

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Électrique et d'Informatique

Département de Télécommunications

Mémoire de Fin d'Études de

MASTER ACADEMIQUE

Filière :

Télécommunications

Spécialité :

Réseaux & Télécommunications

Par

Meriem Fekir

Thème

**Dimensionnement photovoltaïque pour une
installation de télécommunication**

Soutenu le : 07/2025

Devant le jury :

Présidente : M^{me}. HAMMAR Karima MCB UMMTO

Promoteur : M^r. ZOUAK Belkacem MCB UMMTO

Examinatrice : M^{me}. BECHA Tassadit MCB UMMTO

Année Académique : 2024 / 2025.

Remerciements

La rédaction de ce mémoire représente l'aboutissement d'un parcours académique passionnant et exigeant, jalonné de découvertes, d'efforts et d'échanges enrichissants. Cette aventure intellectuelle et humaine n'aurait pu aboutir sans l'appui précieux de nombreuses personnes, à qui j'exprime ici ma plus profonde gratitude.

*Je tiens avant tout à remercier chaleureusement **M. ZOUAK**, mon promoteur, pour la confiance qu'il m'a accordée, son suivi attentif et ses orientations pertinentes tout au long de ce travail. Sa disponibilité, ses encouragements et ses conseils judicieux ont été déterminants pour mener à bien cette recherche et pour approfondir mes compétences dans ce domaine passionnant.*

*Je remercie également **M. ZIRMI**, pour m'avoir offert la possibilité de concrétiser mes connaissances théoriques à travers des applications pratiques, et pour son aide précieuse lors de la collecte et de l'analyse des données nécessaires à ce mémoire. Son accompagnement m'a permis de donner une dimension concrète et rigoureuse à ce projet.*

*Mes plus vifs remerciements s'adressent également à **Mme HAMMAR** et **Mme BECHA**, qui ont accepté d'examiner ce travail avec bienveillance et rigueur. Leur regard critique et leurs observations constructives sont pour moi une source d'enrichissement.*

Je ne saurais oublier d'exprimer toute ma reconnaissance à mes camarades, collègues et amis, qui ont su rendre cette période plus agréable par leur soutien, leurs conseils et leurs encouragements constants.

Enfin, je dédie une pensée toute particulière à ma famille, dont le soutien moral, la patience et la compréhension ont été des piliers essentiels pour surmonter les moments de doute et de fatigue. Leur présence et leurs encouragements m'ont permis de garder confiance et motivation jusqu'à l'achèvement de ce projet.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mon cher père,

Pour tout ce qu'il représente pour moi : un modèle de courage, de persévérance et de sagesse. Pour ses innombrables sacrifices, ses encouragements silencieux, ses précieux conseils et sa confiance inébranlable qui m'ont toujours donné la force d'avancer.

À ma chère mère,

Pour son amour inépuisable, sa tendresse infinie et sa patience exemplaire. Pour ses prières, ses mots réconfortants et sa foi en moi, qui ont été mon refuge et ma plus grande source de motivation dans les moments de doute.

À ma sœur Chahira,

Pour sa complicité, son soutien discret mais toujours présent, ses paroles réconfortantes et son écoute attentive qui ont allégé mes peines et renforcé ma détermination.

À mes frères Mohamed et Ali,

Pour leur affection fraternelle, leur bonne humeur contagieuse et leur soutien indéfectible, qui m'ont apporté joie et sérénité tout au long de ce parcours exigeant.

À mes amis Lina, Katia, Sarah, Wahid, Hakim, Saïd et Karim,

Pour leur amitié sincère, leur écoute, leur patience et les moments de partage qui ont fait de ces années d'études une période riche en souvenirs inoubliables, en entraide et en rires salvateurs.

À mes encadrants et à l'ensemble de mes professeurs,

Pour leur dévouement, leur bienveillance, leur rigueur intellectuelle et la qualité de leur enseignement. Leur accompagnement et leurs conseils avisés ont été une source précieuse d'inspiration et de savoir.

Enfin, à toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur pierre à l'édifice de ce travail,

Par leurs encouragements, leur compréhension et leur présence, je vous adresse mes remerciements les plus sincères et ma profonde gratitude.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace.....	II
Sommaire	III
Résumé	X
Abstract.....	XI
Liste des figures	XII
Liste des tableaux	XIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	XIIII
Introduction Générale	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition des énergies renouvelables	3
I.3 Les sources d'énergie renouvelables	4
I.3.1 L'énergie hydraulique	4
I.3.2 L'énergie de la biomasse	5
I.3.3 L'énergie géothermique	5
I.3.4 L'énergie éolienne	6
I.3.5 L'énergie solaire	7
I.4 Les avantages des énergies renouvelables	8
I.4.1 Réduction des coûts énergétiques	8
I.4.2 Diminution de la dépendance aux énergies fossiles	9
I.4.3 Réduction de l'impact carbone.....	9
I.4.4 Moindre impact sur les écosystèmes	9
I.4.5 Un avantage pour la perception de la marque	10
I.4.6 Encourager l'innovation et propulser la croissance	10
I.5 Les inconvénients des énergies renouvelables	11

I.6	Etats actuel de l'exploitation mondiale	11
I.7	Conclusion	14
Chapitre II : L'énergie Solaire Photovoltaïque		
II.1	Introduction.....	15
II.2	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	15
II.2.1	Effet photovoltaïque	15
II.2.2	Structure d'une cellule photovoltaïque	16
II.2.3	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	18
II.2.4	Conversion de la lumière en électricité	18
II.2.4.1	L'absorption de la lumière	19
II.2.4.2	Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques	19
II.2.4.3	La collecte des charges	20
II.2.5	Conditions de fonctionnement optimales	20
II.2.5.1	Irradiation solaire	20
II.2.5.2	Rendement photovoltaïque	21
II.2.5.3	Influence géographique	21
II.2.5.4	Variabilité climatique	21
II.2.5.5	Contraintes du site	21
II.3	Caractéristiques électriques des cellules solaires	22
II.3.1	Courant de court-circuit (I_{cc}).....	22
II.3.2	Tension en circuit ouvert (V_{oc})	23
II.3.3	Point de puissance maximale	23
II.3.4	Facteur de forme (FF).....	24
II.3.5	Rendement de conversion (η)	24
II.4	Association série et parallèle des cellules	25
II.4.1	Association en série	25
II.4.2	Association en parallèle	26
II.4.3	Association hybride (série/parallèle)	27
II.5	Module photovoltaïque	28
II.5.1	Panneau solaire.....	29
II.6	Conclusion	29
Chapitre III : Intégration des Systèmes Photovoltaïques dans les Télécommunications		
III.1	Introduction.....	30

