le jury composé de :

Président	HADRI Baghdad	PCA	Université de Mostaganem
Encadreur	SOUAG Slimane	MCB	Université de Mostaganem
Examineur	HENNI Sid Ahmed	MCA	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2025/2026

Remerciements

Avant tout, nous rendons grâce à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa bénédiction, rien n'aurait été possible.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, Monsieur SOUAG Slimane, pour son accompagnement précieux, ses conseils avisés, sa disponibilité constante ainsi que pour son soutien et ses encouragements tout au long de la réalisation de ce projet.

Nos sincères remerciements s'adressent également à Monsieur YOUNES Abdellah qui nous a fait l'honneur de présider le jury de soutenance.

Nous remercions chaleureusement Monsieur HENNI Sid Ahmed pour avoir accepté d'examiner ce modeste travail et de faire partie du jury.

Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance à l'ensemble des enseignants de l'Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem qui ont contribué à notre formation durant ces cinq années d'études, particulièrement les enseignants de l'option Génie Électrique, dont le savoir et le dévouement ont grandement enrichi notre parcours académique.

Enfin, nous adressons nos plus vifs remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et nous ont apporté leur aide, leur soutien ou leurs encouragements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents pour leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements permanents.

À mes chères sœurs pour leur soutien et leur présence à mes côtés.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde gratitude à ma sœur Asma, qui a été un véritable soutien tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, je remercie chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Mohamed.

Dédicace

À ceux qui m'ont appris le sens du don et de la patience, à ceux qui ont été mon soutien à chaque étape de mon parcours, à mes chers parents, je dédie le fruit de ce modeste travail.

À mes frères et sœurs bien-aimés, qui ont toujours été à mes côtés, me prodiguant soutien et encouragement.

À mon binôme et compagnon de route dans ce travail, BENKADDOUR Mohamed, avec qui j'ai partagé les efforts de la recherche et les moments de réussite.

À vous tous, je dédie ce modeste travail.

Yousseuf.

Liste des abréviations

PV :	Photovoltaïque
GPV :	Générateur Photovoltaïque
I-V :	Courant-Tension
P-V :	Puissance-Tension
ϵ:	Epsilon
KWc/m²	Kilowatt crête par mètre carré
μm:	Micromètre
AM :	Air Mass
P-N :	Jonction Positive–Négative
DC :	Courant Continu (Direct Current)
AC :	Courant Alternatif (Alternating Current)
CIS	Cuivre Indium Silicium
SCADA :	Système de Contrôle et d'Acquisition de Données
RTU :	Remote Terminal Unit
PLC :	Contrôleur Logique Programmable
OHS :	Opérateur Humain de Supervision
MTU :	Master Terminal Unit
HMI :	Interface Homme Machine
API :	Automate Programmable Industriel
TLS	Sécurité de la couche transport (Transport Layer Security)
NOCT :	Nominal Operating Cell Temperature
LABview :	Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench
MPP:	Maximum Power Point
PWM :	Pulse Width Modulation

Liste des figures :

Figure 01 :	Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque.....	03
Figure 02 :	Composants du rayonnement solaire.....	05
Figure 03 :	Les différentes composantes des rayonnements.....	06
Figure 04 :	Différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	07
Figure 05 :	Cellule monocristalline.....	08
Figure 06 :	Cellule poly cristalline.....	08
Figure 07 :	Cellule mince amorphe.....	09
Figure 08 :	La structure de la cellule photovoltaïque.....	10
Figure 09 :	Système PV autonome ou isolé.....	11
Figure 10 :	Système PV raccordé au réseau sans batterie.....	12
Figure 11 :	Système PV hybride.....	13
Figure 12 :	Organisation logicielle de superviseur.....	16
Figure 13 :	Architecture monolithique.....	16
Figure 14 :	Architecture distribuée.....	17
Figure 15 :	Architecture en réseau.....	18
Figure 16 :	Architecture en internet des objets.....	18
Figure 17 :	Schéma générale de la supervision.....	19
Figure 18 :	Remote Terminal Unit (RTU).....	20
Figure 19 :	Schéma général d'un RTU.....	21
Figure 20 :	Topologie de différents modes de communication SCADA.....	21
Figure 21 :	Illustration de l'architecture d'un système SCADA simple.....	23
Figure 22 :	Composants d'un GPV.....	26
Figure 23 :	Circuit électrique équivalent du générateur PV.....	27
Figure 24 :	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (une diode).....	29
Figure 25 :	Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (deux diodes).....	30
Figure 26 :	Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série.....	31
Figure 27 :	Modules en série avec diodes by-pass.....	32
Figure 28 :	Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle.....	32
Figure 29 :	Modules en parallèle avec diodes anti-retour.....	33
Figure 30 :	Montage série-parallèle de modules photovoltaïques.....	34
Figure 31 :	Caractéristique $I(V)$	34
Figure 32 :	Caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire.....	35
Figure 33 :	NI Multisim 14.1.....	36
Figure 34 :	Logo du logiciel Labview.....	37
Figure 35 :	Environnement de travail de Multisim (Interface vide).....	39
Figure 36 :	Accès aux composants via le menu Place → Component (All Groups).....	40
Figure 37 :	Sélection du groupe Basic et affichage des familles de composants dans Multisim.....	41
Figure 38 :	Schéma de simulation d'un panneau photovoltaïque sous Multisim.....	42
Figure 39 :	Schéma du panneau photovoltaïque avec hacheur Buck intégré (Multisim).....	43
Figure 40 :	Schéma global de la mini-station photovoltaïque simulée sous Multisim avec instruments de mesure et interface LabVIEW.....	45
Figure 41 :	Réglage du rapport cyclique (duty cycle) à 25 % du générateur XFG1 et analyse de la forme d'onde de tension sous Multisim.....	47
Figure 42 :	Fixation du rapport cyclique à 75 % dans le générateur XFG1 et visualisation de la courbe de tension correspondante sous le logiciel Multisim.....	47
Figure 43 :	Stabilité de la courbe du courant pour des rapports cycliques de 25 % et 75%.....	48
Figure 44 :	Modélisation d'une mini-station photovoltaïque sous l'interface Multisim avec un rapport cyclique (Duty Cycle) de 75 %.....	48

Figure 45 :	Modélisation d'une mini-station photovoltaïque sous l'interface Multisim avec un rapport cyclique (Duty Cycle) de 25 %.....	48
Figure 46 :	Schéma de co-simulation du système photovoltaïque sous Multisim et LabVIEW.....	50
Figure 47 :	Représentation des tensions d'entrée (rouge) et de sortie (jaune).....	54
Figure 48 :	Représentation du courant de sortie du système.....	54
Figure 49 :	Signal PWM généré.....	55
Figure 50 :	Représentation de la valeur RMS.....	55
Figure 51 :	Diminution de la tension d'entrée avec maintien des tensions et du courant de sortie constants.....	55
Figure 52 :	Augmentation de la tension d'entrée avec maintien des tensions et du courant de sortie constants.....	56
Figure 53 :	Interface finale de supervision sous LabVIEW assurant les fonctions SCADA....	56

Liste des tableaux :

Tableau 01 :	Comparaison des valeurs mesurées d'entrée et de sortie (lecture verticale).....	59
Tableau 02 :	Comparaison des valeurs mesurées d'entrée et de sortie (lecture verticale).....	60

Sommaire

Liste des abréviations

Liste des figures

List des tableaux

Résumé

Partie bibliographique :

Introduction générale	01
Chapitre 01 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques	
I.1. Introduction	03
I.2. Historique	03
I.3. L'énergie solaire	04
I.4. Rayonnement solaire	04
I.5. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire	05
I.5.1. Rayonnement direct	05
I.5.2. Rayonnement diffus	06
I.5.3. Rayonnement réfléchi	06
I.5.4. Rayonnement global	06
I.6. Effet photovoltaïque	06
I.6.1 La cellule photovoltaïque	07
I.6.1.1. Différentes technologies des cellules photovoltaïques	07
I.6.1.2. Les cellules monocristallines	08
I.6.1.3. Les cellules poly cristallines	08
I.6.1.4. Les cellules en couches minces (amorphe)	08
I.6.1.5. Autre types de cellules	09
I.6.2. Structures de la cellule photovoltaïques	09
I.6.3. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire	10
I.7 Le Système photovoltaïque	10
I.7.1. Définition	10
I.8. Types d'un système solaire photovoltaïque	11
I.8.1. Système autonome	11
➤ Système autonome avec stockage	11
I.8.2. Système photovoltaïques raccordé au réseau	12
I.8.3. Système photovoltaïques hybride	13
I.9. Avantage et inconvénient d'énergie photovoltaïques	13
I.9.1. Avantage	13
I.9.2 Inconvénient	14
I.10. Conclusion	14
Chapitre 02 : Présentation des systèmes SCADA	
II.1. Introduction	15
II.2. Définition de SCADA	15
II.3. Evolution du système SCADA	16
II.4. Système SCADA	18
II.4.1. Supervision des procédés	19
II.4.2. La surveillance	19

II.5. Eléments du système SCADA.....	20
II.5.1 RTU/PLC	20
II.5.2 MTU	21
II.5.3 Communication	21
II.6. Fonctionnalité d'un système de Supervision	22
II.7 Architecture du système SCADA.....	23
II.8. Avantages du SCADA	24
II.10. Conclusion	25
Chapitre 03 : Modélisation du système PV et présentation des outils de simulation	
III.1. Introduction	26
III.2. Générateur photovoltaïque.....	26
III.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque.....	27
III.3.1 Les modèles mathématiques	28
III.4. Association des modules photovoltaïques	31
III.4.1 Association en série.....	31
III.4.2 Association en parallèle	32
III.4.3 Association série-parallèle	33
III.5 Caractéristiques I–V et P–V	34
III.6 Protections classiques d'un Générateur photovoltaïque.....	35
III.7 Facteurs influençant les performances du GPV	35
III.8 Présentation des outils de simulation	36
III.8.2 Labview comme outil de supervision (SCADA)	36
III.9 Communication entre les deux logiciels	37
III.10. Intérêt de la co-simulation	38
III.11. Conclusion	38
Chapitre 04 : Modélisation et simulation d'une Mini-station PV sous Multisim et LabVIEW	
IV.1. Introduction.....	39
IV.2. Cahier des charges de la mini-station photovoltaïque.....	39
IV.3. Modélisation du système sous Multisim.....	39
IV.3.1. Etape (01) Prise en main de l'environnement NI Multisim	40
IV.3.2. Etape (02) modélisation équivalente du panneau solaire sous NI Multisim.....	41
IV.3.4. Etape (04) conception d'un système photovoltaïque complet avec supervision LabVIEW.....	43
IV.3.5. Etape (05) influence du duty cycle sur les performances du convertisseur Buck	46
IV.3.6. Etape (6) mise en œuvre d'une architecture SCADA basée sur la co-simulation	49
Multisim–LabVIEW :.....	
IV.3.7. Etape (7) analyse des résultats et validation du système photovoltaïque	51
IV.4. Conclusion	57
Discussion des Résultats	58
Conclusion générale	61
Référence bibliographiques	

Résumé :

Ce mémoire est consacré à la conception et à la mise en œuvre d'un système SCADA destiné à la supervision d'une mini-station photovoltaïque.

Le système simulé repose sur un ensemble de sources de courant représentant les cellules photovoltaïques, associées à un pont de diodes BYT28 et à un hacheur Buck composé du MOSFET IRF540N, de l'inductance L1 (100 mH), de la diode MBR20100 et du condensateur C1 (100 μ F), courant des panneaux solaire en 4 (2000 mA).

La régulation de la tension de sortie est assurée par une boucle de commande fermée basée sur un signal PWM à rapport cyclique variable, élaboré par le générateur de fonctions XFG1 et piloté via les terminaux de co-simulation LabVIEW.

L'interface SCADA, développée sous LabVIEW, permet la supervision en temps réel des grandeurs électriques de la station, notamment la tension, le courant et la puissance de sortie. Les résultats de simulation obtenus sous Multisim démontrent la capacité du système à stabiliser la tension de sortie autour de 99,8 V et la puissance à 19,92 kW, malgré les fluctuations de la tension d'entrée, confirmant ainsi l'efficacité du hacheur Buck dans la poursuite du point de puissance maximale (MPPT).

Mots-clés : Système SCADA, Mini-station photovoltaïque, Hacheur Buck, PWM, LabVIEW, Multisim, MPPT, Co-simulation.

ملخص :

تتناول هذه المذكرة تصميم وتنفيذ نظام (SCADA) مخصص للإشراف والتحكم في محطة كهروضوئية مصغرة. يعتمد النظام المُحاكى على مجموعة من مصادر التيار التي تمثل الخلايا الكهروضوئية، والمقترنة بجسر ثنائيات من نوع (BYT28) ومحول خافض للجهد (Buck) يتكون من ترانزستور (MOSFET) من نوع (IRF540N) ، وملف حثي (L1) بقيمة 100 ميلي هنري، وثنائي (MBR20100) ، ومكثف (C1) بسعة 100 ميكروفاراد، تيار الألواح الشمسية 4 (2000 ملي أمبير).

يتم تنظيم جهد الخرج بواسطة حلقة تحكم مغلقة تعتمد على إشارة (PWM) ذات نسبة تشغيل متغيرة، يتم توليدها بواسطة مولد الوظائف XFG1 والتحكم فيها عبر منافذ المحاكاة المشتركة (Co-simulation) الخاصة ببرنامج (LabVIEW)

تتيح واجهة (SCADA) المطورة باستخدام (LabVIEW) الإشراف الآني على المتغيرات الكهربائية للمحطة، ولا سيما جهد الخرج والتيار والقدرة الكهربائية. وتُظهر نتائج المحاكاة المحصل عليها باستخدام (Multisim) قدرة النظام على تثبيت جهد الخرج عند حوالي 99.8 فولت والقدرة عند 19.92 كيلوواط، رغم تقلبات جهد الدخل، مما يؤكد فعالية المحول الخافض (Buck) في تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT)

الكلمات المفتاحية: نظام (SCADA)، محطة كهروضوئية مصغرة، محول خافض للجهد (Buck) ، تعديل عرض النبضة (PWM)، (LabVIEW)، (Multisim)، تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) ، المحاكاة المشتركة (Co-simulation).

Abstract:

This thesis is devoted to the design and implementation of a SCADA system for the supervision of a mini photovoltaic power station.

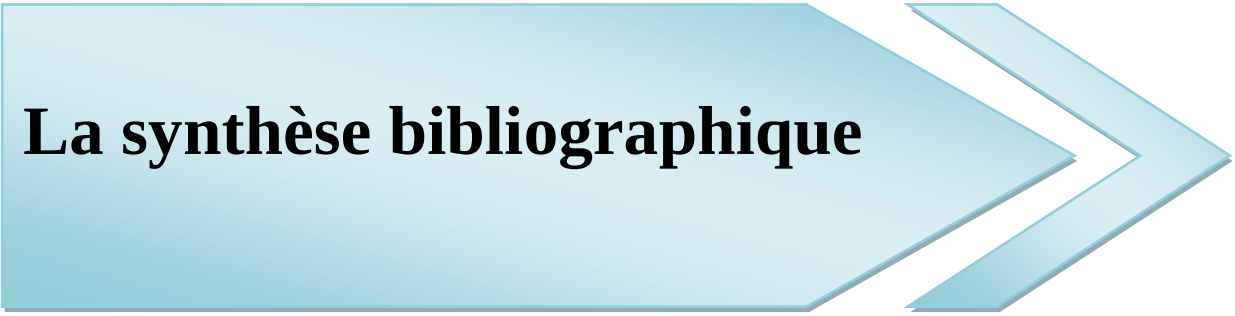
The simulated system is based on a set of current sources representing photovoltaic cells, coupled with a BYT28 diode bridge and a Buck converter composed of an IRF540N MOSFET, an L1 inductor (100 mH), an MBR20100 diode, and a C1 capacitor (100 μ F), solar panel current 4 is (2000 mA).

The output voltage regulation is ensured by a closed-loop control system based on a Pulse Width Modulation (PWM) signal with a variable duty cycle, generated by the XFG1 function generator and controlled through the LabVIEW co-simulation terminals.

The SCADA interface, developed using LabVIEW, enables real-time monitoring of the station's electrical parameters, including output voltage, current, and power. The simulation results obtained using Multisim demonstrate the system's ability to stabilize the output voltage at approximately 99.8 V and the output power at 19.92 kW despite fluctuations in the input voltage, thereby confirming the effectiveness of the Buck converter in Maximum Power Point Tracking (MPPT).

Keywords: SCADA System, Mini Photovoltaic Power Station, Buck Converter, PWM, LabVIEW, Multisim, MPPT, Co-simulation.

La synthèse bibliographique



Introduction générale :

L'énergie solaire photovoltaïque connaît aujourd'hui un essor considérable à l'échelle mondiale, en raison de l'épuisement progressif des ressources fossiles et des préoccupations croissantes liées aux changements climatiques. Dans ce contexte, l'optimisation de la production et de la supervision des installations photovoltaïques devient un enjeu majeur pour garantir leur efficacité et leur fiabilité.

Les systèmes SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) représentent une solution incontournable pour la supervision en temps réel des installations énergétiques. Leur intégration dans les mini-stations photovoltaïques permet d'assurer une acquisition continue des grandeurs électriques, un contrôle efficace des équipements et une détection rapide des anomalies de fonctionnement.

Cependant, la supervision des mini-stations photovoltaïques soulève une problématique fondamentale : Comment garantir une surveillance fiable et continue des grandeurs électriques d'une installation PV soumise à des variations importantes d'irradiance solaire, tout en assurant la stabilité des grandeurs de sortie ? En effet, la tension générée par les panneaux solaires varie considérablement selon les conditions d'ensoleillement, ce qui rend indispensable l'intégration d'un système de conversion et de supervision capable de maintenir des grandeurs de sortie stables et exploitables.

Pour répondre à cette problématique, nous proposons la conception et la mise en œuvre d'un système SCADA pour une mini-station photovoltaïque, en utilisant la co-simulation entre Multisim pour la modélisation du circuit de puissance intégrant un convertisseur Buck commandé par signal PWM, et LabVIEW pour le développement de l'interface de supervision en temps réel.

- Afin d'atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en quatre chapitres :
 - Le premier chapitre présente les généralités sur les systèmes photovoltaïques.
 - Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des systèmes SCADA.
 - Le troisième chapitre introduit la modélisation du système PV et les outils de simulation utilisés.
 - Enfin, le quatrième chapitre présente la modélisation et la simulation de la mini-station PV sous Multisim et LabVIEW, constituant le cœur applicatif de ce travail.

Chapitre 01 :
Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. [1]

Cette figure représente le principe de fonctionnement:

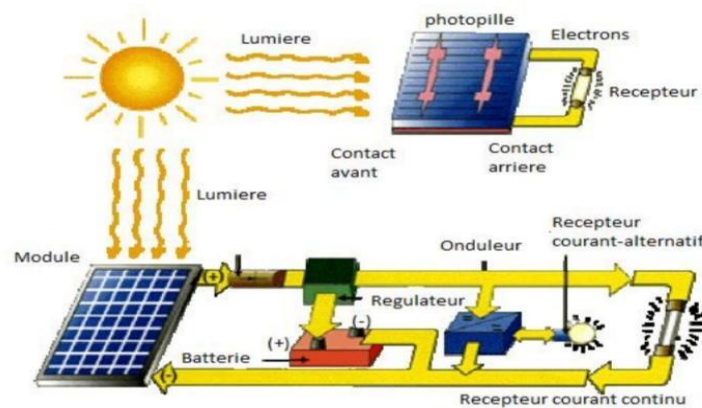


Figure 1 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque [2].

I.2. Historique :

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photovoltaïque, a été découverte pour la première fois par Antoine Becquerel en 1839 [3].

C'était qu'en 1958 où le premier engin spatial alimenté par énergie photovoltaïque a été lancé dans l'espace. Jusqu'à maintenant, l'énergie solaire photovoltaïque est le seul type d'énergie d'alimentation des satellites [3].

Pendant les années 70 et 80, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware. La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés au Japon et en Allemagne et ils se généralisent depuis 2001 [3].

Chapitre 01 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Depuis le début des années 80, la quantité de modules photovoltaïques expédiés par an (mesurés en MW-Crêtes) a augmenté et le prix des modules (par Watt-Crête) diminuait au fur et à mesure que le nombre de modules fabriqués augmentait. Bien que le prix se soit quelque peu stabilisé, la quantité de modules photovoltaïques expédiés chaque année continue d'augmenter.

I.3. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

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

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [4].

I.4. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène – hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Chapitre 01 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Sa lumière, à une vitesse de 300000 km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ $0.5\mu\text{m}$, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°K [5] :

- Diamètre de soleil $D_s = 1.39.10^9\text{m}$
- Diamètre de la terre $D_t = 1.27.10^7\text{m}$
- Distance moyenne soleil_ terre $L_{ts} = 1.5.10^{11}\text{ m}$

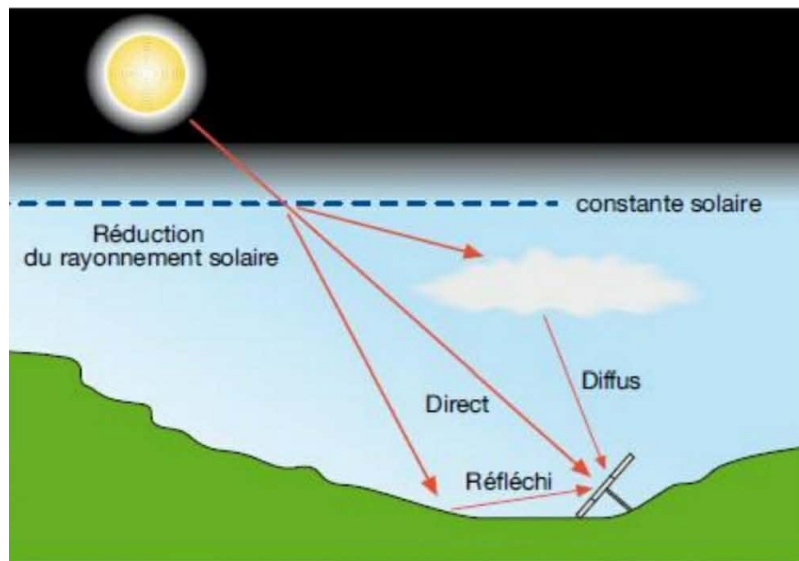


Figure 2 : Composants du rayonnement solaire. [6]

I.5. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [5] :

I.5.1. Rayonnement direct :

Flux solaire sous forme de rayons parallèles provenant de disque soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère [5].

I.5.2. Rayonnement diffus :

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi multiples réflexions (dispersions), dans l'atmosphère [5].

I.5.3. Rayonnement réfléchi :

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (nuage, sable...). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature de lien appelé Albédo (ϵ) $0 \leq \epsilon \leq 1$ [5].

I.5.4. Rayonnement global :

Un plan reçoit de la part du sol un rayonnement global qui est le résultat de la superposition des trois compositions direct, diffus et réfléchi [5].

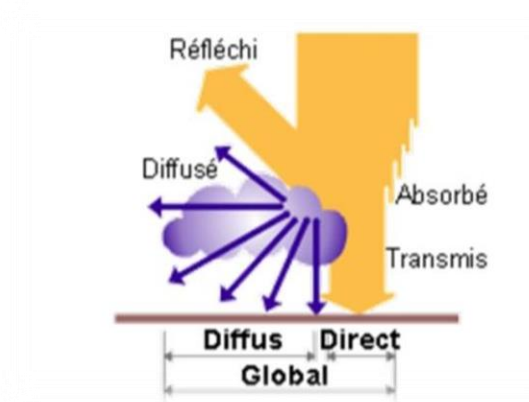


Figure 3 : Les différentes composantes des rayonnements [7].

I.6 Effet photovoltaïque :

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés ": Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque.

Chapitre 01 : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

L'effet photovoltaïque constitue la conversion directe de l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique au moyen de cellules généralement à base de silicium. Pour obtenir une puissance suffisante, les cellules sont reliées entre elles et constituent le module solaire.

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toute fois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Telephone, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque. [8]

I.6.1 La cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium. Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteur pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.

Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier le pair électron-trou créé est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N. [9]

I.6.1.1. Différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherches et de développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont :

Le silicium mono ou poly – cristallin (plus de 80 % de la production mondiale), le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS en fonction des performances recherchées. [10]

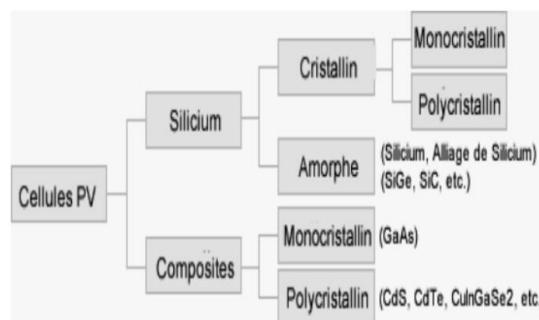


Figure 4: Différentes technologies des cellules photovoltaïques [10].

I.6.1.2. Les cellules monocristallines :

Les panneaux PV avec les cellules monocristallines sont les piles de première génération élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. La découpe des tranches de silicium (wafer).Après, divers traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 22 à 24%, mais la méthode de production est laborieuse. [11]

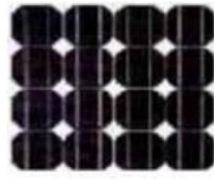


Figure 5 : Cellule monocristalline [11]

I.6.1.3. Les cellules poly cristallines :

Les panneaux PV avec des cellules poly cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (Tonalités différentes). L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Durée de vie estimée : 30 ans. [12]

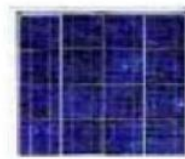


Figure 6 : Cellule poly cristalline [12].

I.6.1.4. Les cellules en couches minces (amorphe) :

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide.

Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première. [12]



Figure 7 : Cellule mince amorphe [12].

I.6.1.5. Autre types de cellules :

Les recherches intensives entreprises depuis de nombreuses années sur d'autres matériaux que ceux à base de silicium ont enfin abouti vers la fin de cette décennie au stade de l'industrialisation des recherches sont encore effectuer pour créer de nouvelles cellules de rendement plus élever, possédant une grande stabilité de leur caractéristique dans le temps et présentant de faible coup de fabrication [11].

I.6.2. Structures de la cellule photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a couche qui sert de cathode (pôle +) recouvrant la couche semi-conductrice dopée couche qui joue le rôle de l'anode (pôle -) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante. [13]

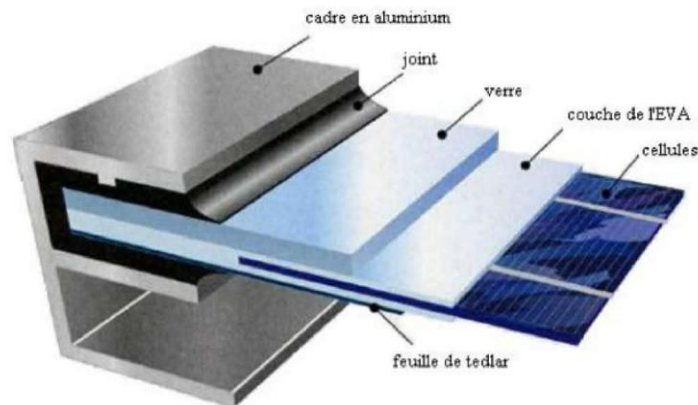


Figure 8 : La structure de la cellule photovoltaïque. [13]

I.6.3. Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif;
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création du pair électron/trou dans le matériau semi-conducteur;
- Collecte des particules générées dans le dispositif;

Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez conducteurs pour permettre l'écoulement du courant d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque. Afin de collecter les particules générées, un champ électrique permettant de dissocier les paires électrons-trous créés est nécessaire. Pour cela on utilise le plus souvent une jonction P-N d'autres structures, comme les hétérojonctions et les Schottky sont également utilisées. [13]

I.7 Le Système photovoltaïque :

I.7.1 Définition :

Le système photovoltaïque est constitué par une source d'énergie (générateur photovoltaïque). Une interface de puissance (les convertisseurs statiques DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie. [8]

I.8. Types d'un système solaire photovoltaïque :

Les systèmes photovoltaïques se classent aujourd'hui en trois types principaux : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau électrique.

I.8.1. Système autonome :

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil). [14]

➤ Systèmes autonomes avec stockage :

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (exemple: calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque : le Réservoir d'eau sert de stockage). [14]

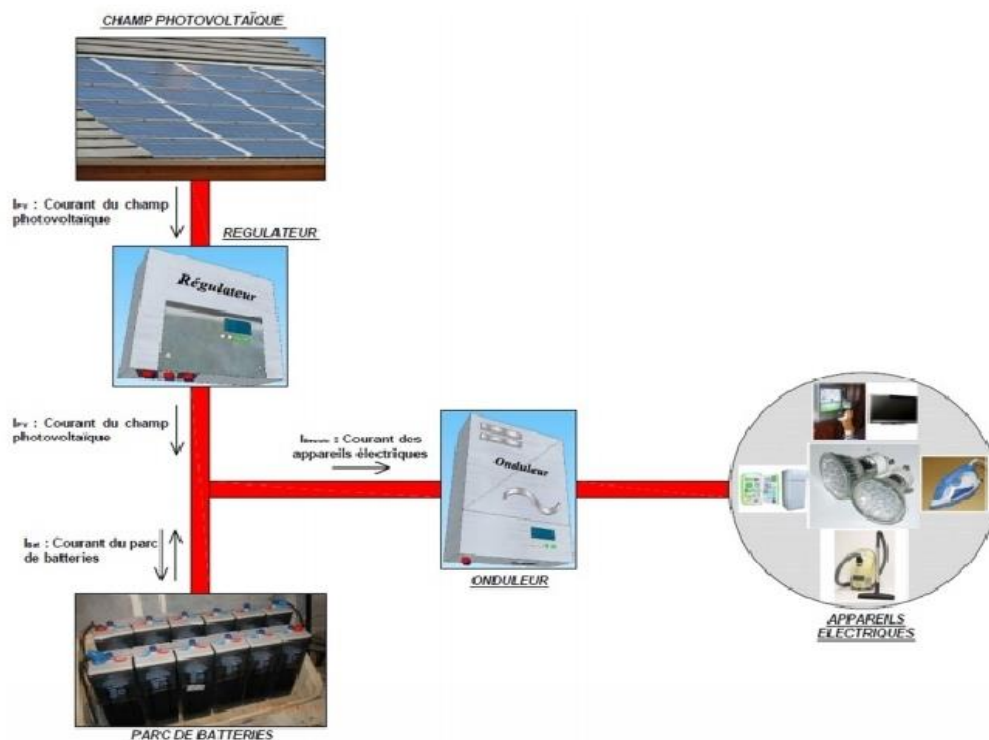


Figure 9 : Système PV autonome ou isolé [14]

➤ Les systèmes autonomes sans stockage:

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairement solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairement solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairement le plus faible.

Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique. La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et en fonction du rayonnement solaire. [14]

I.8.2. Système photovoltaïques raccordé au réseau:

Un tel système s'installe sur un site raccordé au réseau (Sonelgaz en Algérie). Généralement sur des habitations ou des entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable et qui bénéficient d'un bon ensoleillement.

On peut distinguer des systèmes PV raccordés aux réseaux avec et sans batteries de stockage. [14]

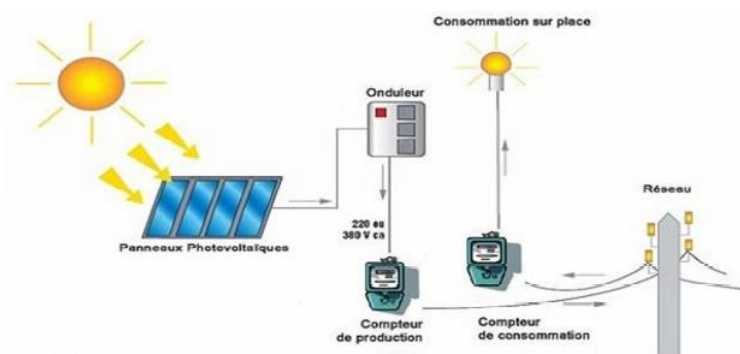


Figure 10 : Système PV raccordé au réseau sans batterie [14]

1.8.3. Système photovoltaïques hybride:

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gazoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours. [14]

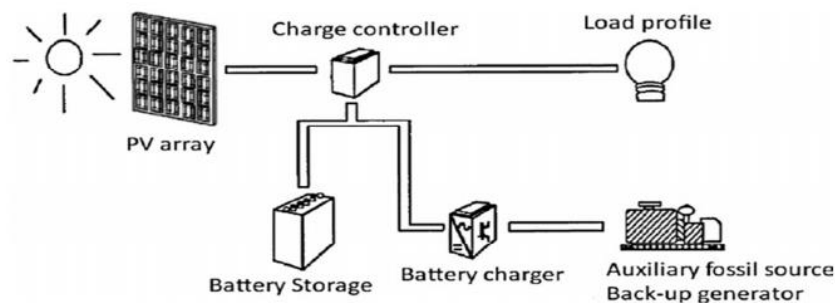


Figure 11 : Système PV hybride [14]

I.9 Avantage et inconvénient d'énergie photovoltaïques :

I.9.1 Avantage :

- Sa gratuité
- Pas de pollution
- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation
- Sa structure fixe
- Son coup de maintenance bas
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité)
- L'installation ne produit aucun bruit
- Son potentiel illimité 5% de la surface des déserts sucrerait pour alimenter la planète entière.

I.9.2. Inconvénients :

- Le coût élevé de l'installation
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages)
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome

Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement [15].

I.10. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a présenté les notions générales liées aux systèmes photovoltaïques. Nous avons abordé l'énergie solaire, le rayonnement solaire et ses différentes composantes, ainsi que le principe de l'effet photovoltaïque et les cellules photovoltaïques. Nous avons également présenté les différents types de systèmes photovoltaïques ainsi que leurs avantages et leurs limites. Ces éléments constituent une base théorique importante pour la compréhension des systèmes photovoltaïques, qui sera approfondie dans les chapitres suivants.

Chapitre 02 :
Présentation des systèmes SCADA

II.1. Introduction :

Les systèmes SCADA ont fait leur apparition dans les années 1960, marquant une avancée importante dans le domaine de l'automatisation industrielle. Ils ont permis, pour la première fois, de superviser et de commander à distance des équipements de terrain, tels que des vannes ou des capteurs, depuis un centre de contrôle, évitant ainsi les interventions manuelles directes sur les sites d'exploitation.

Avec les progrès rapides réalisés dans les domaines de l'informatique, des réseaux de communication et des systèmes électriques, les technologies SCADA ont connu une évolution considérable. Aujourd'hui, elles occupent une place essentielle dans la gestion et la supervision des installations industrielles. Par conséquent, la fiabilité, la sécurité et la protection de ces systèmes sont devenues des enjeux majeurs pour garantir le bon fonctionnement et la continuité des processus industriels.

II.2. Définition de SCADA :

SCADA est synonyme de contrôle de surveillance et d'acquisition de données. Comme son nom l'indique, désigne une catégorie de logiciels destinés au contrôle de processus et à la collecte de données en temps réel auprès de sites distants, en vue de contrôler des équipements et des conditions d'exploitation. Il ne s'agit pas d'un système de contrôle complet, mais plutôt d'un niveau de supervision.

Il s'agit d'un progiciel purement logiciel positionné sur le matériel auquel il est interfacé, en général via des automates programmables (PLC) ou d'autres modules matériels commerciaux.

On peut voir aussi que c'est un système de télégestion à grande échelle permettant de traiter en temps réel un grand nombre de télémessures et de contrôler à distance des installations techniques. C'est une technologie industrielle dans le domaine de l'instrumentation, dont les implémentations peuvent être considérées comme des Framework1 d'instrumentation incluant une couche de type middleware2. On trouve par exemple des systèmes SCADA dans les contextes suivants :

- Surveillance de processus industriels
- Transport de produits chimiques
- Réseaux municipaux d'approvisionnement en eau
- Commande de la production d'énergie électrique
- Distribution électrique, canalisations de gaz et de pétrole
- Réseaux de chaleur
- Recherche et études scientifiques et industrielles.

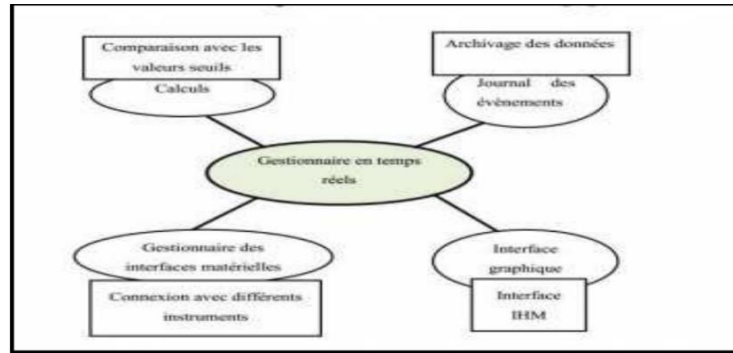


Figure 12 : Organisation logicielle de superviseur. [16]

Les systèmes SCADA sont largement utilisés dans l'industrie pour l'acquisition de données, le pilotage et la surveillance de processus industriels. [16]

II.3 Evolution du système SCADA :

L'utilisation du système SCADA est devenue populaire à partir des années 1960 avec le besoin croissant de surveiller et de contrôler le matériel. Les premiers systèmes construits à l'aide d'ordinateurs centraux étaient coûteux, car ils étaient actionnés et surveillés manuellement.