III.2	Rôle de l'énergie solaire dans les systèmes autonomes télécommunications	30
III.2.1	Contexte et justification de l'utilisation du solaire	30
III.2.2	Avantages énergétiques et économiques	31
III.2.3	Contribution à la durabilité environnementale	31
III.2.4	Comparaison avec les systèmes d'alimentation traditionnels	32
III.2.5	Typologie des architectures énergétiques Telecom-PV	33
III.2.5.1	Architecture off-grid (autonome).....	33
III.2.5.2	Architecture hybride (PV + générateur ou autre source).....	33
III.2.5.3	Architecture grid-connected avec back-up solaire	34
III.2.5.4	Architecture micro-grid photovoltaïque telecom	34
III.2.5.5	Architecture PV mobile (déploiement rapide)	34
III.3	Applications et apports des systèmes photovoltaïques en télécommunications	36
III.3.1	Alimentation des stations de base (BTS) en zones rurales	36
III.3.2	Solutions pour les répéteurs et antennes relais isolées	37
III.3.3	Intégration dans les réseaux IoT et systèmes de surveillance	38
III.3.4	Cas d'usage pour les télécommunications d'urgence	38
III.4	Profil énergétique des stations de télécommunication	39
III.4.1	Analyse des besoins énergétiques par type de station	39
III.4.1.1	Stations de base rurales	39
III.4.1.2	Stations urbaines	40
III.4.1.3	Micro et pico BTS	40
III.4.2	Facteurs influençant la consommation énergétique	40
III.4.2.1	Le volume de trafic et la charge des réseaux en général	40
III.4.2.2	La technologie utilisée	40
III.4.2.3	Les conditions météorologiques.....	40
III.4.2.4	La qualité du réseau électrique.....	41
III.4.2.5	L'état et la maintenance des équipements	41
III.4.3	Méthodologie de dimensionnement des systèmes PV	41
III.4.3.1	La détermination précise de la charge	41
III.4.3.2	L'étude des données solaires disponibles localement	41
III.4.3.3	Le choix des composants	41
III.4.3.4	Simulation et validation	41
III.4.4	Optimisation des profils de consommation.....	42
III.4.4.1	Des équipements à haut rendement	42

III.4.4.2	Une gestion énergétique adaptée.....	42
III.4.4.3	Des systèmes hybrides.....	42
III.4.4.4	Prévention et surveillance permanente.....	42
III.4.4.5	Adaptation des profils de consommation.....	42
III.5	Contraintes et défis de l'alimentation photovoltaïque des infrastructures télécoms.....	42
III.5.1	Gestion de l'intermittence et solutions de stockage.....	43
III.5.1.1	Batteries de stockage.....	43
III.5.1.2	Systèmes hybrides.....	43
III.5.1.3	Dimensionnement optimal.....	43
III.5.2	Aspects techniques et maintenance des installations.....	43
III.5.2.1	Détérioration des panneaux solaires.....	44
III.5.2.2	Surveillance et gestion à distance.....	44
III.5.2.3	Maintenance préventive.....	44
III.5.2.4	Gestion thermique.....	44
III.5.3	Défis économiques et analyse coûts-bénéfices.....	44
III.5.3.1	La réduction des coûts d'exploitation (OPEX).....	44
III.5.3.2	L'allègement de l'empreinte carbone.....	44
III.5.3.3	Durée de vie/ return on investment (ROI).....	44
III.5.3.4	Les aides et incitations.....	45
III.5.4	Cadre réglementaire et normatif.....	45
III.5.4.1	Normes de sécurité électriques.....	45
III.5.4.2	Autorisation d'implantation.....	45
III.5.4.3	Intégration réseau.....	45
III.5.4.4	Responsabilités contractuelles.....	45
III.6	Conclusion.....	45

Chapitre IV : Dimensionnement photovoltaïque pour une installation des télécommunications

IV.1	Introduction.....	48
IV.2	Dimensionnement des Systèmes Photovoltaïques Autonomes.....	48
IV.2.1	Objectifs et enjeux du dimensionnement.....	49
IV.2.2	Étapes du dimensionnement d'un système PV autonome.....	49
IV.2.2.1	Évaluation de la charge électrique.....	49
IV.2.2.2	Analyse des ressources solaires.....	49

IV.2.2.3	Calcul de la puissance du générateur PV	49
IV.2.2.4	Dimensionnement du stockage	50
IV.2.2.5	Sélection des composants électroniques	50
IV.2.3	Contraintes spécifiques aux installations autonomes télécom	50
IV.2.3.1	Disponibilité continue de l'énergie	50
IV.2.3.2	Maintenance minimale	50
IV.2.3.3	Adaptation au climat désertique	50
IV.3	Analyse de la Charge Énergétique de la Station 5G.....	51
IV.3.1	Description des équipements et besoins énergétiques	51
IV.3.2	Profil de consommation journalier et saisonnier	52
IV.3.2.1	Profil journalier	52
IV.3.2.2	Profil saisonnier	52
IV.3.3	Critères de disponibilité et continuité de service	52
IV.4	Ressources Solaires et Conditions Environnementales du Sahara Algérien	53
IV.4.1	Données d'irradiation solaire locale	53
IV.4.2	Influence des températures élevées et de la poussière sur les performances PV	54
IV.4.2.1	Températures élevées	54
IV.4.2.2	Encrassement (poussière)	54
IV.4.3	Impact climatique sur le dimensionnement	54
IV.4.3.1	Surdimensionnement du générateur PV	55
IV.4.3.2	Choix technologique adapté:.....	55
IV.4.3.3	Dispositifs de protection	55
IV.5	Dimensionnement du Générateur Photovoltaïque.....	55
IV.5.1	Calcul de la puissance crête nécessaire	55
IV.5.2	Prise en compte des pertes et facteurs correctifs.....	56
IV.5.2.1	Pertes thermiques	56
IV.5.2.2	Encrassement	56
IV.5.2.3	Mismatch et câblage	56
IV.5.2.4	Convertisseurs et contrôleurs	57
IV.5.3	Choix des modules PV.....	57
IV.5.3.1	Détermination du nombre de modules	57
IV.5.3.2	Technologies à privilégier	58
IV.6	Dimensionnement du Système de Stockage Énergétique.....	58
IV.6.1	Estimation de l'autonomie nécessaire	58

IV.6.2	Sélection et capacité des batteries	59
IV.6.2.1	Technologies courantes	59
IV.6.3	Facteurs influençant la durée de vie des batteries dans le Sahara	59
IV.6.3.1	Températures élevées	59
IV.6.3.2	Cycles de charge/décharge profonds	60
IV.6.3.3	Maintenance	60
IV.6.3.4	Vieillesse chimique	60
IV.7	Régulation et Conversion d'Énergie	60
IV.7.1	Onduleurs ou convertisseurs	60
IV.7.1.1	Types de convertisseurs	60
IV.7.1.2	Dimensionnement de l'onduleur	61
IV.7.1.3	Intégration dans le système	61
IV.7.2	Régulateurs de charge.....	61
IV.7.2.1	Types de régulateurs.....	62
IV.7.2.2	Dimensionnement.....	62
IV.7.2.3	Fonctions avancées.....	62
IV.8	Dimensionnement photovoltaïques autonomes pour une station télécom en Algérie ...	63
IV.8.1	Étude de cas n°1 : Station télécom 5G à Tamanrasset	63
IV.8.1.1	Hypothèses de base	63
IV.8.1.2	Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	63
IV.8.1.3	Dimensionnement de l'onduleur	64
IV.8.1.4	Dimensionnement du stockage	64
IV.8.1.5	Dimensionnement du régulateur de charge	65
IV.8.2	Étude de cas n°2 : Station télécom 5G à Tizi Ouzou	65
IV.8.2.1	Hypothèses de base	65
IV.8.2.2	Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	66
IV.8.2.3	Dimensionnement de l'onduleur	67
IV.8.2.4	Dimensionnement du stockage	67
IV.8.2.5	Dimensionnement du régulateur de charge	68
IV.8.3	Comparatif des deux sites	68
IV.8.4	Analyse comparative des deux sites	68
IV.8.5	Simulation et validation du dimensionnement photovoltaïque	69
IV.8.5.1	Objectif de la simulation.....	69
IV.8.5.2	Paramètres du modèle simulé	69

IV.8.5.3	Schéma global de la simulation.....	70
IV.8.5.4	Résultats de la simulation.....	71
IV.8.5.5	Analyse et validation.....	74
IV.9	Conclusion.....	74
	Conclusion Générale.....	75
	Références.....	75

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie sur le dimensionnement et l'intégration d'un système photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une station de télécommunication, notamment une station 5G implantée en zone rurale et isolée.

Dans un contexte de transition énergétique et de généralisation des réseaux mobiles, l'utilisation de l'énergie solaire constitue une solution durable pour réduire la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles et garantir une couverture réseau fiable dans des zones non électrifiées.

Ce travail comporte une analyse des caractéristiques de l'énergie solaire photovoltaïque, une estimation précise de la charge énergétique d'une station 5G, le dimensionnement optimal des composants du système (modules solaires, batteries, régulateurs) ainsi qu'une modélisation et simulation sous Simulink.

Ces résultats confirment la faisabilité technique et mettent en évidence les paramètres essentiels pour assurer une alimentation continue et sécurisée. Cette étude contribue à promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables dans le domaine des télécommunications pour favoriser le développement socio-économique des zones rurales.

Mots clés : Énergie solaire photovoltaïque, Télécommunication rurale, Station 5G autonome, Dimensionnement énergétique, Système hors réseau, Alimentation durable, Transition énergétique, Réseaux mobiles en zones isolées.

Abstract

This dissertation presents an in-depth study on the sizing and integration of a standalone photovoltaic system to supply power to a telecommunication installation, specifically a rural and remote 5G base station.

In the context of the energy transition and the expansion of mobile networks, solar energy offers a sustainable solution to reduce dependence on conventional energy sources and to ensure reliable network coverage in off-grid areas.

This work includes an analysis of photovoltaic solar energy characteristics, a precise estimation of the energy demand of a 5G station, optimal sizing of system components (solar panels, batteries, charge controllers), and modelling and simulation using MATLAB/Simulink.

These results demonstrate the technical feasibility and highlight key parameters to ensure continuous and secure power supply. This study promotes the adoption of renewable energy in the telecommunications sector to support the socio-economic development of rural regions.

Keywords: Photovoltaic solar energy, Rural telecommunication, Standalone 5G base station, Energy sizing, Off-grid system, Sustainable power supply, Energy transition, Mobile networks in remote areas.

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Figure 1. 1 Principales sources des énergies renouvelables	4
Figure 1. 2 Energie hydraulique	4
Figure 1. 3 Energie biomasse	5
Figure 1. 4 Energie géothermique	6
Figure 1. 5 Energie éolienne	7
Figure 1. 6 Energie solaire	8
Figure 1. 7 Représentation graphique du pourcentage de la production d'électricité mondiale provenant de sources renouvelables (%)	12
Figure 1. 8 Part de la production d'électricité d'origine renouvelable	14

Chapitre II : L'énergie Solaire Photovoltaïque

Figure 2. 1 principe de l'effet photovoltaïque	16
Figure 2. 2 Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque.	17
Figure 2. 3 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec résistance série et Shunt.	18
Figure 2. 4 Diagramme de la transformation de la lumière en électricité.	19
Figure 2. 5 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque	23
Figure 2. 6 Caractéristique résultant d'un groupement de N_s cellule en série	26
Figure 2. 7 Caractéristiques résultant d'un groupement en parallèle de N_p cellule	27
Figure 2. 8 Caractéristique résultant d'un assemblage série/parallèle de N_s et N_p cellule ...	28

Chapitre IV : Dimensionnement photovoltaïque pour une installation des télécommunications

Figure 4. 1 Schéma global de la simulation de la cellule photovoltaïque.	71
Figure 4. 2 Courbe I-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tizi Ouzou (450 W/m^2)....	72
Figure 4. 3 Courbe I-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tamanrasset (750 W/m^2)..	72
Figure 4. 4 Courbe P-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tizi Ouzou.	73
Figure 4. 5 Courbe P-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tamanrasset.	73

Liste des tableaux

Chapitre III : Intégration des Systèmes Photovoltaïques dans les Télécommunications

Tableau 3. 1 Comparaison des solutions d'alimentations pour les infrastructures télécoms en zones isolées.....32

Tableau 3. 2 Comparaison des architectures énergétiques pour les installations télécoms alimentées par photovoltaïque.....35

Chapitre IV : Dimensionnement photovoltaïque pour une installation des télécommunications

Tableau 4. 1 Estimation de la consommation énergétique des équipements d'une station 5G rurale.....51

Tableau 4. 2 Valeur de la station télécom 5G à Tamanrasset.63

Tableau 4. 3 Valeur de la station télécom 5G à Tizi-Ouzou.....66

Tableau 4. 4 Comparaison entre valeur de la station télécom 5G à Tamanrasset et à Tizi-Ouzou.....68

Tableau 4. 5 paramètres du bloc Solar Cell70

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

Abréviatiion	Signification
4G	Quatrième Génération
5G	Cinquième Génération
AC	Courant Alternatif (Alternating Current)
AGM	Absorbent Glass Mat
BBU	Baseband Unit
BTS	Base Transceiver Station
CDTE	Cadmium Telluride
CIGS	Copper Indium Gallium Selenide
DC	Courant Continu (Direct Current)
DDP	Différence de Potentiel
DOD	Depth of Discharge
EMS	Energy Management System
ENR	Énergies Renouvelables
GES	Gaz à Effet de Serre
GSM	Global System for Mobile Communications
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
LOT	Internet des Objets (IoT)
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NASA POWER	NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources
NFPA	National Fire Protection Association
NMS	Network Management System

ODD	Objectifs de Développement Durable
PLC	Programmable Logic Controller
PV	Photovoltaïque
PVGIS	Photovoltaic Geographical Information System
PWM	Pulse Width Modulation
ROI	Return on Investment
RRU	Remote Radio Unit
RS485	Recommandation Standard de communication série
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SNMP	Simple Network Management Protocol
STC	Standard Test Conditions
VSAT	Very Small Aperture Terminal
VRLA	Valve Regulated Lead Acid
WIFI	Wireless Fidelity
ZCE	Zone de Charge Électrique

Introduction générale

Introduction générale

La transition énergétique mondiale représente incontestablement l'une des questions majeures du XXI^e siècle. La demande mondiale croissante en énergie ainsi que l'épuisement progressif de nos ressources fossiles, sans parler des effets environnementaux désastreux dus aux gaz à effet de serre, appellent les sociétés modernes à adapter leurs modes de production et de consommation d'énergie [1], [2]. Dans ce cadre, le développement et l'utilisation des énergies renouvelables apparaissent non seulement comme une alternative durable mais aussi comme une nécessité stratégique et écologique [3].