Mais les progrès récents de la technologie ont permis de créer des systèmes SCADA automatisés et avancés offrant une efficacité maximale à un coût réduit, conformément aux exigences alarmantes de l'entreprise. Dans cette partie, on s'intéresse à l'évolution des systèmes SCADA et description des quatre générations suivantes :

a) Première Génération : « Monolithique »

Les calculs sont réalisés avec des ordinateurs centraux. Les réseaux n'existant pas à cette époque, les systèmes SCADA sont indépendants et ne sont connectés à aucun autre système.

Les réseaux étendus seront conçus par les fournisseurs de RTU (Remote Terminal Unit).

Les protocoles de communication utilisés sont le plus souvent propriétaires.

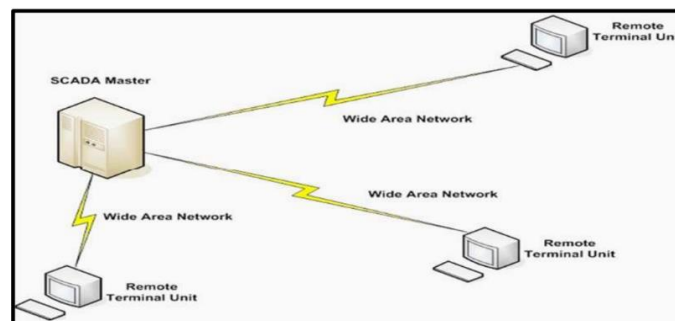


Figure 13: Architecture monolithique. [17]

Chapitre 02 : Présentation des systèmes SCADA

La première génération de systèmes SCADA est redondante car un ordinateur central de secours est connecté au niveau du bus informatique et activé en cas de panne de l'ordinateur central principal.

Certains systèmes SCADA de première génération sont des solutions «clé en main» et mis en œuvre sur des mini-ordinateurs comme le PDP-113 de Digital Equipment Corporation (DEC). Ces systèmes peuvent afficher des informations provenant des systèmes de contrôle analogiques existant aux postes de travail des opérateurs individuels, mais ils n'ont généralement pas la fonction d'envoyer des signaux de commande aux stations éloignées. Ils ont aussi des fonctions d'alarme et de journalisation et assurent des tâches de comptabilité horaires et quotidiennes. [17]

b) Deuxième Génération : « Distribuée »

Le traitement est réparti entre plusieurs stations reliées par un réseau local et qui échangent des informations en temps réel. Chaque station est responsable d'une tâche particulière, ce qui rend la taille et le coût de chaque poste inférieur à ceux utilisés dans la première génération.

Les protocoles réseau utilisés sont encore majoritairement propriétaires, ce qui conduit à des problèmes de sécurité importants des systèmes SCADA soumis aux pirates informatiques. Étant donné que les protocoles étaient propriétaires, très peu de gens en dehors des développeurs et des pirates en savent assez pour déterminer comment sécuriser un système SCADA. Les deux parties ayant intérêt à maintenir un certain niveau d'obscurité, la sécurité d'un système SCADA est souvent surestimée, si toutefois elle a été prise en compte. [17]

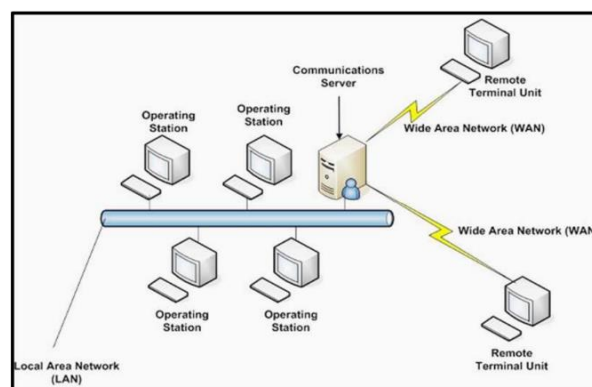


Figure 14 : Architecture distribuée [17]

c) Troisième Génération : « en réseau »

Grâce à l'utilisation de protocoles standards et le fait que de nombreux systèmes SCADA en réseau sont accessibles à partir d'Internet, les systèmes sont potentiellement vulnérables à une attaque à distance. D'autre part, l'utilisation de protocoles standards et de techniques de sécurité

Chapitre 02 : Présentation des systèmes SCADA

signifie que les améliorations des standards de sécurité sont applicables aux systèmes SCADA, en supposant qu'ils reçoivent la maintenance et les mises à jour en temps opportun. [16]

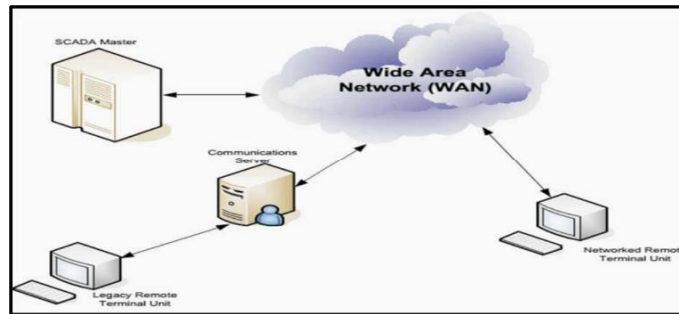


Figure 15 : Architecture en réseau. [17]

d) Quatrième Génération : « Internet des objets »

Avec la disponibilité commerciale du cloud computing, les systèmes SCADA ont de plus en plus adopté les technologies de l'Internet des objets pour réduire considérablement les coûts d'infrastructure et augmenter la facilité d'entretien et d'intégration. En conséquence, les systèmes SCADA peuvent désormais donner l'état presque en temps réel et utiliser les facteurs d'échelle transmis par le cloud computing pour mettre en œuvre des algorithmes de contrôle plus complexes que ce qui peut être fait en pratique avec les automates programmables industriels.

En outre, l'utilisation de protocoles de réseaux ouverts tels que TLS inhérents à l'Internet des objets offre un périmètre de sécurité plus compréhensible et gérable que le mélange hétérogène de protocoles réseau propriétaires typiques de nombreuses implémentations de systèmes SCADA décentralisées précédentes. [16]



Figure 16 : Architecture en internet des objets. [17]

II.4. Système SCADA :

SCADA est un acronyme qui signifie le contrôle et la supervision par acquisition de données (en anglais : Supervisory Control and Data Acquisition) permettant la centralisation des données, la présentation souvent semi-graphique sur des postes de « pilotage », le système SCADA collecte des données de divers appareils d'une quelconque installation, puis transmet ces données

à un ordinateur central, que ce soit proche ou éloigné, qui alors contrôle et supervise l'installation, ce dernier est subordonné par d'autres postes d'opérateurs. [18], [19]

II.4.1. Supervision des procédés :

Le nombre des mesures recueillies sur les processus et stockées a augmenté de façon considérable. En même temps, ces processus ont accru leur complexité et les systèmes de commande ont remplacé les ajustements manuels. Ceci afin de répondre aux demandes de qualité, aux contraintes environnementales, à la réduction des coûts de production et maintenance, tout en garantissant la sécurité des installations ainsi que celle des opérateurs humains. Face à cet incrément d'information, changeant et dynamique, l'opérateur humain a besoin de nouveaux outils qui l'aident dans sa tâche de surveillance du processus, pour en garantir le fonctionnement correct et réagir au cas où des événements anormaux se produisent. [20]

II.4.2. La surveillance :

La surveillance des procédés industriels consiste à générer des alarmes à partir des informations délivrées par des capteurs. Elle recueille les signaux en provenance du procédé et de la commande et reconstitue l'état réel du système commandé. Des seuils sont définis sur des variables clés par des experts du procédé selon des critères de sécurité concernant les hommes, l'installation et son environnement. Cette génération d'alarmes apporte une aide aux OHS (opérateur humain de supervision) dans leur tâche de surveillance afin qu'ils puissent analyser la situation et prendre une décision adaptée (procédure d'arrêt d'urgence, mode dégradé, action corrective). Elle a un rôle passif vis-à-vis du système de commande et du procédé. Cependant, la complexité et la taille de l'installation augmentent rapidement la quantité d'informations à analyser, rendant la surveillance complexe pour les OHS. Il est donc très utile d'adjoindre à la surveillance, une aide à la décision à travers un module de diagnostic. [20]

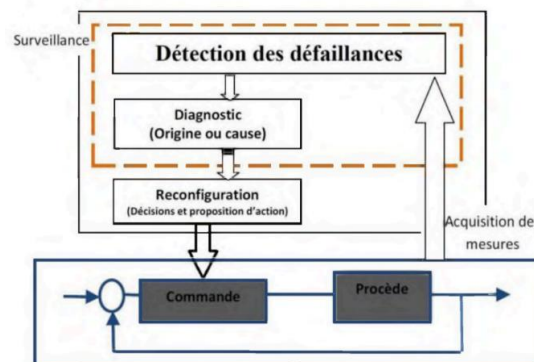


Figure 17 : Schéma générale de la supervision [20]

II.5. Eléments du système SCADA:

Principalement un système SCADA se compose de :

1. Le site central qui est la station de contrôle pour l'ensemble du système, fournissant normalement à l'utilisateur l'interface pour l'affichage des informations et le contrôle des sites éloignés.
2. RTU (Remote Terminal Unit) ou PLC : Il sert à collecter les informations à partir de l'instrumentation du terrain et les transmettre au MTU à travers le système de communication.



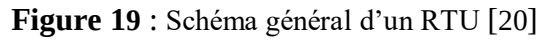
Figure 18 : Remote Terminal Unit (RTU) [20]

3. MTU (Master Terminal Unit) : Il recueille les données provenant des RTU, les rendre accessibles aux opérateurs via l'HMI et transmet les commandes nécessaires des opérateurs vers l'instrumentation de terrain.

4. Système de communication : Moyen de communication entre MTU et les différents RTU, la communication peut être par le biais de l'Internet, réseaux sans fil ou câblé, ou le réseau téléphonique public....etc. [20]

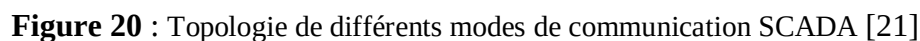
II.5.1 RTU/PLC :

C'est une entité d'acquisition de données et de commande généralement à base de microprocesseur (actuellement on utilise des automates programmables), elle sert à contrôler et superviser localement l'instrumentation d'un site éloigné et transférer les données requises vers la salle de contrôle principal ou parfois à d'autres RTU, il recueille également des informations provenant de l'appareil maître et met en œuvre des processus qui sont dirigés par le maître. Les RTUs sont équipées de voies d'entrée pour les capteurs ou les compteurs, canaux de sortie pour le contrôle, l'indication ou les alarmes et un port de communication, la figure suivante représente un schéma typique d'un RTU. [20]



Il peut être décrit comme une station ayant plusieurs postes opérateur (liés ensemble avec un réseau local) connecté à un système de communication, comme on vient d'aborder l'MTU recueille les données de l'instrumentation du terrain périodiquement à partir des stations RTU et permet la commande à distance par le biais des postes opérateurs, en général l'MTU sert à configurer et programmer les RTU, diagnostiquer la communication et les stations RTU, la figure ci-dessous montre un schéma général d'un MTU. [20]

Différentes architectures de communication pour un système SCADA sont disponibles, la plus simple est la communication point à point où la communication est établie entre deux nœuds du réseau (l'un maître et l'autre esclave), la deuxième architecture est la communication multipoint qui consiste en un maître et plusieurs esclaves, une topologie des différents modes de communication est présentée sur la figure ci-dessous : [21]



II.6. Fonctionnalité d'un système de Supervision :

Un système SCADA comprend 2 sous-ensembles fonctionnels :

➤ **Commande**

Le rôle de la commande est de faire exécuter un ensemble d'opérations (élémentaires ou non suivant le niveau d'abstraction auquel on se place) au procédé en fixant des consignes de fonctionnement en réponse à des ordres d'exécution.

Il s'agit de réaliser généralement une séquence d'opérations constituant une gamme de fabrication dans le but de fabriquer un produit en réponse à une demande d'un client. La commande regroupe toutes les fonctions qui agissent directement sur les actionneurs du procédé qui permettent d'assurer :

- Le fonctionnement en l'absence de défaillance,
- La reprise ou gestion des modes,
- Les traitements d'urgence,
- Une partie de la maintenance corrective.

Les fonctions de commande en marche normale sont :

- L'envoi de consignes vers le procédé dans le but de provoquer son évolution
- L'acquisition de mesures ou de compte-rendu permettant de vérifier que les consignes envoyées vers le procédé produisent exactement les effets escomptés.
- L'acquisition de mesures ou d'informations permettant de reconstituer l'état réel du procédé et/ou du produit.
- L'envoi vers le procédé d'ordres prioritaires permettant de déclencher des procédures de sécurité (arrêts d'urgence par exemple). [16]

➤ **Surveillance**

La partie surveillance d'un superviseur a pour objectifs :

- La détection d'un fonctionnement ne correspondant plus à ce qui est attendu
- La recherche des causes et conséquences d'un fonctionnement non prévu ou non contrôlé.
- L'élaboration de solutions permettant de pallier le fonctionnement non prévu
- La modification des modèles utilisés pendant le fonctionnement prévu pour revenir à ce fonctionnement : changement de la commande, réinitialisations, etc.,
- La collaboration avec les opérateurs humains pour les prises de décision critiques, pour le recueil d'informations non accessibles directement et pour l'explication de la solution curative envisagée ou appliquée. [16]

II.7 Architecture du système SCADA:

Les systèmes SCADA ont fait des progrès substantiels ces dernières années en termes de fonctionnalité, d'évolutivité, de performance et d'ouverture, de sorte qu'ils constituent une alternative au développement interne, même pour les systèmes de contrôle très exigeants et complexes comme ceux des expériences de physique. Les principaux composants d'un système SCADA sont: [22]

- Plusieurs APIs ou unités terminales distantes (RTU).
- Poste principal et ordinateur(s) HMI
- Infrastructure de communication

a) Architecture matérielle

La **figure 21** montre l'architecture matérielle typique d'un système SCADA simple. Ici, le serveur SCADA lit les débits et les niveaux mesurés et envoie les points de consigne aux automates. API1 compare le débit mesuré au point de consigne et contrôle la vitesse de la pompe. API2 compare le niveau mesuré au point de consigne et contrôle le débit à travers la vanne.

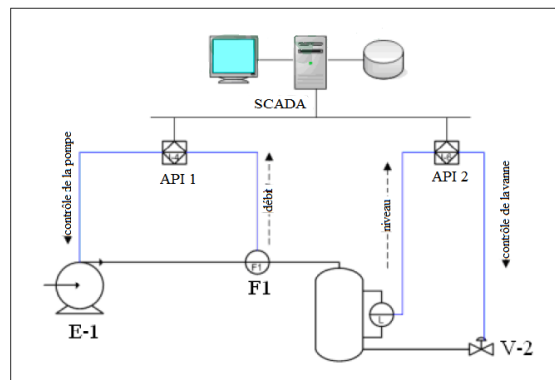


Figure 21 : Illustration de l'architecture d'un système SCADA simple.

Le RTU se connecte à l'équipement physique et lit les données d'état telles que l'état ouvert/fermé à partir d'un interrupteur ou d'une vanne, lit les mesures telles que la pression, le débit, la tension ou le courant. En envoyant des signaux à l'équipement, le RTU peut contrôler l'équipement, comme ouvrir ou fermer un interrupteur ou une soupape, ou régler la vitesse d'une pompe. Le RTU peut lire des données d'état numériques ou des données de mesure analogiques, et envoyer des commandes numériques ou des points de consigne analogiques.

Le terme "Master Station" fait référence aux serveurs et logiciels responsables pour communiquer avec les équipements de terrain (RTU, API, etc.), puis au logiciel HMI

s'exécutant sur les postes de travail, des salles de contrôle, ou autre part. Dans les petits systèmes SCADA, le poste maître peut être composé d'un seul PC. Dans les grands systèmes SCADA, le poste maître peut inclure plusieurs serveurs et des applications logicielles distribuées. Le système SCADA présente généralement les informations au personnel d'exploitation sous forme de synoptique. Ce signifie que l'opérateur peut voir une représentation de l'installation contrôlée. Par exemple, une image d'une pompe reliée à un tuyau peut montrer à l'opérateur que la pompe est en marche et la quantité de liquide qu'elle contient pompant à travers le tuyau pour le moment. L'opérateur peut alors basculer la pompe éteinte.

b) Communications

Les systèmes SCADA ont traditionnellement utilisé des combinaisons de RF (radio fréquence) et les connexions série ou modem pour répondre aux exigences de communication. Ethernet et IP (Internet Protocole) sont aussi fréquemment utilisés dans les grands sites comme les chemins de fer et les centrales électriques [22].

II.8 Avantages du SCADA :

Parmi les avantages du SCADA, on retrouve :

- Le suivi de près du système ; voir l'état du fonctionnement de procédé dans des écrans même s'il se situe dans une zone lointaine.
- Le contrôle et l'assurance que toutes les performances désirées sont atteintes de visualiser les performances désirées du système à chaque instant, et s'il y aurait une perte de performance, une alarme se déclenchera d'une manière automatique pour prévenir l'opérateur.
- La génération d'une alarme lorsqu'une faute se produit et visualise même la position où se situent la faute et l'élément défectueux, ce qui facilite la tâche du diagnostic et de l'intervention de l'opérateur.
- La disponibilité de plusieurs informations sur le système aide l'opérateur à prendre la bonne décision, et à ne pas se tromper dans son intervention.
- Réduction des tâches du personnel en les regroupant dans une salle de commande.
- Elimination ou réduction du nombre de visite aux sites éloignés ; avec une interface graphique, on peut suivre l'état de l'installation à chaque instant, ainsi on n'aura pas besoin de faire des visites de contrôle [16].

II.10. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons découvert le système SCADA Il s'agit d'un système généralement constitué de deux composantes principales : une partie matérielle, qui inclut les contrôleurs et les réseaux de communication, et une partie logicielle chargée de la gestion des entrées et des sorties ainsi que de l'interface homme-machine. Grâce à cette structure, l'opérateur a la possibilité de surveiller et de piloter les installations à distance depuis un centre de supervision, à l'aide de terminaux distants appelés RTU.

Chapitre 03 :
Modélisation du système PV et présentation des
outils de simulation

III.1. Introduction :

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, nous présentons la modélisation théorique du générateur photovoltaïque (GPV), qui constitue le cœur de la mini-station photovoltaïque étudiée dans ce travail.

L'objectif principal est de comprendre le comportement électrique du système photovoltaïque à travers des modèles mathématiques simplifiés permettant de décrire la relation entre le courant et la tension, ainsi que les facteurs influençant ses performances.