Au sein des différentes sources renouvelables, l'énergie solaire photovoltaïque se présente comme une source centrale. Sa dimension non épuisable, sa disponibilité quasi ubiquitaire, et les progrès techniques récents dans les systèmes de conversion et de stockage en font une solution particulièrement adaptée pour répondre aux besoins énergétiques, notamment dans les endroits éloignés ou difficiles aux raccordements électriques [4], [5].

Cette possibilité de produire localement et de manière décentralisée de l'électricité ouvre des perspectives nouvelles dans de nombreux champs, dont le secteur des télécommunications [6].

Aujourd'hui, le domaine des télécommunications est en forte expansion, notamment sous l'impact d'une demande de connectivité exponentielle, d'une urbanisation croissante, et du déploiement des systèmes avancés de communication comme la 4G, 5G [7].

Néanmoins, cette évolution technique requiert aussi des besoins énergétiques toujours plus importants, en particulier pour les stations de base, les relais, et les équipements de transmission souvent déployés dans les zones rurales, éloignées où l'alimentation électrique fait face au défi technique le plus important [8]. Les solutions conventionnelles comme les groupes électrogènes diesels sont à la fois coûteuses, lourdes à entretenir et à exploiter, et en plus, impactent l'environnement [9].

Ce mémoire propose d'étudier et de dimensionner un système d'alimentation électrique photovoltaïque autonome pour une station de télécommunication, prenant en compte les aspects techniques, énergétiques et environnementaux. Cela va permettre d'exploiter le potentiel solaire afin d'alimenter de façon fiable, continue et durable une station tout en tenant compte des contraintes réelles du site (irradiation, température, autonomie, consommation électrique, etc.).

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres complémentaires :

Le premier chapitre introduit le contexte global des énergies renouvelables, en présentant leurs différentes formes, leurs atouts, leurs inconvénients et leur état d'exploitation au niveau mondial. L'objectif est de situer l'énergie solaire dans le panorama global de la transition énergétique.

Le deuxième chapitre décrit le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques en détaillant la physique de leur fonctionnement, leur structure de base, leur modélisation sous forme de circuits électriques, leurs paramètres de performances afin de cerner comment la lumière est convertie en électricité et comment optimiser cette conversion.

Le troisième chapitre est consacré à l'intégration des systèmes photovoltaïques dans les infrastructures de télécommunications et aborde les architectures énergétiques, les configurations possibles (systèmes autonomes, systèmes hybrides), les équipements associés (batteries, convertisseurs, régulateur), les contraintes particulières d'un secteur aussi spécifique que les télécommunications.

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de cas réelle sur le dimensionnement global d'un système photovoltaïque pour une station 5G rurale avec, calculs énergétiques et choix des composants. Pour clore ce chapitre, une simulation du fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque a été réalisée et ses caractéristiques visualisées.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale dans laquelle nous résumerons le travail que nous avons effectué.

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I.1 Introduction

Dans le contexte de l'augmentation de la consommation d'énergie mondiale et de la croissance des enjeux environnementaux, il est plus que jamais essentiel de trouver des solutions énergétiques efficaces et durables [10].

Dans ce contexte, l'énergie solaire photovoltaïque, qui convertit la lumière du soleil en électricité propre, est de plus en plus perçue comme une option viable [11].

Par ailleurs, le secteur des télécommunications, essentiel à la société numérique actuelle, fait face à une croissance significative de sa consommation énergétique, principalement en raison de l'émergence de technologies telles que la 5G et l'Internet des objets (IoT) [12].

Bien que ce domaine soit essentiel pour le développement économique et social, il contribue aussi de façon importante aux émissions mondiales de gaz à effet de serre [13].

I.2 Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (EnR) sont des énergies provenant de processus naturels qui se renouvellent constamment. On compte divers types d'énergies renouvelables, y compris l'énergie solaire (photovoltaïque ou thermique), éolienne (vent), hydraulique et marémotrice (provenant des rivières et des mers), la biomasse sous ses formes solide (bois et déchets biologiques), liquide (biocarburants) ou gazeuse (biogaz), ainsi que la géothermie qui est la chaleur de la terre [14].

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie utilisées par l'homme de manière à ce que leurs réserves ne s'épuisent pas. Autrement dit, sa rapidité de formation doit surpasser sa vitesse d'exploitation. Les énergies renouvelables désignent des formes d'énergie issues de sources renouvelables, c'est-à-dire des sources qui se régénèrent suffisamment rapide pour que leur utilisation actuelle n'ait pas d'incidence sur leur disponibilité future [10], [15].

En termes généraux, il est possible d'affirmer que l'énergie renouvelable découle de la conversion de ressources renouvelables, à savoir : l'énergie solaire, hydraulique, géothermique, éolienne et la biomasse [14].

La figure 1.1 représente les différentes sources d'énergie renouvelable.