Dans ce chapitre introduit également les outils de simulation utilisés dans la partie pratique, à savoir NI Multisim pour la modélisation électrique et NI LabVIEW pour la supervision et l'acquisition des données.

III.2. Générateur photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque, qui représente l'outil de conversion de l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en courant continu. Il est composé d'un ensemble de panneaux. Le panneau est constitué de plusieurs modules (structurés en série, ou en parallèle ou hybride). Le module contient des rangées de cellules (structurées en série ou en parallèle ou hybride) et généralement des cellules à base de silicium.

Les modules PV sont habituellement branchés en série parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules. [23]

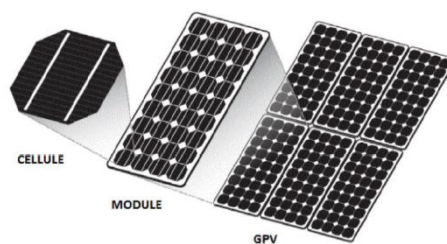


Figure 22 : Composants d'un GPV [24]

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules connectées en série et/ou en parallèle. [25]

- Connexions en série : Augmente la tension totale du module.

$$V_{\text{module}} = N_s \cdot V_{\text{cellule}}$$

Où N_s est le nombre de cellules en série.

- Connexions en parallèle : Augmentent le courant total du module.

$$I_{\text{module}} = N_p \cdot I_{\text{cellule}}$$

Où N_p est le nombre de cellules en parallèle.

III.3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque:

Un générateur photovoltaïque convertit la lumière du soleil en énergie électrique à travers le matériau semi-conducteur de la cellule PV, avec un effet néfaste de la température. Sur le marché, il existe plusieurs technologies de cellules photovoltaïques dont les caractéristiques fournies par les constructeurs sont différentes. La technologie du Silicium cristallin est actuellement la plus utilisée, car elle représente le meilleur compromis technico-économique. La taille du générateur PV est directement proportionnelle à la surface, qui est l'association de plusieurs cellules PV. La **figure 23** représente le circuit électrique équivalent du générateur photovoltaïque déterminé par le modèle mathématique de l'équation (1). Afin de faciliter l'utilisation du modèle et par conséquent la simulation du comportement du générateur photovoltaïque, la résistance shunt R_{sh} du circuit équivalent du générateur PV est considérée très grande [26].

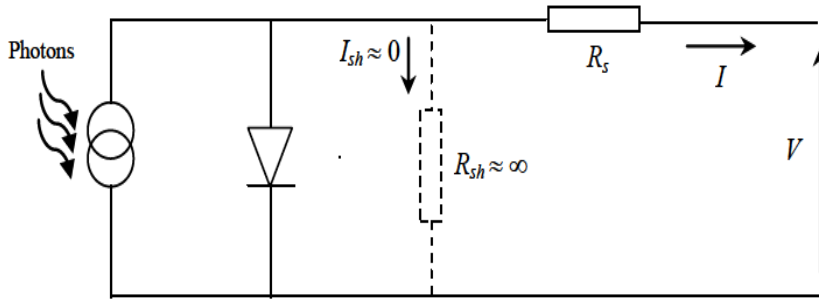


Figure 23: Circuit électrique équivalent du générateur PV

$$I = I_{sc} \left[1 - \exp \left(\frac{V - V_{oc} + R_s \cdot I}{N_s \cdot m \cdot k \cdot \frac{T_c}{e}} \right) \right] \quad (1)$$

Où I est le courant généré dû à la génération de porteurs par l'illumination, V est la tension aux bornes du générateur, R_s la résistance série, N_s le nombre de cellules en série, m le facteur d'idéalité, k la constante de Boltzmann, T_c la température absolue des cellules, e la valeur de la charge de l'électron, I_{sc} et V_{oc} sont respectivement le courant de court circuit et la tension à circuit ouvert. L'équation (1) est un modèle implicite à quatre paramètres, donc sa résolution nécessite des méthodes itératives. Le choix de ce modèle est justifié par la détermination des quatre paramètres

(I_{sc} , V_{oc} , R_s et T_c) en fonction de l'éclairement, la température ambiante et à travers les paramètres aux conditions standards (1000 W/m^2 , 25°C) fournies par le constructeur, tels que, la tension et le courant au point de puissance maximale (V_{max0} et I_{max0}), le courant de court-circuit (I_{sc0}) et la tension à circuit ouvert (V_{oc0}). Cette dernière est sensible à la température de la cellule. Ce modèle suppose que la température de la cellule est une fonction linéaire de la température ambiante T_a et de l'éclairement G_a [26].

III.3.1 Les modèles mathématiques :

Il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque [27], parmi ces modèles nous avons :

a) Le modèle explicite :

C'est le modèle le plus simple, vu le nombre de paramètres qui nécessite la résolution d'un tel modèle :

- Calcule du courant I :

$$\text{Nous avons } I = I_{cc} n_p \left[1 - C_1 \left(\exp \left(\frac{n_s V}{C_2 \cdot V_{oc}} \right) - 1 \right) \right]$$

Où C_1 et C_2 sont des paramètres qui peuvent être calculés respectivement.

$$C_2 = \frac{\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} - 1}{\ln \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}} \right)}$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{cc}} \right) \exp \left(- \frac{V_{mpp}}{C_2 \cdot V_{oc}} \right)$$

- Calcul de la puissance P :

$$P = I \cdot V$$

b) Le modèle à une diode :

Les modèles des modules PV sont habituellement tirés des circuits électriques équivalents. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes à des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante) [28].

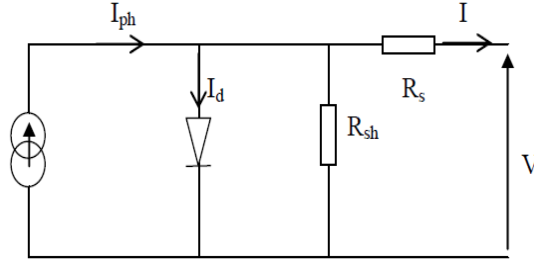


Figure 24 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (une diode).

A partir du schéma (24), nous définissons le modèle une diode du générateur [29] :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{Rsh}$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2(E_s - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref}) \right)$$

- E_{sref} , T_{jref} : représentent l'éclairement et la température sous conditions STC.
- T_j : température de jonction.
- P_1 , P_2 , P_3 : paramètres constants.

La température de jonction T_j de la cellule est donnée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left(\frac{Noct - 20}{800} \right)$$

Avec NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell temperature) et T_a est la température ambiante.

$$I_d = I_{0d} \left[\exp \left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I) \right) - 1 \right]$$

Avec :

- I_{0d} : courant de saturation de la diode (A).
- q : Charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).
- K : constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)).
- A : coefficient d'idéalité de la cellule.
- n_s : nombre de cellules connectées en série.

$$I_{0d} = P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{E_g}{k \cdot T_j} \right)$$

- E_g : énergie de gap.
- P_4 : paramètre constant.

$$I_{Rsh} = \frac{V}{R_{sh}}$$

Ainsi l'équation globale modélisant le générateur PV est la suivante :

$$I = P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right) - P_4 \cdot T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{E_s}{k \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I)\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}}$$

c) Modèle à deux diodes :

Actuellement le modèle le plus proche à une cellule photovoltaïque est celui à deux diodes (double exponentiel). Dans ce dernier, deux diodes sont utilisées pour reproduire les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires en surface du matériau et dans son volume [30].

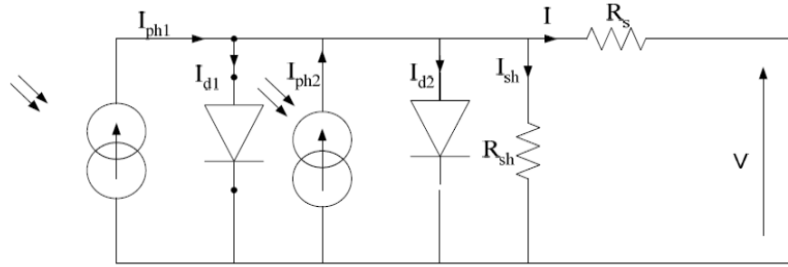


Figure 25 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (deux diodes) [29].

$$I = (I_{pv1} + I_{pv2}) - (I_{d1} + I_{d2}) - I_{sh}$$

$$I_{d1} = I_{s1} e^{\left(\frac{V+IR_s}{AK'}\right)}$$

$$I_{d2} = I_{s2} e^{\left(\frac{V+IR_s}{2AK'}\right)}$$

$$K' = KT_j/q$$

$$I_{pv} = I_{pv1} + I_{pv2}$$

$$I_{s1} = P_4 T_j^3 e^{\left(\frac{E_s}{KT_j}\right)}$$

$$I_{s2} = P_5 T_j^3 e^{\left(\frac{E_s}{2KT_j}\right)}$$

$$I_{pv} = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})]$$

$$I = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{sref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - P_4 T_j^3 e^{\left(\frac{E_s}{KT_j}\right)} \left[\exp\left(\frac{q}{k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I)\right) - 1 \right] -$$

$$P_5 T_j^3 e^{\left(\frac{E_s}{2KT_j}\right)} \left[\exp\left(\frac{q}{2 \cdot k \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} (V + R_s I)\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}}$$

III.4. Association des modules photovoltaïques :

Les modules photovoltaïques peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il est important de prendre quelques précautions suite à l'existence de cellules moins efficaces ou à la l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (ombrage, poussière, etc.) et qui peuvent endommager les cellules de façon permanente [31].

III.4.1 Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [32].

$$V_{ocNs} = N_s \cdot V_{oc}$$

$$I_{scNs} = I_{sc}$$

V_{ocNs} : la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série

I_{scNs} : le courant de court-circuit de N_s cellules en série

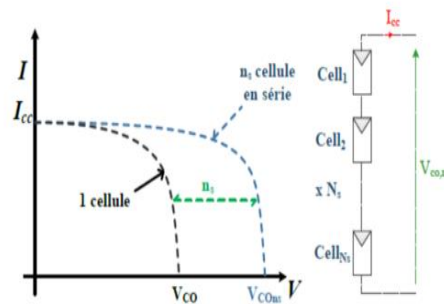


Figure 26: Caractéristique résultante du regroupement de N_s cellules en série

La tension d'utilisation des modules en série diminue légèrement, si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées. Notons que, pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. De ce fait, pour une impédance nulle (état de court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse importante et la puissance qu'elle devra dispersera trop grande. En effet, ceci entraîne un suréchauffement de la cellule (hot spot), qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter cette tension inverse maximale qui peut affecter le bon fonctionnement des cellules solaires en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module (**voir figure 27**).

Ainsi, la diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. Il en résulte, qu'en court-circuit, la puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à

l'ordre du watt, ce qui évite sa destruction. En fonctionnement normal, la diode parallèle est inopérante et ne diminue donc pas le rendement des modules [32].

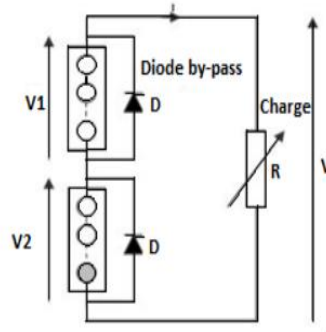


Figure 27: Modules en série avec diodes by-pass

III.4.2 Association en parallèle :

En insérant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module, tandis que l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [32].

$$V_{ocNs} = N_s \cdot V_{oc}$$

$$I_{scNs} = I_{sc}$$

V_{ocNs} : la somme des tensions de circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

I_{scNs} : la somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle

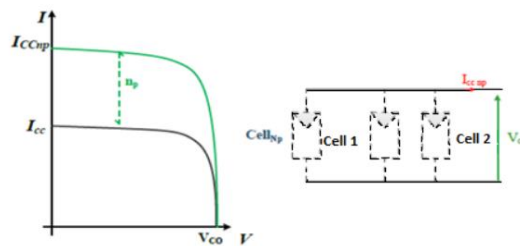


Figure 28 : Caractéristique résultante du regroupement de N_p cellules en parallèle

Le courant d'utilisation total des modules sera plus faible si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées. Remarquons que, pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Ce ci peut entraîner une

dissipation de puissance importante, qui peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi, pour le cas le plus critique où la charge est nulle et le circuit est ouvert, le courant des branches des modules performants va se dissiper dans la branche la moins performante. Bien que la cellule puisse dissiper un courant important sans être altérée, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Cette dernière, empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. En effet, cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche. Notons que, cette diode est traversée, en fonctionnement normal, par le courant de la branche, ce qui introduit une perte de puissance permanente [32].

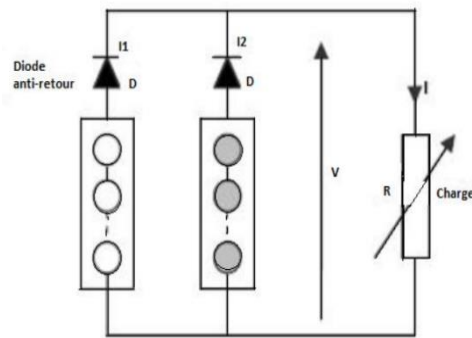


Figure 29 : Modules en parallèle avec diodes anti-retour.

III.4.3 Association série-parallèle :

Généralement, on utilise un montage série-parallèle qui nous permet de régler à la fois la tension et le courant selon les caractéristiques de la charge. Les cellules photovoltaïques sont associées entre elles en série, et les modules sont associés en parallèle [32].

$$P_{\text{générateur}} = N_{ms} \cdot N_{BP} \cdot P_{\text{module}}$$

$$V_{\text{générateur}} = N_{ms} \cdot V_{\text{module}}$$

$$I_{\text{générateur}} = N_{BP} \cdot I_{\text{module}}$$

$$R_{s \text{ générateur}} = R_{s \text{ module}} \cdot \frac{N_{ms}}{N_{BP}}$$

On utilise alors les diodes by-pass pour éviter que les cellules les moins performantes deviennent consommatrices, et les diodes anti-retour pour éviter le retour du courant des autres modules lorsqu'un module est mal ensoleillé ou ombragé [32].

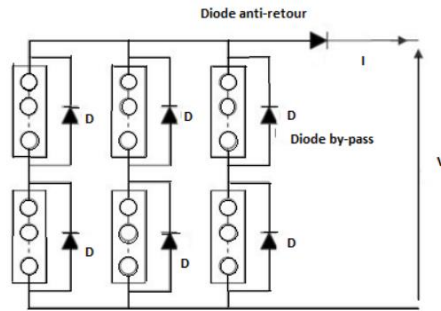


Figure 30 : Montage série-parallèle de modules photovoltaïques.

III.5 Caractéristiques I–V et P–V :

Les performances d'un système photovoltaïque sont généralement représentées par :

a) Caractéristique courant-tension I(V) :

Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante [33].

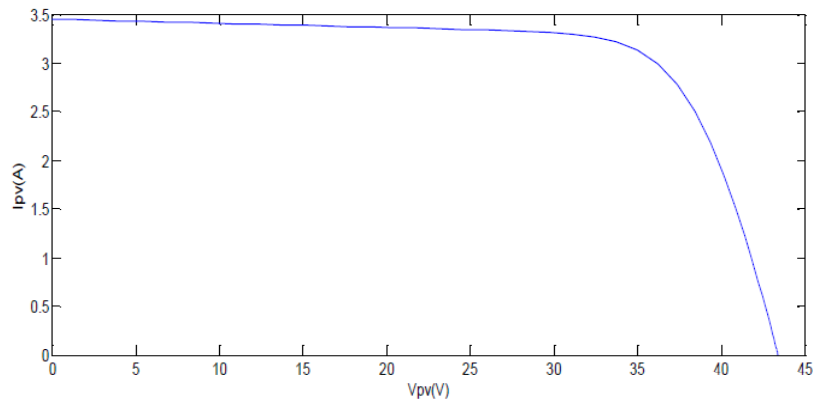


Figure 31 : Caractéristique I(V)

b) Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes.

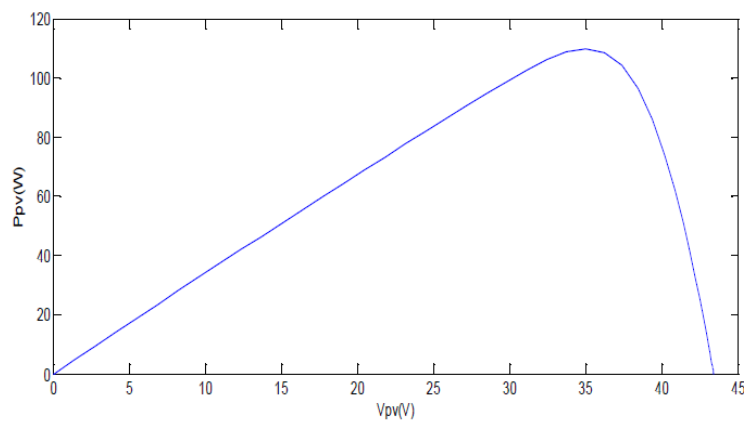


Figure 32 : Caractéristiques $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire

III.6 Protections classiques d'un Générateur photovoltaïque :

Pour augmenter la durée de vie d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin de pallier les défaillances liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Dès lors, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations :

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur (fonctionnement d'une batterie durant la nuit).
- Les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. En effet, la mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance [34].

III.7. Facteurs influençant les performances du GPV :

Les performances d'un générateur photovoltaïque dépendent principalement de :

- **L'irradiation solaire** : c'est le facteur le plus déterminant, car la puissance produite augmente avec l'intensité du rayonnement solaire.
- **La température** : une élévation de la température entraîne généralement une diminution du rendement des modules photovoltaïques.

- **Les caractéristiques du module PV** : telles que le type de cellule, le rendement et les paramètres électriques.
- **L'orientation et l'inclinaison** : elles influencent la quantité d'énergie solaire reçue par le module.
- **Les pertes du système** : dues aux câbles, à l'onduleur et à d'autres composants.

III.8 Présentation des outils de simulation :

III.8.1 NI Multisim comme outil de simulation électrique :

NI Multisim est un environnement de simulation électronique développé pour la conception, l'analyse et la validation des circuits analogiques et numériques. Il permet aux ingénieurs et aux étudiants de créer des schémas électroniques interactifs, de simuler leur comportement en temps réel et d'effectuer des mesures virtuelles à l'aide d'instruments intégrés. Grâce à son interface intuitive et à sa base de composants riche, Multisim facilite la compréhension des phénomènes électriques et réduit le besoin de prototypage physique.

➤ Définition de MULTISIM

Le logiciel NI Multisim, est un outil puissant utilisé pour simuler et prototyper les conceptions de circuits électroniques d'un large éventail d'applications didactiques et professionnelles. [35].