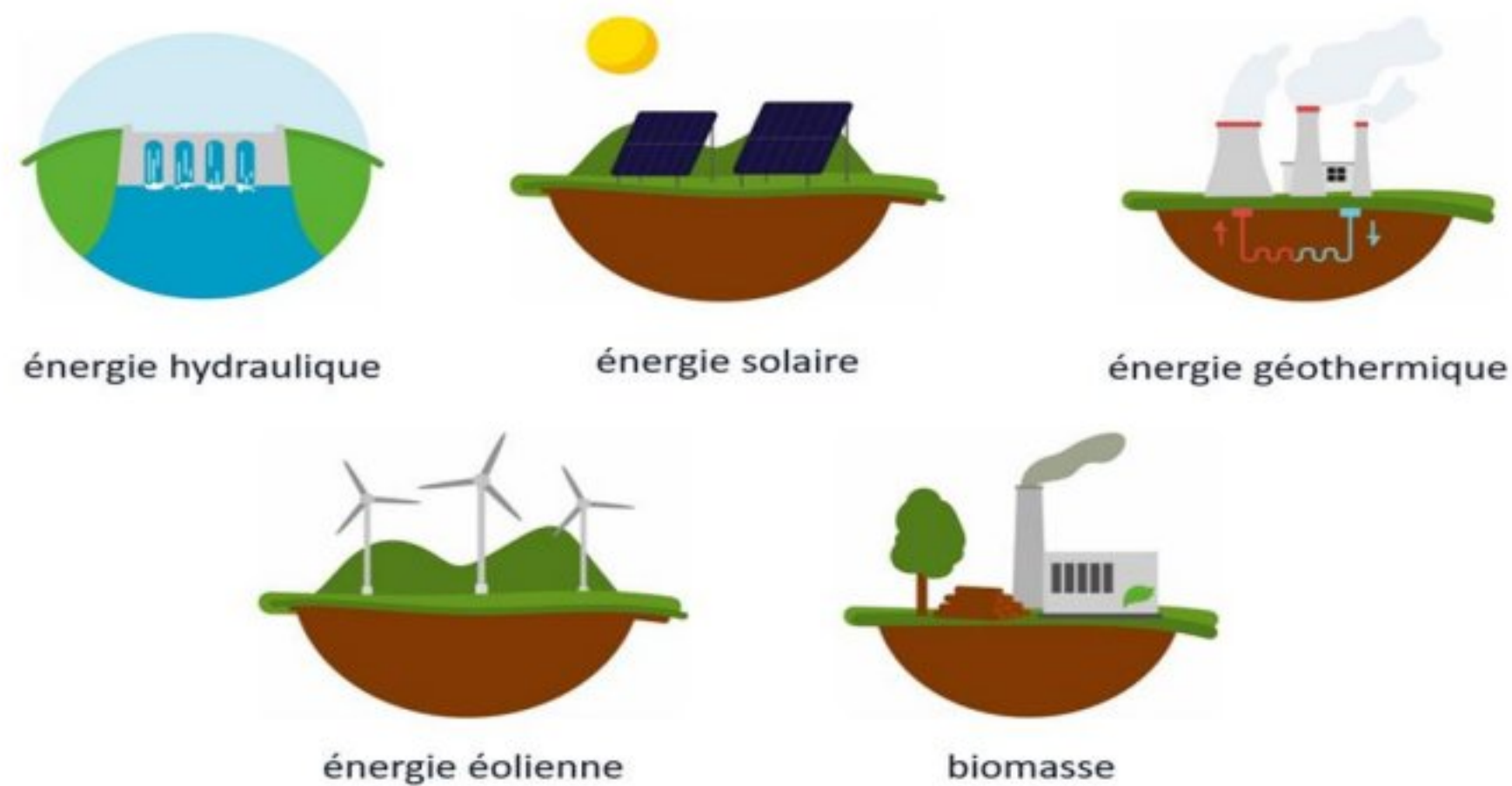


Figure 1. 1 Principales sources des énergies renouvelables [16]

I.3 Les sources d'énergie renouvelables

I.3.1 L'énergie hydraulique :

Actuellement, l'hydraulique représente la principale source d'électricité renouvelable. En 2004, la capacité hydroélectrique en place à l'échelle mondiale était évaluée à 715 gw, ce qui représentait approximativement 19% de la production électrique globale [10]. En Europe, presque 15 % de la capacité électrique installée provient de.

L'énergie hydraulique utilise l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau pour produire de l'électricité. La méthode employée pour générer de l'électricité à partir de la force hydraulique est identique à celle utilisée par les moulins à eau de l'époque [17], [18]. Plutôt que de faire tourner une roue, l'énergie de l'eau déclenche une turbine qui entraîne un alternateur et génère ainsi de.

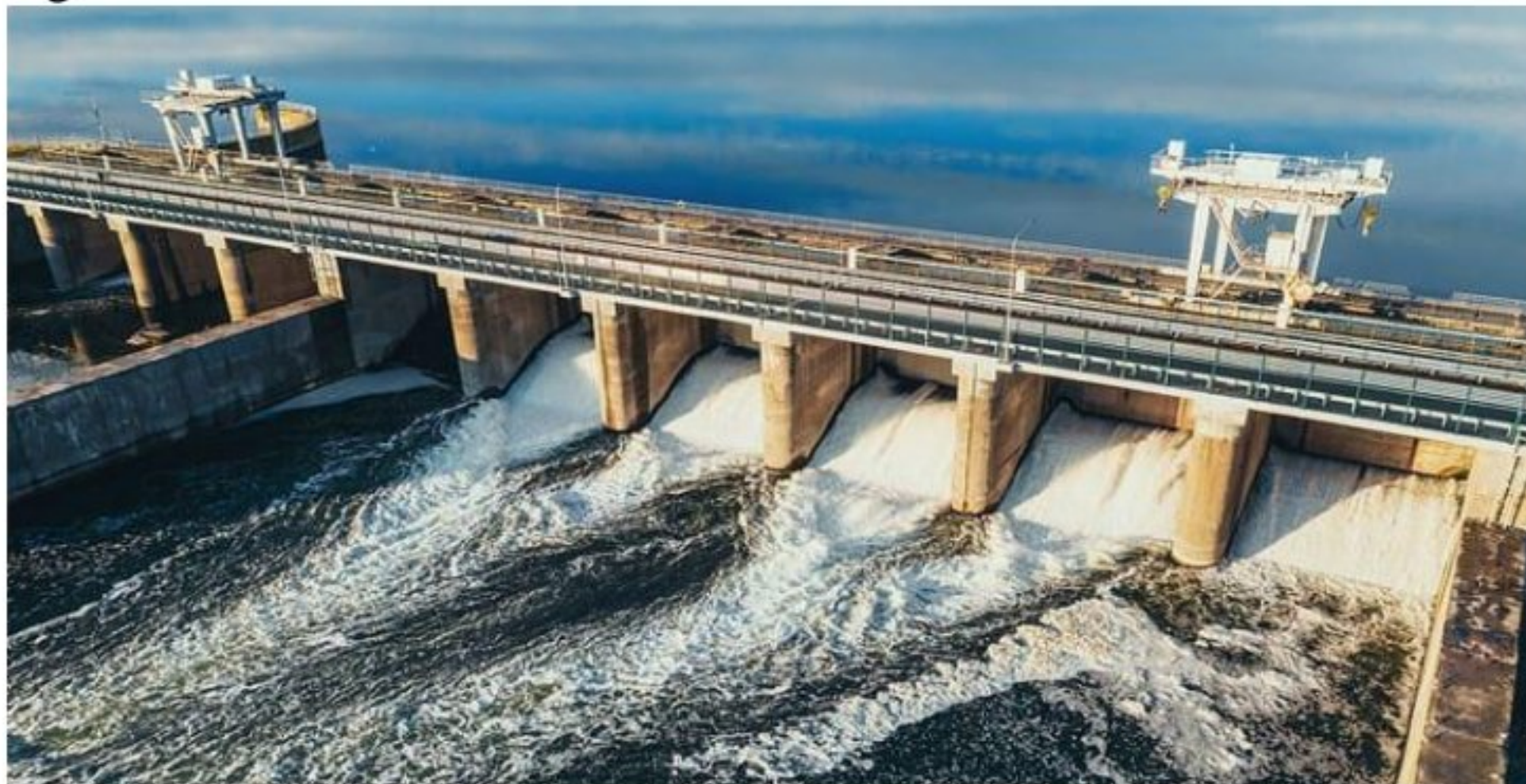


Figure 1. 2 Energie hydraulique [19]

I.3.2 L'énergie de la biomasse :

On distingue quatre types de biomasse : la biomasse sèche (comme le bois ou les résidus agricoles), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (incluant le bioéthanol, le biodiesel, l'huile végétale, etc.).

La chaleur générée par la combustion va réchauffer un réservoir d'eau, qui produira alors de la vapeur à l'instar d'une cocotte-minute. Cette vapeur d'eau sera ensuite libérée sous haute pression, permettant ainsi de faire fonctionner une turbine connectée à un alternateur.

C'est cet alternateur qui va générer de l'électricité. Ce qui est captivant avec les centrales à biomasse, c'est principalement celles qui sont capables de générer de l'électricité à partir de matières dont nous avons plus d'utilité [15], [20]



Figure 1. 3 Energie biomasse [21]

I.3.3 L'énergie géothermique :

La géothermie fait référence à l'énergie géothermique provenant de la chaleur terrestre qui est transformée en chaleur. Traditionnellement, on identifie trois catégories de géothermie en fonction de la température accessible à l'exploitation :

- La géothermie de haute énergie.
- La géothermie à faible énergie.
- La géothermie à très basse énergie.

Pour exploiter cette énergie géothermique, l'eau froide est injectée sous la surface terrestre. Cette eau froide se chauffe.

Elle est ensuite extraite et amenée à la surface où elle est, soit exploitée pour générer de l'électricité dans une centrale, soit directement utilisée comme eau chaude dans les habitations (pour la douche, les radiateurs,... etc.)[22], [23].



Figure 1. 4 Energie géothermique [24]

I.3.4 L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne provient du mouvement des masses d'air, qui est une conséquence indirecte de l'ensoleillement de la terre. Grâce à l'augmentation de chaleur dans certaines régions du globe et au refroidissement d'autres, un déséquilibre de pression se produit, entraînant un mouvement constant des masses d'air.

Après avoir été négligée pendant une longue période, cette source d'énergie utilisée depuis l'antiquité connaît une croissance sans précédent depuis environ trois décennies, principalement en raison des premiers chocs pétroliers.

Sur le plan international, l'énergie éolienne a connu une progression constante de 30 % chaque année depuis environ dix ans [10]. Généralement, la machine est équipée de trois pales fixées à un rotor, lequel est installé au sommet d'un mât vertical.

Ce dispositif est monté sur une nacelle qui accueille un générateur. Un moteur électrique sert à ajuster la partie supérieure pour qu'elle reste constamment positionnée contre le vent. Les pales servent à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Les pales s'orientent entre 10 et 25 révolutions par minute grâce au vent. La vitesse de rotation des pales dépend de leur dimension. Plus les pales seront étendues, plus leur rotation sera [25], [26].



Figure 1. 5 Energie éolienne [27]

I.3.5 L'énergie solaire :

Le soleil, une source d'énergie quasi-infinie, envoie vers la terre un rayonnement qui équivaut approximativement à 8400 fois la consommation énergétique annuelle de l'humanité. Cela représente une puissance instantanée reçue de 1 kW crête par mètre carré (kwc/m²), répartie sur l'intégralité du spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge [28]. Les déserts de notre terre accumulent plus d'énergie solaire en 6 heures que ce que l'humanité utilise en une année. L'énergie solaire est principalement utilisée de manière directe, par exemple en agriculture grâce à la photosynthèse, ou dans diverses applications telles que le séchage et le chauffage.

Cette énergie est largement accessible sur l'ensemble du globe et, bien qu'elle soit considérablement atténuée lors de sa traversée de l'atmosphère, une quantité substantielle parvient encore à la surface terrestre.

Nous pouvons donc s'attendre à obtenir 1000 w/m² dans les régions tempérées et jusqu'à 1400 w/m² quand l'atmosphère est peu chargée en poussières ou en eau [30].



Figure 1. 6 Energie solaire [29]

I.4 Les avantages des énergies renouvelables

La société n'a jamais été encore préoccupée par la consommation d'énergie. La transition énergétique représente un défi énorme que nous devons surmonter à tous les échelons, et l'adoption des énergies renouvelables en est la solution la plus durable et viable.

I.4.1 Réduction des coûts énergétiques

Les dépenses liées à l'énergie, notamment pour l'électricité, représentent une portion importante des coûts supportés par les ménages et les professionnels. Si l'énergie produite est prévue pour une consommation sur site, les dépenses peuvent être largement réduites en optant pour des énergies renouvelables.

Des systèmes comme l'énergie solaire ou éolienne, par exemple, exigent un capital de départ significatif, néanmoins, leur technologie est à la fois fiable et de haute qualité.

Elles nécessitent peu de maintenance et génèrent de l'électricité à un prix largement inférieur, car elle provient d'une ressource gratuite et pléthorique [31].

Cependant, si l'énergie renouvelable est produite pour être revendue (injection dans le réseau), elle peut engendrer des bénéfices additionnels qui, une fois déduits des coûts énergétiques, les réduisent.

I.4.2 Diminution de la dépendance aux énergies non renouvelables

Elaborer les énergies renouvelables impliquerait restreindre sa dépendance aux ressources fossiles. L'exploitation des ressources non renouvelables telles que le gaz, le charbon, l'énergie nucléaire et le pétrole à un impact à l'épuisement accéléré de ces ressources tout en fournissant une quantité importante de polluants atmosphériques [31].

De la réalité de leur faiblesse et de leur élargissement profondément inégale à travers le monde, elles sont influencées par les variations des prix sur le marché et les obstacles géopolitiques mondiaux. Cela provoque des incertitudes et des risques significatifs pour ceux qui en dépendent [25].

I.4.3 Réduction de l'impact carbone

L'exploitation des sources fossiles entraîne une immense densité de gaz à effet de serre (GES), notamment le dioxyde de carbone, qui fait les éléments responsables à la manifestation du réchauffement climatique [31].

En revanche, celle-ci produit très peu, voire aucune, d'énergie renouvelable. Ainsi, leur usage favorise l'alignement avec les objectifs de développement durable [32].

I.4.4 Moindre impact sur les écosystèmes

La création d'énergie recyclable entraîne la diminution de déchets, de pollution et de dégradations en comparaison aux énergies fossiles.

Il est parfois possible que ces actions affectent certains écosystèmes, cependant des mesures d'atténuation, de compensation ou de restauration peuvent toujours être mises en œuvre [25], [31].

I.4.5 Un avantage pour la perception de la marque

La question écologique est centrale dans les préoccupations de la société. Par conséquent, investir dans les énergies renouvelables contribue à améliorer l'image de marque et représente donc un atout concurrentiel. Un critère non négligeable dans un environnement de marché de plus en plus saturé.