Figure 33 : NI Multisim 14.1

III.8.2 Labview comme outil de supervision (SCADA) :

➤ Définition de LABVIEW :

Labview (Laboratory of Virtual Instruments Engineering Workbench) ou Atelier d'ingénierie du laboratoire d'instruments virtuels est un environnement de développement spécialisé en informatique industrielle et scientifique. Sa particularité est qu'il s'appuie

sur le langage G, créé par National Instruments, qui est entièrement graphique. Il permet de créer des logiciels complexes tout en facilitant la programmation et donc de diminuer les délais de développement. Grâce à ses bibliothèques de fonctions dédiées à l'acquisition de données, l'instrumentation, à l'analyse mathématique des mesures, mais également grâce à la création rapide d'interfaces graphiques de qualité et le codage simplifié, l'ingénieur a plus de temps pour se concentrer sur les fonctions métiers de l'instrumentation et du traitement des mesures [36].



Figure 34 : Logo du logiciel Labview

III.9 Communication entre les deux logiciels :

La communication entre LabVIEW et Multisim repose sur un échange de données en temps réel permettant de relier la simulation électronique à la supervision et au traitement des signaux. Cette communication est généralement assurée par les outils fournis par National Instruments, notamment le module Multisim–LabVIEW Co-Simulation Interface. Elle permet à Multisim de générer des signaux simulés à partir d'un circuit électronique, tandis que LabVIEW récupère ces signaux pour les traiter, les analyser et les afficher sous forme graphique.

Le principe de fonctionnement repose sur une architecture client–serveur où Multisim joue le rôle de simulateur du circuit, et LabVIEW agit comme environnement de supervision. Les données sont échangées via des variables partagées ou des liens de communication internes (ActiveX ou API NI), garantissant une synchronisation entre les deux logiciels.

Cette communication permet ainsi :

- La simulation en temps réel des circuits électroniques
- L'analyse des signaux dans LabVIEW
- La validation des systèmes avant leur réalisation physique

III.10. Intérêt de la co-simulation :

La co-simulation entre **LabVIEW** et **Multisim** présente plusieurs avantages dans la conception et l'analyse des systèmes électroniques.

Elle permet de combiner la simulation des circuits électroniques dans Multisim avec la supervision, l'acquisition et le traitement des données dans LabVIEW. Ainsi, le système peut être étudié de manière virtuelle avant sa réalisation physique.

- Les principaux intérêts sont :
 - Réduction du temps de conception et de test
 - Validation des circuits avant implémentation matérielle
 - Analyse des signaux en temps réel
 - Amélioration de la précision des résultats
 - Possibilité de tester différentes configurations sans matériel réel
 - Meilleure compréhension du comportement du système.

III.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation théorique du générateur photovoltaïque ainsi que les outils de simulation utilisés dans ce travail, notamment NI Multisim et NI LabVIEW.

Cette étude constitue une base essentielle pour la réalisation de la mini-station photovoltaïque qui sera développée et simulée dans le chapitre suivant.

Chapitre 04

Modélisation et simulation d'une Mini-station PV sous Multisim et LabVIEW

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons la partie pratique de notre projet de conception et de mise en œuvre d'un système SCADA pour une mini-station photovoltaïque. Nous décrivons les différentes étapes de réalisation, depuis la modélisation du système sous Multisim jusqu'au développement de l'interface de supervision sous LabVIEW. Ce chapitre met également en évidence l'architecture proposée, le fonctionnement du système ainsi que les résultats obtenus à travers les simulations réalisées.

IV.2. Cahier des charges de la mini-station photovoltaïque :

Le cahier des charges dans ce projet de simulation définit les objectifs de la mini-station photovoltaïque ainsi que les paramètres à étudier. Il précise les grandeurs électriques à surveiller, notamment la tension, le courant et la puissance, ainsi que les outils utilisés pour la modélisation et la supervision. Multisim est utilisé pour la simulation du système photovoltaïque, tandis que LabVIEW permet la réalisation de l'interface de supervision de type SCADA. Ce cahier des charges sert de base pour organiser et structurer l'ensemble de la phase de simulation.

IV.3. Modélisation du système sous Multisim :

L'interface du logiciel NI Multisim est considérée comme un environnement intégré pour la conception et la simulation des systèmes électriques et électroniques, permettant de réaliser des circuits électroniques virtuels fonctionnant d'une manière très proche de la réalité. Lors de la conception d'une mini-station photovoltaïque et de l'exécution de la simulation, le logiciel calcule les tensions et les courants en se basant sur des modèles mathématiques réels, ce qui rend les résultats obtenus proches de l'application pratique.

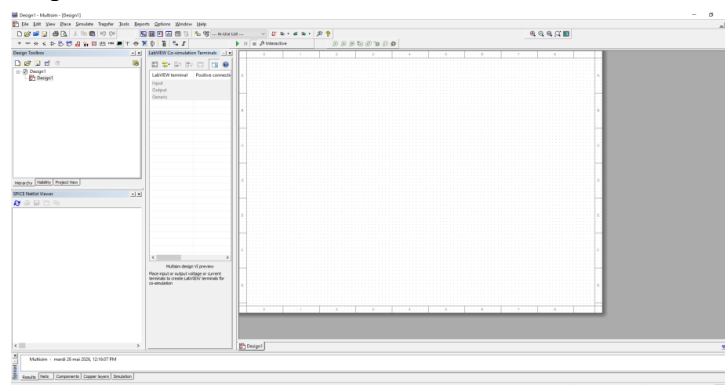


Figure 35 : Environnement de travail de Multisim (Interface vide).

- Dans ce qui suit, nous présentons les étapes successives de la modélisation réalisée sous NI Multisim.

IV.3.1. Etape (01) prise en main de l'environnement NI Multisim :

- L'interface contient une barre de menus (Menu Bar) et des barres d'outils (Toolbars) permettant de créer un projet, d'ajouter des composants électroniques et de lancer la simulation. La recherche des composants dans le logiciel se fait via le menu Place → Component, où apparaît d'abord la fenêtre All Groups qui regroupe les catégories principales des composants électroniques. Ensuite, on choisit un groupe comme Basic, qui contient des éléments fondamentaux tels que la résistance (Resistor), le condensateur (Capacitor) et la diode (Diode), etc....

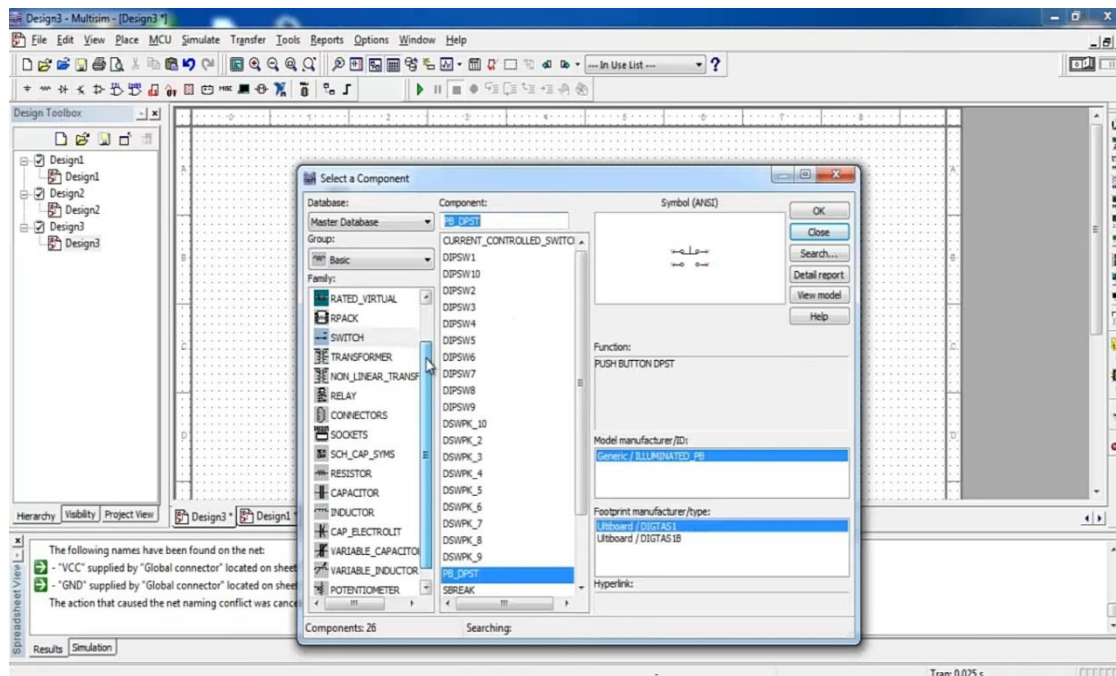


Figure 36: Accès aux composants via le menu Place → Component (All Groups).

- Dans la barre située sur le côté droit de l'interface, on trouve un ensemble d'outils et d'instruments virtuels tels que l'oscilloscope (Oscilloscope), qui permet d'afficher les signaux et les courbes électriques, ainsi que d'autres composants utilisés pour analyser et surveiller le comportement du circuit pendant la simulation.

L'interface comprend également des instruments de mesure virtuels comme le multimètre (Multimeter), utilisé pour mesurer la tension et le courant, ainsi que le wattmètre (Wattmètre) pour mesurer la puissance électrique.

Ces instruments fonctionnent de manière similaire aux appareils réels utilisés en laboratoire, ce qui permet une analyse précise des performances du système électrique.

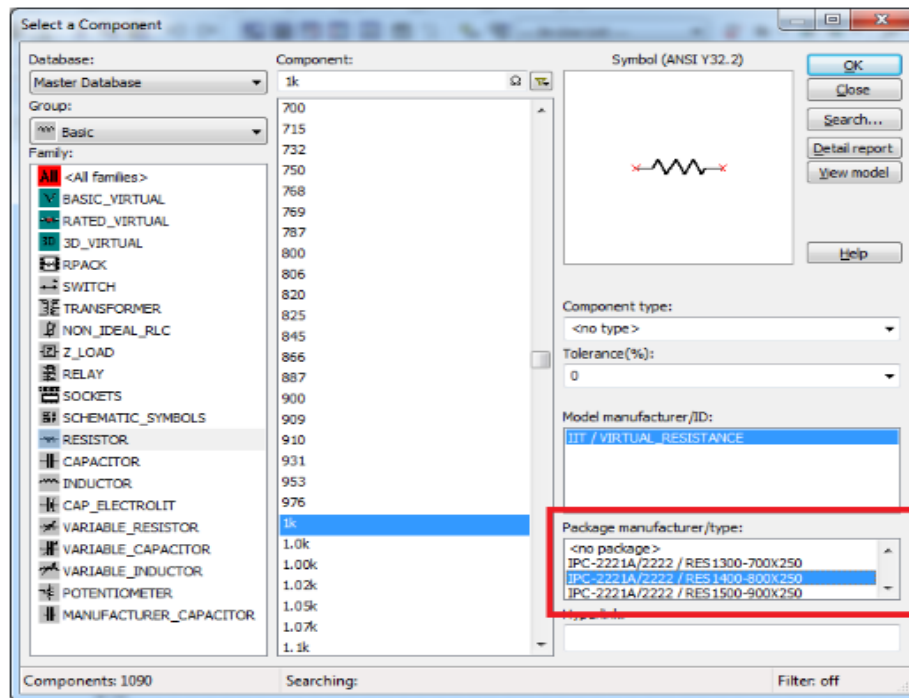


Figure 37 : Sélection du groupe Basic et affichage des familles de composants dans Multisim.

Lorsque nous avons cliqué sur Place → Component, puis sélectionné All Groups, nous avons choisi le groupe Basic. Ensuite, plusieurs familles de composants sont apparues dans ce groupe, telles que les résistances (Resistor), les condensateurs (Capacitor), etc. Enfin, le logiciel NI Multisim peut être connecté à LabVIEW afin de surveiller le système et d'afficher les mesures et les courbes en temps réel dans un système de supervision et de contrôle de type SCADA.

IV.3.2 Etape (02) modélisation équivalente du panneau solaire sous NI Multisim :

- Dans le cadre du travail pratique, il convient de noter que le logiciel Multisim ne dispose pas d'un composant dédié représentant directement un panneau solaire. Pour cette raison, ce dernier a été modélisé à l'aide d'un circuit équivalent.

Le panneau photovoltaïque est ainsi représenté par une source de courant continu, une diode et une résistance. La source de courant modélise le courant généré par l'irradiation solaire, tandis que la diode permet de reproduire le comportement non linéaire de la jonction semi-conductrice de la cellule photovoltaïque. La résistance, quant à elle, représente les pertes internes du système dues aux matériaux et aux connexions électriques.

Ce modèle équivalent permet de reproduire de manière satisfaisante le comportement réel d'un panneau solaire dans un environnement de simulation et d'analyser le fonctionnement du système photovoltaïque avec une précision acceptable.

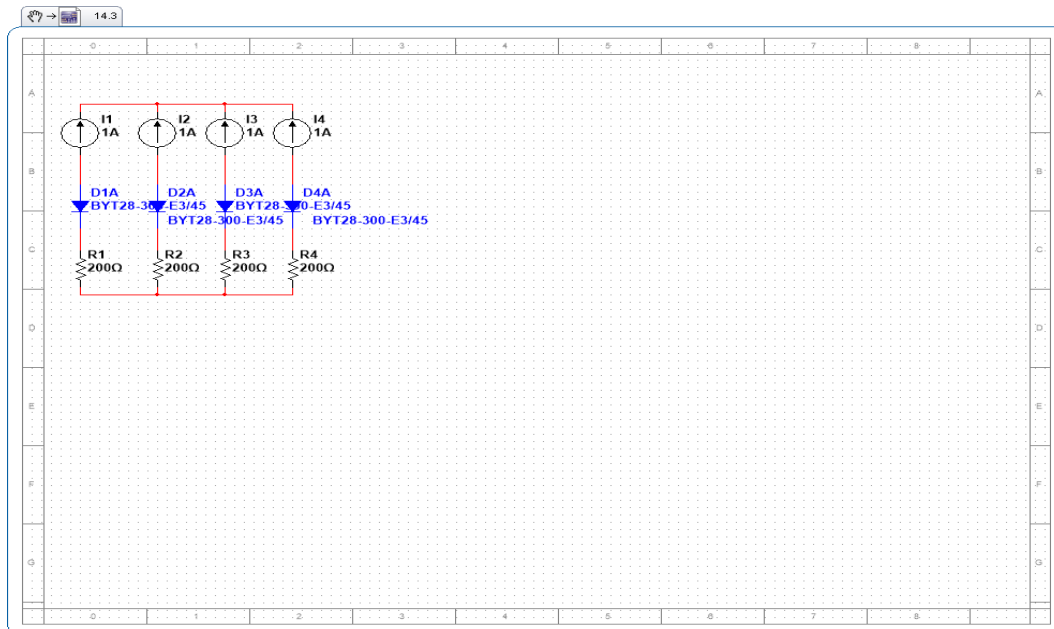


Figure 38 : Schéma de simulation d'un panneau photovoltaïque sous Multisim.

IV.3.3. Etape (03) intégration du hacheur Buck dans le système photovoltaïque :

Dans le cadre du travail pratique de notre mémoire consacré à la modélisation d'une mini-station photovoltaïque sous le logiciel Multisim, un hacheur Buck a été intégré au circuit équivalent du panneau solaire. Ce convertisseur DC-DC constitue un élément essentiel dans les systèmes photovoltaïques, car il permet d'abaisser et de réguler la tension délivrée par la source avant son acheminement vers la charge ou les autres étages de conversion.

Le hacheur Buck est réalisé à l'aide de composants électroniques réalistes, notamment un MOSFET IRF540N utilisé comme interrupteur de commande, une inductance de 330 μ H assurant le stockage d'énergie et le lissage du courant, ainsi qu'une diode MBR20100 garantissant la continuité du courant lors des phases de blocage tout en protégeant le circuit. Un condensateur de 100 μ F est également utilisé afin de réduire les ondulations de tension et d'améliorer la stabilité du signal.

La masse (Ground) est ajoutée afin de constituer la référence électrique commune du circuit et de permettre la fermeture du système, garantissant ainsi des mesures stables des grandeurs électriques.

Par ailleurs, un condensateur de sortie de 220 μF est intégré afin d'améliorer le filtrage et de réduire les variations rapides du courant, ce qui permet d'obtenir un signal plus lisse et proche d'un courant continu idéal.

De manière générale, l'intégration du hacheur Buck ne se limite pas à la réduction de la tension, mais contribue également à l'amélioration de la qualité des signaux électriques issus du modèle photovoltaïque, en rapprochant le comportement simulé de celui d'un système réel.

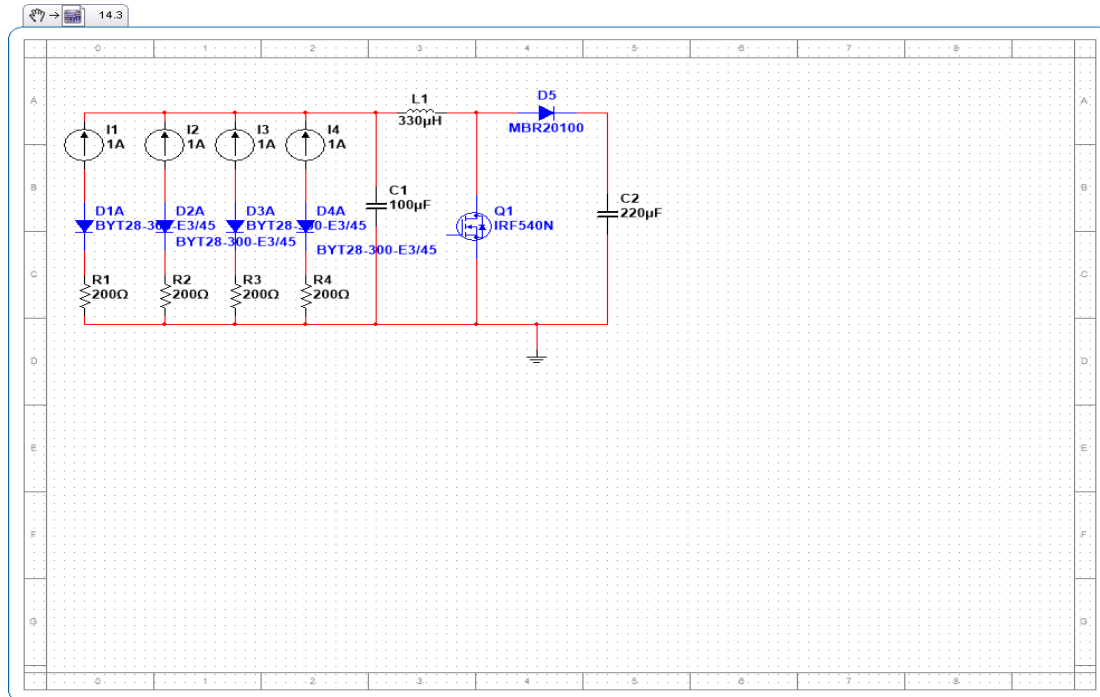


Figure 39 : Schéma du panneau photovoltaïque avec hacheur Buck intégré (Multisim).