I.4.6 Encourager l'innovation et propulser la croissance

Dans un monde en perpétuel changement et avancée, les énergies renouvelables sont de véritables catalyseurs de développement. D'une part, elles proposent l'opportunité de constituer de nouveaux métiers et qualifications dans le secteur énergétique [31].

Des positions et des connaissances qui permettent d'anticiper les besoins futurs. Voici quelques exemples d'illustrations :

- Coordinateur de projets solaires ou éoliens
- Technicien en entretien solaire ou éolien,
- Poseur de panneaux solaires
- Ingénieur expert en énergies vertes
- Consultant en stockage d'énergie
- Spécialiste de l'efficacité énergétiqueetc.

De plus, elles favorisent la collaboration entre les différents acteurs de la transition énergétique : fournisseurs, distributeurs, autorités locales, associations, et ainsi de suite.

Un tel partenariat génère une synergie bénéfique en simplifiant et accélérant la mise en œuvre des projets d'énergies vertes (financement, réseau de compétences, innovation, etc.)[12].

Ceci augmente le nombre d'utilisateurs pouvant profiter de ces initiatives et qui, par la suite, peuvent contribuer à l'élargissement du marché des énergies vertes et à la croissance des possibilités d'investissement et de financement [23].

I.5 Les inconvénients des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont aussi leurs petites imperfections. Nous observons en premier lieu un coût d'acquisition assez élevé pour les installations dont la rentabilité peut prendre des années à se concrétiser.

Par ailleurs, une grande partie de ces énergies renouvelables dépend des aléas climatiques. En effet, des journées manquant de vent ou de lumière peuvent considérablement affecter la production d'énergie éolienne et solaire.

La génération d'énergie par éolien est fortement liée à la puissance du vent. Pour remédier à cette situation, les éoliennes sont systématiquement installées dans des régions où le vent est fort.

Toutefois, certaines communautés s'opposent à leur installation en raison des perturbations sonores et visuelles qu'elles pourraient engendrer.

A l'instar de l'énergie géothermique, l'énergie biomasse souffre du revers de ne pas pouvoir être exploitée à grande échelle sans mettre en péril les ressources naturelles.

De même, l'énergie solaire ne présente pas encore un rendement suffisamment élevé pour satisfaire totalement les besoins énergétiques d'un foyer [25], [32].

I.6 Etats actuel de l'exploitation mondiale

Il est important d'observer que, malgré leur progression rapide, le solaire et l'éolien n'ont représenté respectivement que 4,5% et 7,6% de la production mondiale d'électricité en 2022 [10] (comparé à 15,1% pour l'hydroélectricité, la première source d'énergie renouvelable).

Actuellement, le charbon demeure de loin la source principale d'électricité dans le monde (35,7% de la production en 2022) [10].

À la fin de l'année 2022, les capacités d'énergie renouvelable – toutes sources confondues – à l'échelle mondiale atteignaient presque 3 372 gw, ce qui représente une augmentation de 9,6% par rapport à fin 2021[10].

Bien que l'hydroélectricité demeure la source principale d'énergie renouvelable produisant de l'électricité, en 2022, le solaire et l'éolien ont représenté près de 90% des nouvelles capacités renouvelables mises en place à travers le monde [10].

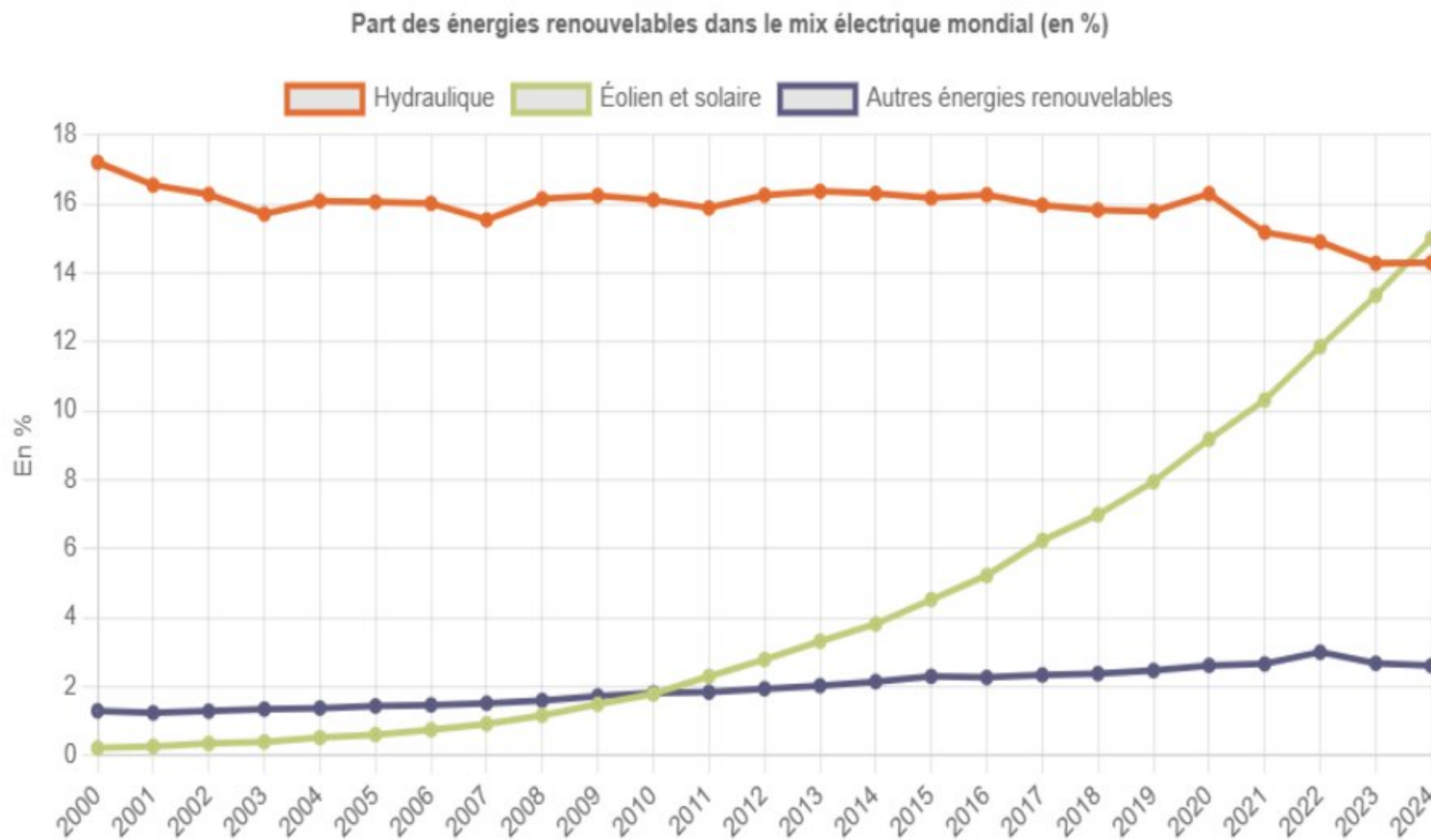


Figure 1. 7 Représentation graphique du pourcentage de la production d'électricité mondiale provenant de sources renouvelables (%) [10]

Nous avons observé une avancée considérable de la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité à l'échelle mondiale.