IV.3.4. Etape (04) conception d'un système photovoltaïque complet avec supervision LabVIEW :

Ce modèle a été développé sous le logiciel NI Multisim afin de représenter une mini-station photovoltaïque complète comprenant la production, la conversion et la supervision de l'énergie électrique. Il intègre également un système de mesure et d'échange de données vers une interface de supervision réalisée sous LabVIEW.

Le générateur photovoltaïque est modélisé par des sources de courant (I1 à I4) associées à des diodes et des résistances équivalentes. Le courant de ces sources a été

réglé de 1 A à 5 A afin de reproduire des conditions d'ensoleillement réalistes et d'augmenter la puissance disponible.

Le convertisseur Buck, composé du transistor MOSFET IRF540N, de la diode MBR20100, de l'inductance L1 et du condensateur C1, constitue l'élément central de la mini-station photovoltaïque. Il assure la conversion de la tension d'entrée variable issue des panneaux solaires en une tension de sortie régulée et stable aux bornes de la charge R7, garantissant ainsi une alimentation continue et stable indépendamment des variations des conditions d'ensoleillement. La diode MBR20100 joue également un rôle important dans le convertisseur Buck, en assurant la continuité du courant dans l'inductance lorsque le transistor est bloqué (état OFF), tout en protégeant le circuit et en améliorant le rendement grâce à sa faible chute de tension.

Les éléments de ce convertisseur ont été optimisés : la valeur de l'inductance a été réduite de 330 mH à 100 mH afin d'améliorer la réponse dynamique du système, car une valeur élevée rendait la réponse trop lente face aux variations de courant. La valeur de 100 mH permet ainsi un bon compromis entre le lissage des ondulations de courant et la rapidité de réponse, selon la relation :

$$\Delta I = (V_{in} - V_{out}) \times T_{on} / L$$

Le condensateur C1 a été réglé à 100 μ F afin d'assurer un filtrage efficace des ondulations de tension. Le condensateur C2 (100 μ F) est un élément indépendant du convertisseur Buck, utilisé pour améliorer le filtrage du courant de sortie. Deux résistances variables ont été intégrées.

La résistance R7 représente la charge électrique du système, recevant l'énergie régulée issue du convertisseur Buck. Sa variation permet d'étudier différents régimes de fonctionnement, car toute modification de sa valeur influence directement le courant de sortie selon la loi d'Ohm :

$$I = V / R$$

La résistance R5, quant à elle, permet d'ajuster le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque afin d'analyser le comportement du système autour du point de puissance maximale (MPP).

Le générateur de signal XFG1 est utilisé pour générer le signal de commande nécessaire au fonctionnement du système pendant la simulation et pour analyser la

réponse dynamique du circuit dans l'environnement Multisim. Les oscilloscopes XSC1 et XSC2 permettent respectivement de visualiser les signaux de tension et de courant, facilitant ainsi l'analyse des formes d'ondes et la vérification du comportement du système.

Le système de commande repose sur la technique de modulation de largeur d'impulsion (PWM), appliquée au transistor MOSFET IRF540N, où le convertisseur Buck est contrôlé par le rapport cyclique (Duty Cycle) D. Les grandeurs électriques sont mesurées à l'aide de blocs de mesure et affichées via des instruments virtuels, puis envoyées vers LabVIEW à travers les sorties IO1 à IO5, comprenant la tension d'entrée, le courant d'entrée, la tension de sortie, le courant de sortie et le signal de commande.

Enfin, les mesures électriques à différents nœuds du circuit sont affichées en temps réel sous forme d'indicateurs, fournissant des informations sur la tension crête à crête V(p-p), la tension efficace V(rms) et le courant efficace I(rms).

Ainsi, ce modèle permet d'analyser le transfert d'énergie et d'évaluer les performances du système dans des conditions proches d'une installation photovoltaïque réelle.

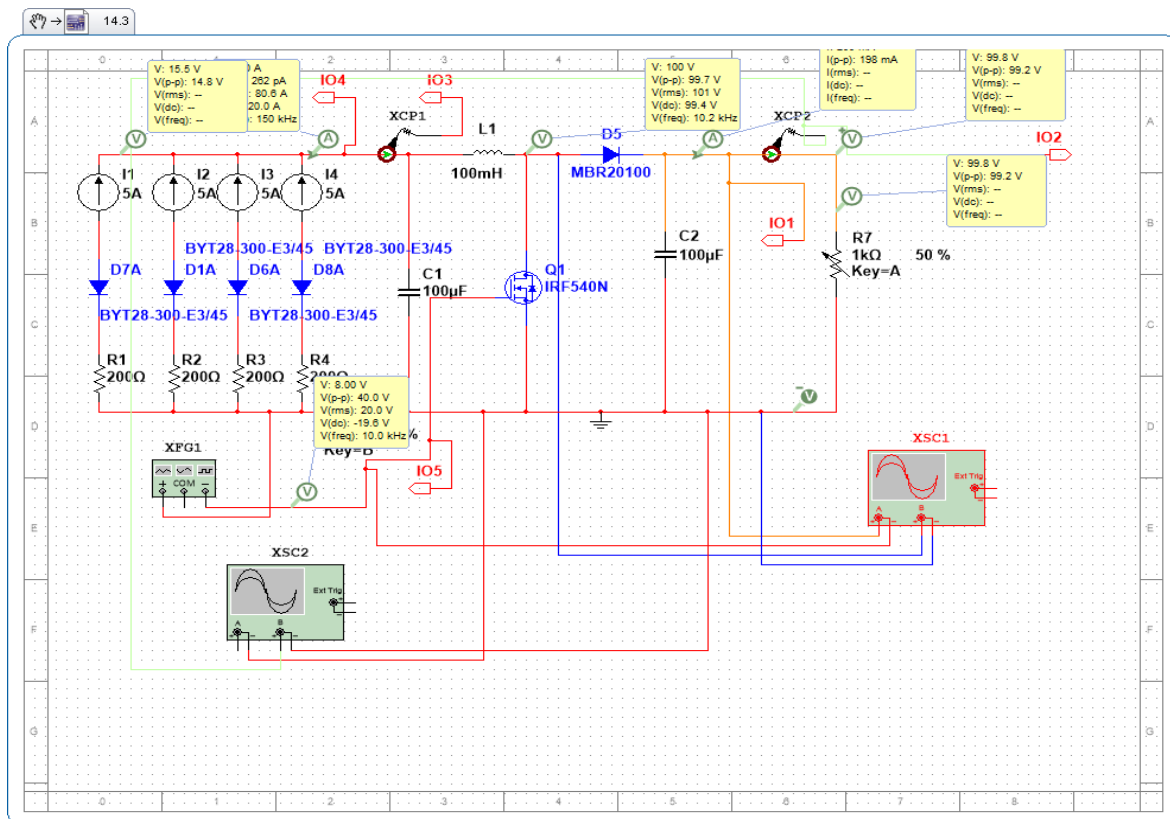


Figure 40: Schéma global de la mini-station photovoltaïque simulée sous Multisim avec instruments de mesure et interface LabVIEW.

IV.3.5. Etape (05) influence du duty cycle sur les performances du convertisseur Buck :

Le rapport cyclique (Duty Cycle) constitue un paramètre fondamental dans les systèmes de conversion d'énergie, notamment dans les convertisseurs Buck utilisés en applications photovoltaïques. Il représente le rapport entre le temps de conduction du transistor (état ON) et la période totale du signal PWM, et permet de contrôler directement la quantité d'énergie transférée vers la charge.

Dans la mini-station photovoltaïque simulée sous NI Multisim, un signal PWM de fréquence 10 kHz est utilisé pour piloter le MOSFET IRF540N, avec une amplitude constante. Ainsi, les variations observées dans la simulation concernent uniquement la largeur des impulsions (Duty Cycle), sans modification de la fréquence ni de l'amplitude du signal.

Le Duty Cycle constitue le facteur principal déterminant la quantité d'énergie transférée à travers le convertisseur Buck. Il agit directement sur le temps de conduction et de blocage du MOSFET IRF540N, influençant ainsi la valeur moyenne de la tension et du courant en sortie. Il impacte également les processus de charge et de décharge des éléments de filtrage, notamment l'inductance et le condensateur C2, ce qui en fait un paramètre essentiel dans la définition de la forme et de la stabilité du signal de sortie.

Les résultats de simulation montrent qu'une augmentation du Duty Cycle entraîne une augmentation de la tension efficace (V_{rms}), en raison de l'allongement du temps de conduction du transistor, ce qui permet le transfert d'une quantité d'énergie plus importante vers la charge. À l'inverse, une diminution du Duty Cycle réduit ce temps de conduction et entraîne une baisse de la tension efficace.

Il a été observé qu'à un Duty Cycle de 25 %, la surface sous la courbe de tension diminue de manière significative, traduisant une réduction du temps de conduction au cours de chaque cycle. En revanche, à 75 %, cette surface augmente, en raison de l'allongement de la durée de conduction. Cette variation dépend donc directement du temps de conduction et non de la valeur maximale de la tension.

La diminution de V_{rms} s'explique par le fait que cette grandeur dépend de la répartition temporelle de la tension et non uniquement de son amplitude. Ainsi, lorsque le Duty Cycle diminue, la tension élevée est présente pendant une durée plus courte dans chaque cycle, ce qui réduit sa contribution dans le calcul de la valeur efficace. À l'inverse, une augmentation du Duty Cycle accroît cette durée de présence, entraînant une augmentation de V_{rms} .

Dans le modèle de simulation, les signaux sont observés à l'aide des instruments virtuels disponibles sous Multisim : l'oscilloscope XCS1 permet d'afficher la courbe de tension de sortie, tandis que l'oscilloscope XCS2 est utilisé pour l'analyse du courant. Le générateur de fonctions XFG1 assure la génération du signal PWM commandant le MOSFET IRF540N, et constitue le moyen principal de réglage du Duty Cycle, permettant ainsi de contrôler la quantité d'énergie transférée de la source vers la charge.

Enfin, la relation détaillée entre le signal PWM et le Duty Cycle sera approfondie ultérieurement, étant donné que ce signal n'est pas directement visualisé dans l'interface de Multisim, mais est mieux exploité via l'interface LabVIEW du système de supervision.

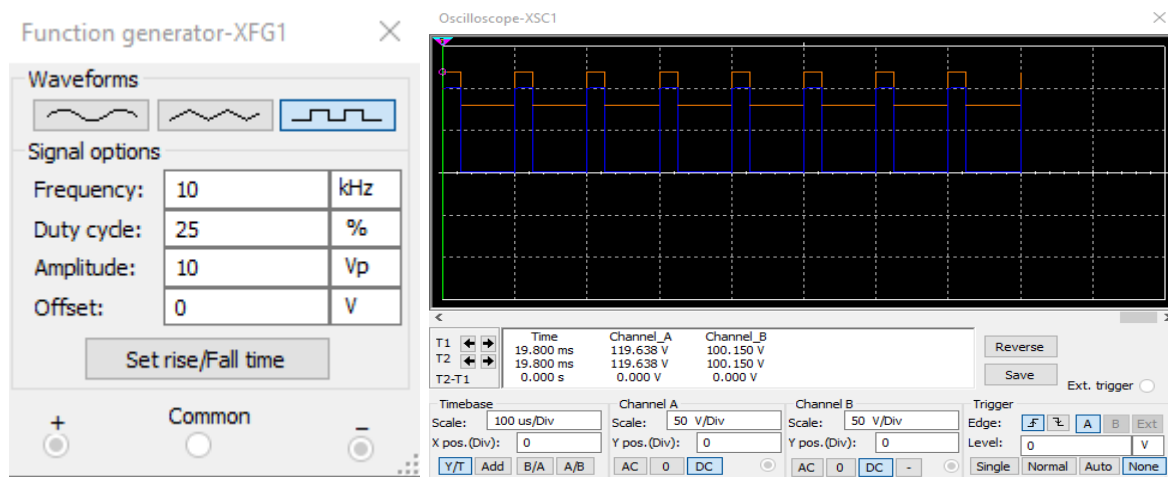


Figure 41 : Réglage du rapport cyclique (duty cycle) à 25 % du générateur XFG1 et analyse de la forme d'onde de tension sous Multisim.

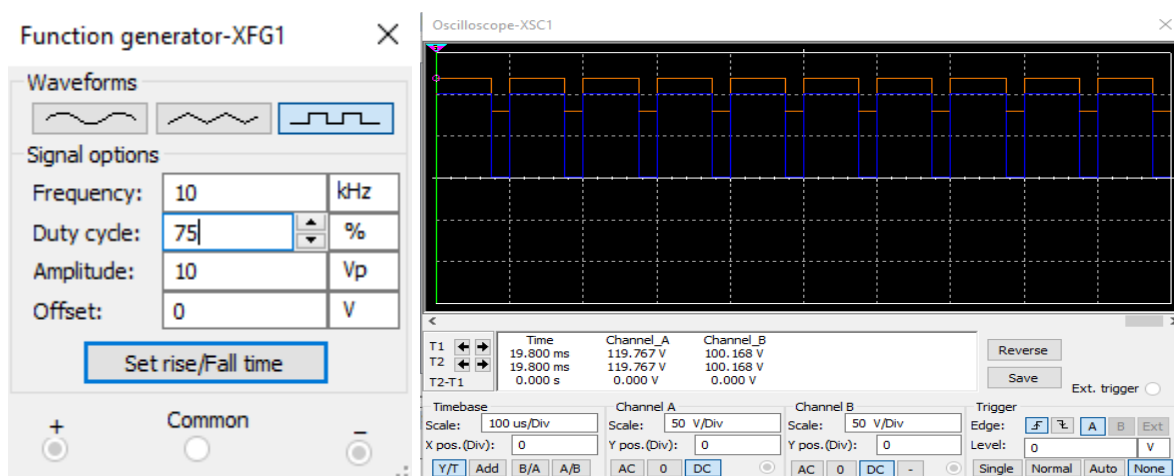


Figure 42 : Fixation du rapport cyclique à 75 % dans le générateur XFG1 et visualisation de la courbe de tension correspondante sous le logiciel Multisim.

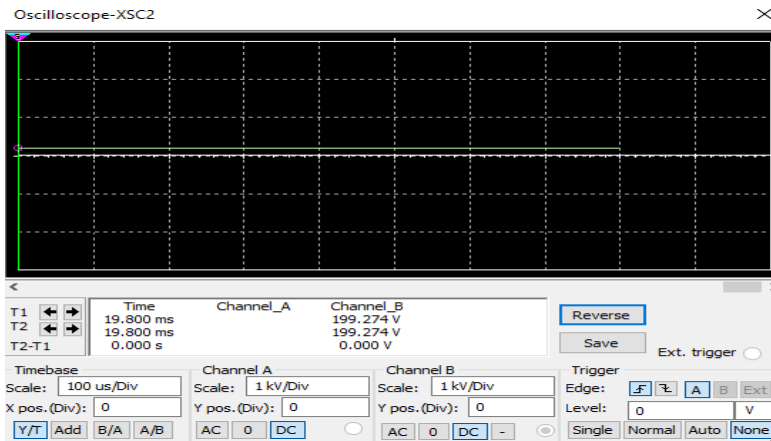


Figure 43 : Stabilité de la courbe du courant pour des rapports cycliques de 25 % et 75%

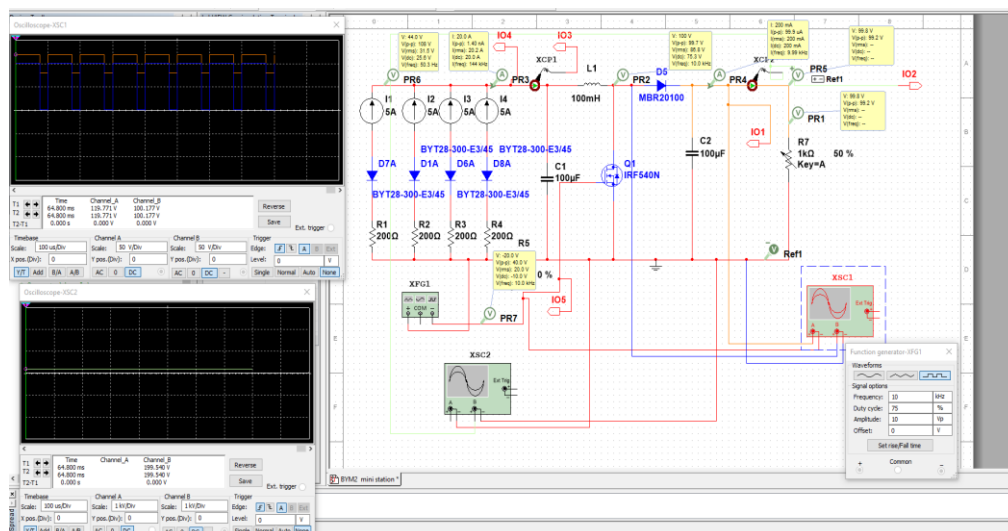


Figure 44 : Modélisation d'une mini-station photovoltaïque sous l'interface Multisim avec un rapport cyclique (Duty Cycle) de 75 %

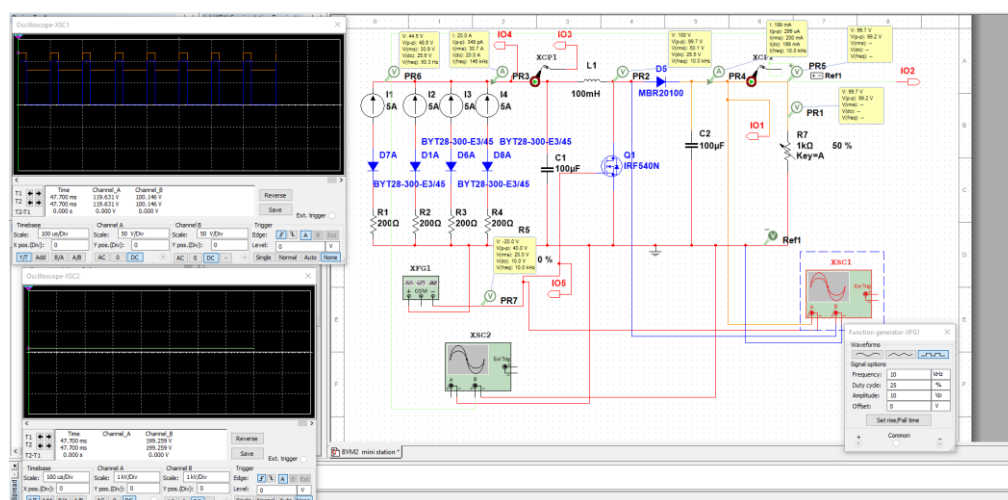


Figure 45 : Modélisation d'une mini-station photovoltaïque sous l'interface Multisim avec un rapport cyclique (Duty Cycle) de 25 %

IV.3.6. Etape (6) mise en œuvre d'une architecture SCADA basée sur la co-simulation Multisim–LabVIEW :

Les systèmes de supervision, de contrôle et d'acquisition de données (SCADA) constituent une pierre angulaire dans la gestion des réseaux électriques modernes et des centrales d'énergie renouvelable. Le logiciel LabVIEW offre un environnement de programmation graphique idéal pour la mise en œuvre de tels systèmes. Le diagramme bloc présenté dans la figure représente l'architecture logicielle chargée du traitement des signaux électriques (tension, courant, puissance) et du calcul de leurs valeurs efficaces et moyennes, en vue de leur affichage sur l'interface de supervision.

Premièrement : Composants logiciels et matériels et analyse des signaux
Ce système repose sur une boucle principale de simulation appelée Control & Simulation Loop, qui constitue l'environnement d'exécution de tous les blocs programmés et garantit le traitement des données en temps réel. Les composants électriques et logiciels de cette boucle peuvent être structurés comme suit :

- Bloc d'acquisition des données (Data Acquisition / SubVI) : Sur la partie gauche se trouve un bloc principal bleu nommé « BPM2 mini station ».

Ce composant est une interface de type SubVI permettant l'importation des signaux électriques bruts simulés ou mesurés. Ce bloc dispose de plusieurs sorties de signaux électriques connectées aux canaux IO du système Multisim–LabVIEW comme suit :

IO1 : tension de sortie

IO2 : courant de sortie

IO3 : courant d'entrée

IO4 : tension d'entrée

IO5 : signal PWM généré par le générateur XFG1 dans Multisim, utilisé dans LabVIEW uniquement à des fins de surveillance et d'analyse dans l'interface de supervision.

Ces canaux constituent le lien principal entre le modèle de simulation sous Multisim et l'environnement de traitement et d'affichage sous LabVIEW.

Étape de traitement des signaux et calcul de la puissance électrique.
Les signaux issus de la mini-station sont soumis à des opérations mathématiques et logiques programmées.

Le calcul de la puissance électrique est effectué en multipliant le courant de sortie (IO2) par la tension de sortie (IO1), puis en divisant le résultat par 1000 afin de convertir la puissance de watts (W) en kilowatts (kW).

La valeur obtenue est affichée sur l'indicateur « La puissance de sortie (kW) ».

Des filtres et blocs de conditionnement du signal sont également utilisés sur les lignes de tension et de courant afin de réduire le bruit et les ondulations générées par les opérations de commutation (switching).

- Bloc d'analyse statistique et calcul des valeurs efficaces (RMS & Mean)
Dans la partie inférieure droite, un bloc de traitement avancé des signaux est utilisé : Amplitude and Level Measurements permet l'analyse de l'amplitude des signaux de tension ou de courant provenant des canaux IO.

Le calcul de la valeur moyenne (Mean DC) permet d'extraire la composante continue du signal, tandis que le calcul de la valeur efficace (RMS) permet de déterminer la valeur énergétique équivalente des signaux variables et ondulés issus des commutations.

- Stockage des données et tracé des courbes (Data Logging & Graphing)
En bas du schéma, les blocs de type « output array » et « output array 2 » permettent de regrouper les valeurs des signaux en fonction du temps et de les transformer en tableaux de données. Ces tableaux alimentent le graphe « Simulated Data » (Waveform Graph), permettant de tracer l'évolution de la tension et du courant dans le temps.

Deuxièmement : indicateurs physiques affichés les blocs associés aux indicateurs représentent l'interface finale du système et comprennent :

IO1–tension de sortie (V)

IO2 – courant de sortie (A)

IO3 – courant d'entrée (A)

IO4 – tension d'entrée (V)

Le signal PWM associé à IO5 est également exploité dans LabVIEW pour l'analyse du rapport cyclique (Duty Cycle) et l'étude de son impact sur le comportement du système photovoltaïque.

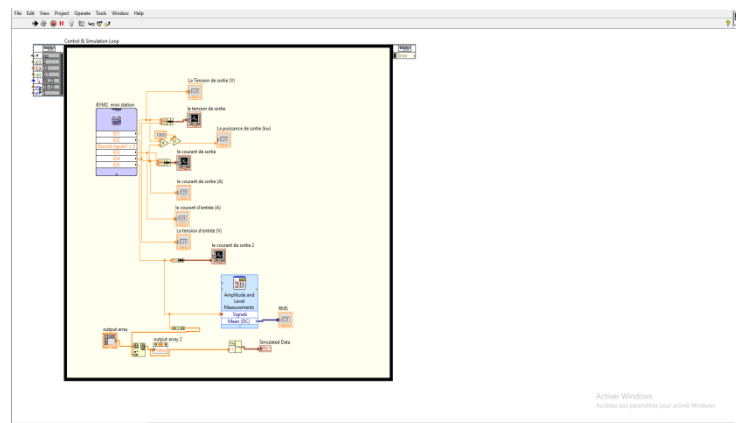


Figure 46 : Schéma de co-simulation du système photovoltaïque sous Multisim et LabVIEW.

IV.3.7. Etape (7) analyse des résultats et validation du système photovoltaïque :

Cette étude applicative porte sur la conception et la modélisation d'une mini-station photovoltaïque à travers l'environnement de co-simulation Multisim–LabVIEW, dans le cadre de la réalisation d'un système de supervision et de contrôle SCADA garantissant la stabilité de l'énergie délivrée à la charge malgré les variations des conditions d'ensoleillement. L'objectif principal est de vérifier l'efficacité du système de commande dans le maintien de la stabilité des grandeurs de sortie, à travers l'analyse des résultats de la co-simulation entre les deux environnements.

L'échange des données entre les deux environnements est assuré par les canaux IO1 à IO5. Les canaux IO3 et IO4 transmettent respectivement le courant et la tension d'entrée issus du générateur photovoltaïque, tandis que IO1 et IO2 transportent la tension et le courant de sortie vers LabVIEW pour leur traitement et leur supervision. Le canal IO5 assure la transmission du signal PWM généré par le générateur XFG1 dans Multisim vers LabVIEW, afin de permettre la surveillance et la visualisation de ce signal en temps réel dans l'interface de supervision, sans que cela ne représente une commande ou un retour de contrôle, son rôle se limitant à la supervision visuelle qui permet à l'ingénieur de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne à chaque instant.

Le signal PWM est une onde rectangulaire de fréquence fixe de 10 kHz, dont la forme est gouvernée par un seul paramètre :

Le rapport cyclique D , défini comme le rapport entre le temps de conduction et la période totale selon :

$$D = T_{on} / (T_{on} + T_{o\text{,mp}})$$

Et ce rapport régit directement la tension de sortie du convertisseur Buck selon la relation :

$$V_{out} = D \times V_{in}$$

Dans ce système, le rapport cyclique est réglé manuellement à $D = 99\%$ dans le générateur XFG1, ce qui signifie que le transistor IRF540N reste en état de conduction durant 99 % de chaque période, et que la durée de blocage $T_{o\text{,mp}}$ ne dépasse pas 1 % seulement. La forme du signal PWM est directement influencée par la valeur du rapport cyclique :

Lorsque D diminue, les intervalles de blocage entre les créneaux rectangulaires s'élargissent et les sommets de conduction se rétrécissent ;

A l'inverse, lorsque D est élevé comme ici à 99 %, les créneaux se rapprochent jusqu'à quasiment se fusionner et les intervalles de blocage se réduisent au minimum. L'affichage de ce signal dans l'interface SCADA permet à l'opérateur de vérifier visuellement et instantanément que le convertisseur fonctionne avec le rapport cyclique correct et à la fréquence réglée, et de détecter toute anomalie ou déviation dans le signal avant qu'elle n'affecte les grandeurs de sortie.

Le traitement du signal PWM est réalisé à travers le calcul de sa valeur efficace RMS selon la relation :

$$V_{rms} = V_{amplitude} \times \sqrt{D}.$$

En appliquant cette formule au signal rectangulaire d'amplitude 20 V et de rapport cyclique 99 %, on obtient :

$$I_{rms} = 20 \times \sqrt{0,99} = 20 \times 0,99499 \approx 19,999 \text{ A},$$

Ce qui explique avec précision mathématique la valeur 19,999 affichée dans l'indicateur du triangle vert de l'interface LabVIEW. La valeur efficace constitue le critère électrique correct pour mesurer les signaux pulsés non sinusoïdaux, car elle fournit l'équivalent énergétique réel du signal selon : $P = V_{rms} \times I_{rms}$,

Et joue dans le système SCADA un rôle central consistant à surveiller la puissance active réelle délivrée à la charge en temps réel, à détecter précocement toute déviation dans le rapport cyclique ou toute dégradation des performances du convertisseur, sans aucun calcul manuel de la part de l'opérateur.

- Les résultats obtenus montrent qu'une variation importante de la tension d'entrée, comprise entre 11,0983 V et 80,1238 V, n'affecte que très faiblement les grandeurs de sortie. En effet, la tension de sortie reste proche de 100 V avec des valeurs de 99,8025 V et 99,7855 V respectivement, le courant de sortie demeure voisin de 200 A avec des valeurs de 199,605 A et 199,571 A respectivement, et la puissance délivrée se maintient autour de 19,92 kW avec des valeurs de 19,9211 kW et 19,9143 kW respectivement. Cette stabilité remarquable est due à deux facteurs essentiels et complémentaires.

- ✓ Le premier facteur : Et le plus déterminant, est le rapport cyclique fixe de 99 %. Il constitue la cause principale et la plus profonde de la stabilité du système, car il agit directement et depuis la source pour compenser toute variation de la tension d'entrée avant qu'elle n'atteigne la charge. Il convient de préciser que les sources de courant I1, I2, I3 et I4 dans Multisim représentent des modèles de simulation des

cellules photovoltaïques, et fonctionnent en mode source de courant idéale imposant un courant d'entrée constant indépendamment de la tension, ce qui signifie que la tension d'entrée V_{in} n'est pas une tension imposée mais une tension de nœud déterminée par la charge dynamique. Comme le courant d'entrée est toujours constant, l'énergie injectée dans le convertisseur reste régulière, et le rapport cyclique de 99 % proche de l'unité maintient le transistor IRF540N en conduction quasi-permanente, transformant ainsi le convertisseur en pratique en un conducteur direct d'énergie avec un minimum de pertes, garantissant un transfert maximal et continu de cette énergie vers la charge quelle que soit la variation de la tension d'entrée. Et puisque la tension de sortie est stable et la charge R_7 est fixe, la stabilité du courant de sortie en découle automatiquement selon la loi d'Ohm :

$I_{\text{sortie}} = V_{\text{sortie}} / R_7$, et par conséquent la stabilité de la puissance selon :

$$P = V_{\text{sortie}} \times I_{\text{sortie}} \approx 19,92 \text{ kW.}$$

- ✓ Le second facteur est le rôle complémentaire et intégré des éléments du convertisseur Buck, composé du transistor IRF540N, de la diode MBR20100, de l'inductance L_1 de 100 mH et du condensateur C_1 de 100 μF . Le transistor IRF540N fonctionne comme un interrupteur électronique contrôlant le flux d'énergie de la source vers la charge en fonction du signal PWM à 10 kHz. Durant la phase de blocage du MOSFET, la diode MBR20100 assure le chemin du courant de roue libre, permettant au courant stocké dans l'inductance L_1 de continuer à circuler vers la charge sans interruption. Quant à l'inductance L_1 dont la valeur de 100 mH est élevée, elle s'oppose à toute variation brusque du courant selon la loi de Lenz :

$V_L = L \times dI / dt$, en produisant une force électromotrice inverse qui amortit toute oscillation et maintient le courant de sortie quasi-continu à environ 200 A, ce qui explique directement la stabilité du courant de sortie malgré la nature pulsée du signal PWM. Le condensateur C_1 de 100 μF complète ce rôle en stockant l'énergie durant les phases de conduction et en la restituant durant les phases de blocage, maintenant ainsi la stabilité de la tension de sortie et protégeant le circuit contre les transitoires électriques causés par la commutation du MOSFET. Quant au condensateur C_2 de 100 μF , il s'agit d'un élément indépendant du convertisseur Buck qui ajoute une couche supplémentaire de

filtrage du courant de sortie, garantissant une alimentation stable et continue de la charge R7.

Ces résultats confirment collectivement que la stratégie adoptée, reposant sur un rapport cyclique élevé et fixe de 99 % combiné au filtrage efficace du convertisseur Buck, s'inscrit dans une logique de suivi du point de puissance maximale MPPT, garantissant une extraction optimale de l'énergie photovoltaïque. La preuve en est que les deux puissances obtenues dans les deux cas étudiés, 19,9143 kW et 19,9211 kW, présentent un écart ne dépassant pas 0,034 %, ce qui confirme la robustesse du système proposé et sa capacité à garantir une alimentation électrique stable et continue dans différentes conditions d'ensoleillement.

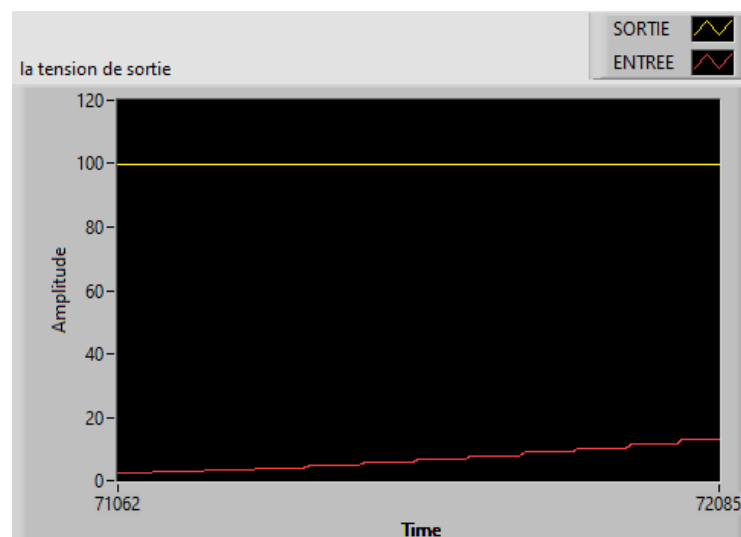


Figure 47 : Représentation des tensions d'entrée (rouge) et de sortie (jaune).

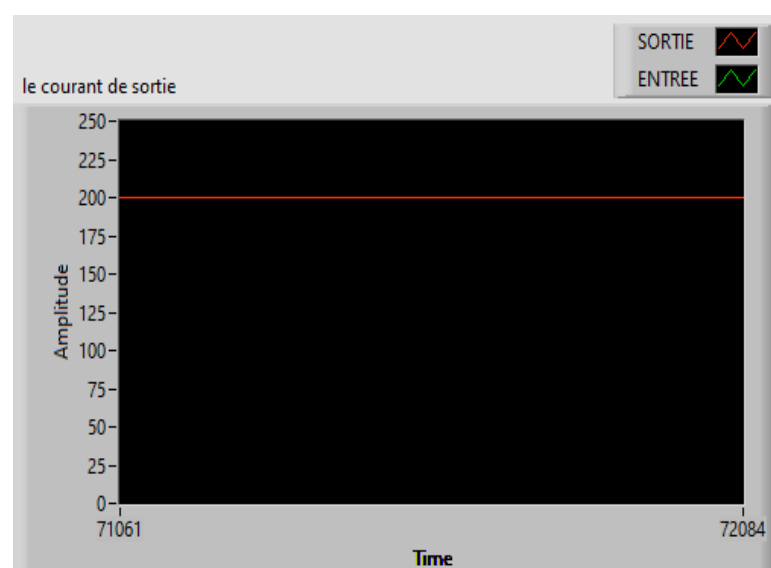


Figure 48 : Représentation du courant de sortie du système.

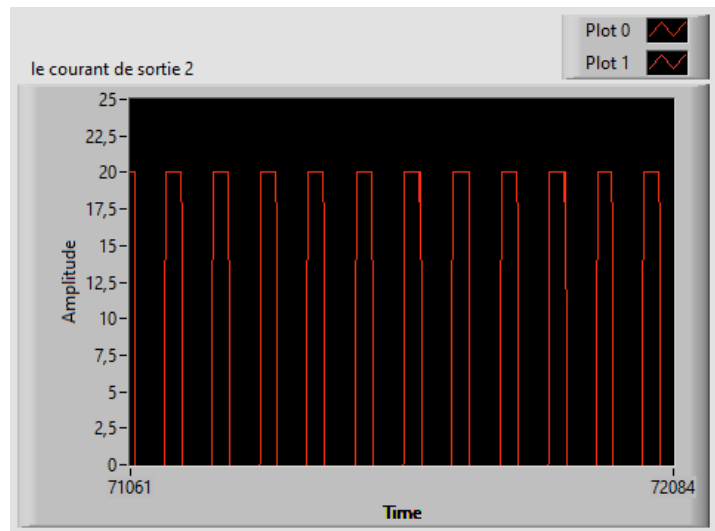


Figure 49 : Signal PWM généré.

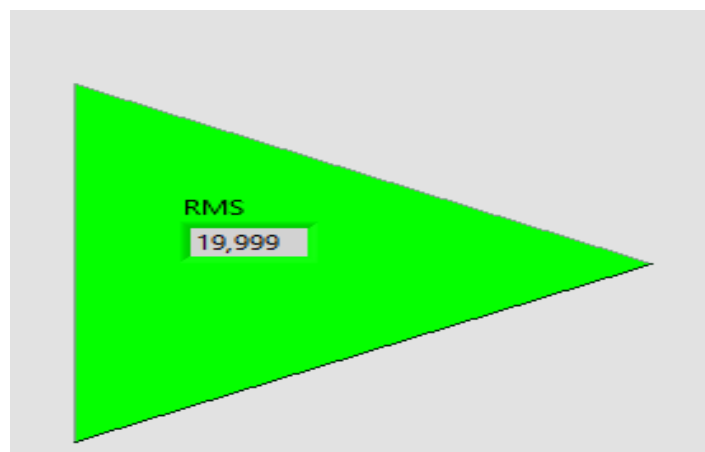


Figure 50 : Représentation de la valeur RMS.

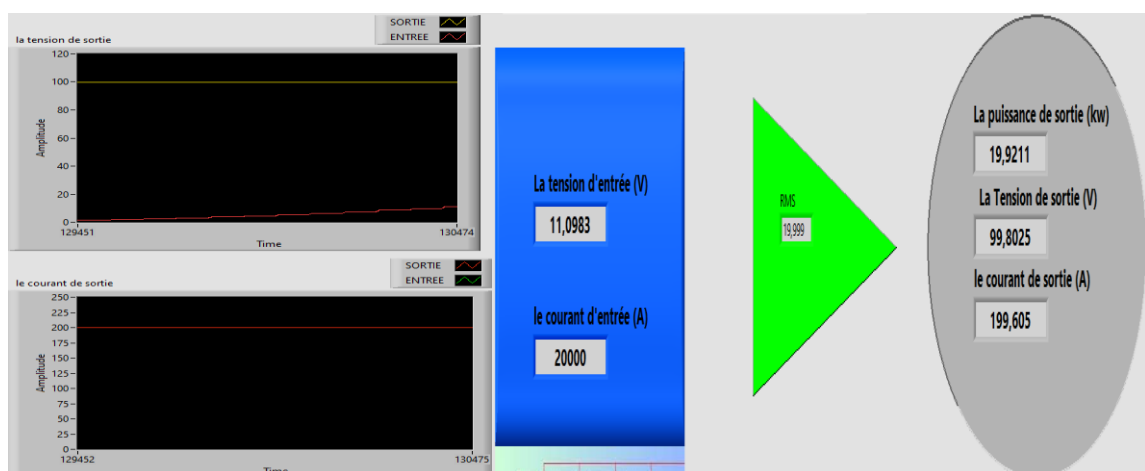


Figure 51 : Diminution de la tension d'entrée avec maintien des tensions et du courant de sortie constants.

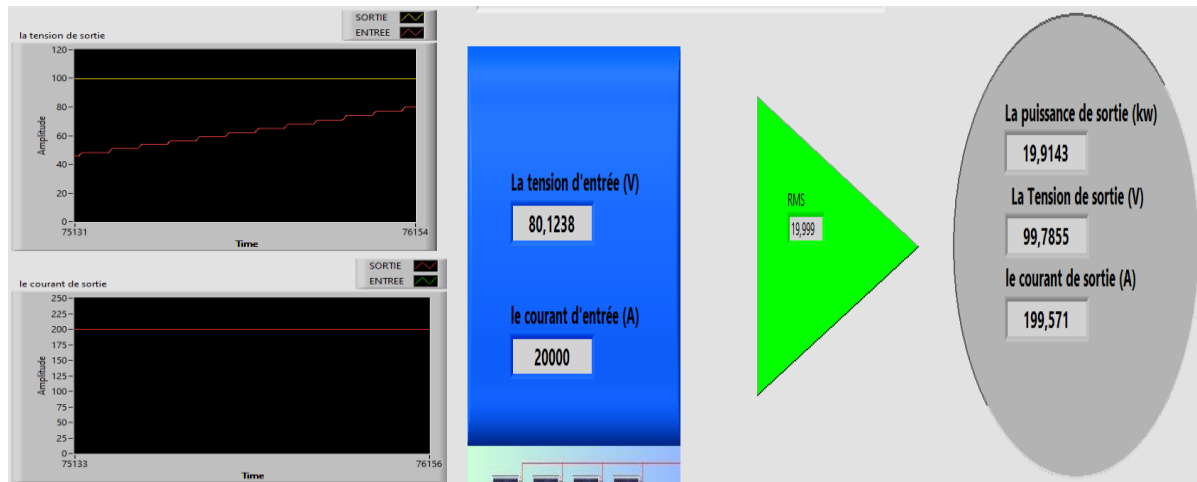


Figure 52 : Augmentation de la tension d'entrée avec maintien des tensions et du courant de sortie constants.

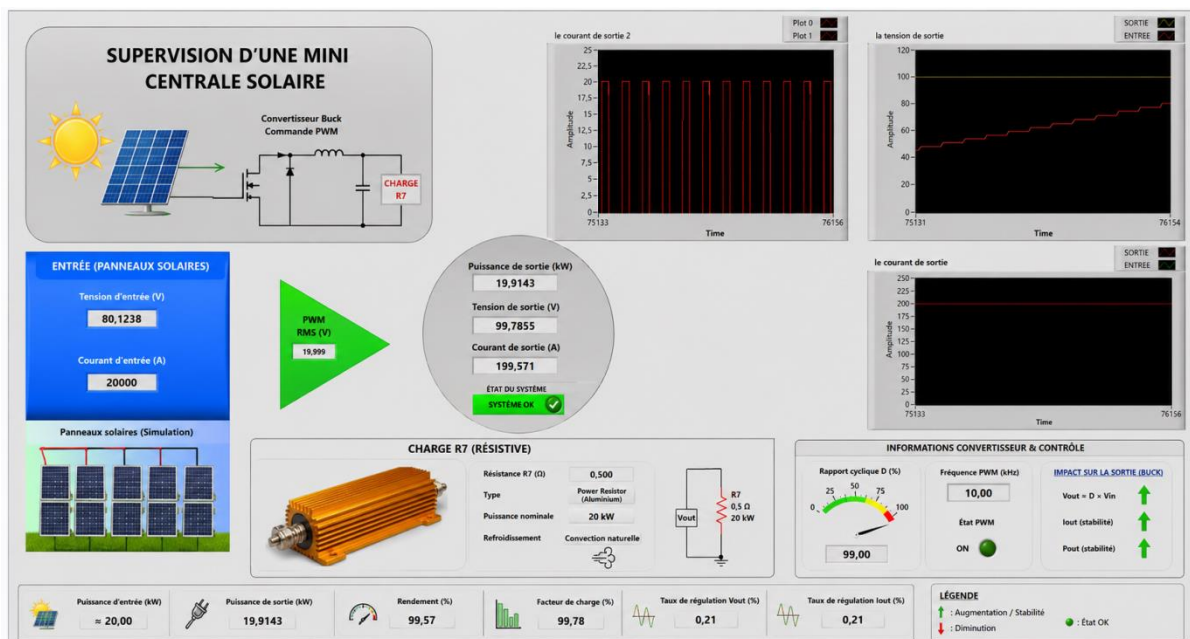


Figure 53 : Interface finale de supervision sous LabVIEW assurant les fonctions SCADA.

IV.4. Conclusion :

Ce chapitre a présenté la modélisation d'une mini-station photovoltaïque sous l'environnement de co-simulation NI Multisim–LabVIEW, avec pour objectif la mise en place d'un système de supervision et de contrôle des grandeurs électriques.

Les différentes étapes ont permis de modéliser le générateur photovoltaïque, d'intégrer un convertisseur Buck commandé par PWM et de mettre en œuvre une communication en temps réel entre les deux logiciels via les canaux IO. Les résultats de simulation ont montré une bonne stabilité de la tension et du courant de sortie, ainsi qu'une performance satisfaisante du système de commande.

Ainsi, cette étude confirme l'efficacité de la stratégie adoptée et l'intérêt de la co-simulation pour l'analyse et la supervision des systèmes photovoltaïques.

Discussion des résultats :

Les résultats obtenus par co-simulation Multisim/LabVIEW révèlent une stabilité remarquable des grandeurs de sortie malgré les variations importantes de la tension d'entrée.

Dans le premier cas (faible irradiance), la tension d'entrée est de **11,0983 V**, tandis que dans le second cas (forte irradiance), elle atteint **80,1238 V**, soit une variation de plus de **620 %**. Le courant d'entrée affiché dans les deux cas est de **20 000 A**, valeur inhérente aux sources de courant idéales (I1–I4) dans Multisim et non au courant physique réel du convertisseur.

Malgré cette variation, la tension de sortie reste quasi-constante entre **99,8025 V** et **99,7855 V**, le courant de sortie entre **199,605 A** et **199,571 A**, et la puissance de sortie autour de **19,92 kW**.

La valeur RMS du signal PWM affichée sur l'interface LabVIEW est de **19,999** dans les deux cas, confirmant la stabilité de la commande et la fiabilité de la supervision en temps réel via le terminal IO5. Il convient de noter que cette stabilité est due au fonctionnement du convertisseur Buck à un rapport cyclique fixe **$D \approx 99 \%$** , selon la relation :

$$V_{\text{sortie}} = D \times V_{\text{entrée}}$$

combiné à l'action filtrante de l'inductance **L1 (100 mH)** et des condensateurs C1 et C2 (100 μF) qui lissent les ondulations résiduelles en sortie.

Les courbes affichées sur l'interface LabVIEW confirment ces résultats numériques.

Le courant de sortie présente une ligne parfaitement horizontale et stable à **200 A** dans les deux cas d'irradiance, attestant de l'efficacité du filtrage assuré par C2. La **tension de sortie** (courbe blanche/jaune) se stabilise à **100 V** et demeure constante tout au long de la simulation, indépendamment des fluctuations de la tension d'entrée. En revanche, la **tension d'entrée** (courbe rouge) présente une allure progressive et oscillatoire, reflétant la variation naturelle de la tension générée par les sources PV selon les conditions d'irradiance simulées. Quant au **signal PWM**, il se présente sous forme d'un signal carré périodique à **10 kHz** avec un rapport cyclique de **99 %**, dont le rôle est de commander les instants de commutation du transistor MOSFET IRF540N ; c'est ce signal, transmis via IO5 vers LabVIEW, qui permet au système SCADA de surveiller en temps réel l'état de la commande du convertisseur.

L'ensemble des résultats obtenus valide le bon fonctionnement du système conçu. La stabilité de la tension de sortie à **$\sim 100 \text{ V}$** et du courant de sortie à **$\sim 200 \text{ A}$** malgré une

variation d'entrée dépassant **620 %** témoigne de l'efficacité du convertisseur Buck dans la régulation des grandeurs électriques. La constance du signal PWM avec une valeur RMS de **19,999** confirme la robustesse de la liaison Multisim/LabVIEW via IO5.

Ces résultats démontrent que le système SCADA développé est capable d'assurer une supervision fiable et continue de la mini-station photovoltaïque dans des conditions d'irradiance variables, ce qui constitue l'objectif principal de ce travail.

- **Rapport des données issues de labVIEW et de Multisim :**

Les tableaux structurés regroupant les valeurs des grandeurs d'entrée et de sortie, extraites à partir de l'interface LabVIEW et des résultats de simulation obtenus sous Multisim.

Tableau 01 : Comparaison des valeurs mesurées d'entrée et de sortie (lecture verticale)

Côté	Identifiant (ID)	Description	Valeur Mesurée	Unité
Entrer	IO4	Tension d'entrée	80.1238	V
Sortie	IO1	Tension de sortie	99.7855	V
-	-	-	-	-
Entrer	IO3	La courant d'entrée	20000	A
Sortie	IO2	La courant de sortie	199.571	A
-	-		-	kW
Sortie	-	Puissance de sortie	19.9143	-
Contrôle	-	Valeur Efficace (RMS)	19.999	-

➤ **Note Technique sur les Valeurs :**

La valeur du courant d'entrée affichée (IO3 = 20000 A) correspond au paramètre des sources de courant idéales dans Multisim pour les besoins de la simulation, tandis que les grandeurs significatives sont celles relevées en sortie (Tension de sortie IO1 et Courant de sortie IO2).

- **Rapport des Données LabVIEW et Multisim 2 :**

Ce document contient les tableaux structurés des nouvelles valeurs d'entrée et de sortie extraites de la deuxième interface LabVIEW et de la simulation Multisim.

Tableau 02 : Comparaison des valeurs mesurées d'entrée et de sortie (lecture verticale)

Côté	Identifiant (ID)	Description	Valeur Mesurée	Unité
Entrer	IO4	Tension d'entrée	11.0983	V
Sortie	IO1	Tension de sortie	99.8025	V
-	-	-	-	-
Entrer	IO3	Courant d'entrée	20000	A
Sortie	IO2	Courant de sortie	199.605	A
-	-		-	kW
Sortie	-	Puissance de sortie	19.9211	-
Contrôle	-	Valeur Efficace (RMS)	19.999	-

➤ **Note Technique sur les Valeurs :**

La valeur du courant d'entrée affichée (IO3 = 20000 A) correspond au paramètre des sources de courant idéales dans Multisim pour les besoins de la simulation, tandis que les grandeurs significatives sont celles relevées en sortie (Tension de sortie IO1 et Courant de sortie IO2).

Conclusion Générale :

Ce travail avait pour objectif la conception et la mise en œuvre d'un système SCADA dédié à la supervision d'une mini-station photovoltaïque, en s'appuyant sur la co-simulation entre Multisim et LabVIEW.

À travers les quatre chapitres de ce mémoire, nous avons progressivement abordé les fondements théoriques des systèmes photovoltaïques et des systèmes SCADA, puis présenté les outils de modélisation utilisés, avant de concrétiser l'ensemble par la réalisation et la simulation d'une mini-station PV intégrant un convertisseur Buck commandé par signal PWM et une interface de supervision développée sous LabVIEW.

Les résultats obtenus ont démontré que le système conçu maintient une tension de sortie stable à **~100 V** et un courant de sortie à **~200 A**, malgré une variation de la tension d'entrée dépassant **620 %** entre les deux conditions d'irradiance simulées, validant ainsi l'efficacité du convertisseur Buck opérant à un rapport cyclique fixe **$D \approx 99 \%$** comme principal facteur de stabilisation des grandeurs de sortie, indépendamment des fluctuations de la tension d'entrée, et la robustesse de la liaison Multisim/LabVIEW via les terminaux IO.

➤ En perspective, ce travail pourra être enrichi par :

- L'intégration d'un algorithme MPPT, d'une commande en boucle fermée,
- Ainsi que d'une supervision à distance via des protocoles de communication industriels.

Référence

- [1] Alain Bilbao Ibarreta '' Réalisation de commandes MPPT Numériques '' Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Université Rovira Virgili 2006.
- [2] Dossier technique «Eolienne et photovoltaïque».
- [3] LA Lamont, History of Photovoltaics, in Comprehensive Renewable Energy, Elsevier, Volume 1 (2012) 31 - 45.
- [4] M.N.Mchaliikh et CH.Hmada "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau" Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla 2013.
- [5] M.Blhadj "Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome", Mémoire de Magister, Centre Universitaire de Bechar, 2007-2008.
- [6] A. Moumami, N. Hamani, N. Moumami & Z. Mokhtari, "Estimation du rayonnement solaire Par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra", 8^{ème} séminaire international sur la physique énergétique, centre universitaire de Bechar, Algérie, novembre 2006.
- [7] Julien LABBÉ, " l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés", thèse de doctorat de l'école des mines de paris, Spécialité "Énergétique" le 21 décembre 2006.
- [8] CHEKIRED Fathya, "Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA", Mémoire de magister en électronique, Ecole National Polytechnique, Alger, Algérie, 2008
- [9] N. Oleksiy, "Simulation, Fabrication Et Analyse De Cellules Photovoltaïques a Contacts Arrières Interdigités", Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, 2005.
- [10] WWW.WEAKEPDIA.COM
- [11] SABONIERE JEAN –CLANDE : Nouvelles Technologie de l'énergie ; les énergies renouvelable 2006.

Référence

- [12] T.FROMHERZ, F.PADINGER .D.GEBEYEHUR, C.BRABEC, J.C.Himmelen, sanici ei, "Comparison of photovoltaic devices containing various blends of polymer and fullerene derivatives." Journal: Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 63, No. 1, pp. 61–68, 2000.
- [13] AMARA Karima, Mémoire de Magister "Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (IMW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension", UMMTO 2014/2015
- [14] Salima ARRAB, Dalila TOUDERT, "Etude d'un Système Photovoltaïque", Mémoire de Master Académique, Université de MOULOUD Mammeri de Tizi Ouzou, le 25 Septembre 2017,
- [15] HELALI Kamilia, "Etude d'une cellule Photovoltaïque étude comparative", Mémoire de Master Electrotechnique, UMMTO 2012.
- [16] H. Mezdour, M. Ayab. "Etude et réalisation d'un système de supervision sous YOKOGAWA CS3000, Application à l'unité de production d'air de l'entreprise nationale SONATRACH", Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma, Faculté des Sciences et de la Technologie, 2019
- [17] <https://crushtymks.com/fr/scada/1459-3-generations-of-scada-system-architectures-you-should-know-about.html>
- [18] F. DUMAY ; 2015 ; "Upgrade des systèmes ESD et F&G au CPF Ourhoud".
- [19] C. ABDELJAOUED ; 2010 ; "Elaboration d'un système d'automatisme et de régulation d'une unité d'aérocondenseur de vapeur d'eau en remplacement d'un condenseur de vapeur à eau de mer" ; Tunisie, Organisation EPPM.
- [20] KAFI Ahmed Zakaria, KRAMA Oussama "Contrôle et supervision d'un procédé industriel automatisé", Mémoire de Fin d'études, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2024
- [21] Keith Stouffer, Joe Falco, Karen Scarfone "Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security", NIST Special Publication 800-82, Revision 1, May 2013.

Référence

[22] BECHIRI Samira, ALIOUA Nadine, "Etude et réalisation d'un mini système SCADA", Mémoire de Fin d'études, Présenté en vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2009-2010

[23] Zahar S. Makhloof, "Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie 2017.

[24] Benadel Faiza, "Etude et simulation d'une commande MPPT pour un système photovoltaïque", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie 2016.

[25] Azibi Lilia, Aichoun Fateh, "Contrôle et supervision d'une installation photovoltaïque par microcontrôleur", Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou, Article 2024.

[26] Smail Semaoui, Amar Hadj Arab, Seddik Bacha, "Application des modèles mathématiques pour l'optimisation de l'énergie dans un système PV", Article 2018

[27] D.S.H. Chan, J.R. Philips and J.C.H. Phang, «A Comparative Study of Extraction Methods for Solar Cell Model Parameters » Solid State Electronics, Vol. 29(3), pp. 329-337, 1986.

[28] A. Bentaïllah, "Etude expérimental et de simulation des performances d'une installation PV de faible puissance", Mémoire de Magister en physique énergétique. Tlemcen, 1994.

[29] R. Issad, "Etude du contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque". Mémoire de magister, Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, 2008.

[30] Hafian Hicham, "Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSpace 103" , Mémoire de Magister ,Université Hadj Lakhder , Batna, Algerie 2013 .

[31] Zahar S.Makhloof., "Etude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleur gestion énergétique", Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie 2017.

Référence

[32] Ferrah Fateh, "Etude et simulation d'un étage MPPT pour un système a énergie renouvelable", Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'hidi, Oum boughi, Algerie 2013.

[33] BENSMAIL Samia, "Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïques". Mémoire de Magister, Université A.MIRA-BEJAIA, 2011/2012.

[34] Benaissa M, "Contribution a l'étude du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques", Thèse de doctorat , Université Djilali Liabes , Sidi-Bel-Abbes, Algérie 2018.

[35] OUKACI Manel Dalila, ZAMIME Amina, «Modélisation sur NI MULTISIM et co-simulation par LABVIEW des générateurs photovoltaïque». Mémoire de Master 2, Université de SAAD DAHLAB DE BLIDA, 2019/2020.

[36] KORICHI Taki Eddine, «Modélisation et Commande d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique». Mémoire de Master, Université du Mohamed Boudiaf Msila, 2016.