En 1985, les énergies renouvelables représentaient 20,82 % de la production mondiale (essentiellement d'origine hydraulique) [18], néanmoins, cette proportion a progressivement baissé pour tomber à un point bas de 18,09 % en 2005[10].

Depuis 2010, nous avons noté un retournement de cette tendance, avec une proportion d'énergies renouvelables qui atteint 19,71 % et qui croît progressivement chaque année [10].

En 2020, la proportion d'énergies renouvelables a dépassé les 28 %, et a atteint 30,24 % en 2023[10].

Cette expansion rapide récemment témoigne d'un investissement croissant dans les énergies vertes, de progrès technologiques, et d'une sensibilité globale augmentée aux problématiques climatiques et aux politiques environnementales destinées à diminuer l'empreinte carbone.

Le pourcentage d'énergies renouvelables utilisé dans la production d'électricité varie considérablement d'un continent à l'autre.

L'Amérique du sud se distingue définitivement de la moyenne mondiale avec un taux notable de 75%. Cette performance remarquable est attribuée principalement à l'abondance de ressources hydroélectriques dans des pays tels que le Brésil [23].

Avec 40,04 %, l'Océanie se classe au deuxième rang, grâce à des politiques énergétiques proactives en faveur de l'énergie renouvelable en Australie et en Nouvelle-Zélande [10], [23].

Avec 35,23 %, l'Europe profite de ses lourds investissements dans l'énergie éolienne et solaire, encouragés par des politiques environnementales rigoureuses [23].

Pour des raisons de comparaison, nous notons que l'Amérique du nord (28,44 %), l'Asie (24,68 %) et l'Afrique (23,30 %) affichent des taux plus bas mais manifestement en progression [23].

C'est un signe de leurs diverses démarches pour intégrer les énergies renouvelables dans leurs configurations énergétiques respectives.

L'augmentation significative des énergies renouvelables reste basée sur des zones spécifiques comme l'Asie, les États-Unis et l'Europe.

Près de 60% des nouvelles capacités de création d'énergie renouvelable établies en 2023 ont été particulièrement mises en œuvre en Asie [10].

Dans une dizaine de pays, plus de la moitié de l'électricité est produite à partir de sources d'énergie renouvelables.

Des individus ayant des besoins électriques réduits se tournent plus fréquemment vers les énergies renouvelables.

Un exemple en est l'Islande, qui génère toute son électricité grâce à ses centrales géothermiques et hydrauliques.

L’Ethiopie (99,9%) et la Norvège (98%) dépendent également presque totalement de leurs infrastructures hydrauliques pour produire de l’électricité [23].

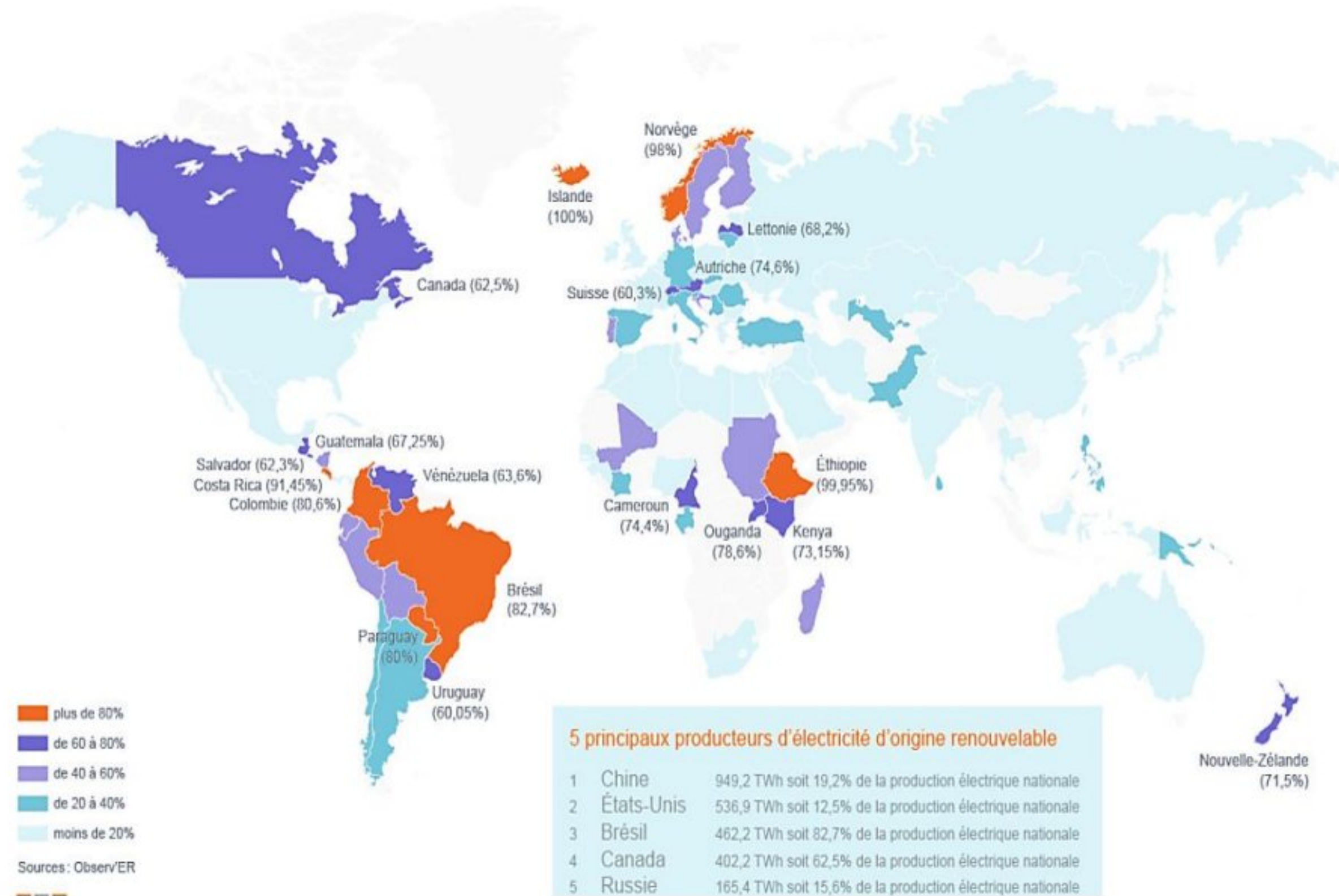


Figure 1. 8 Part de la production d’électricité d’origine renouvelable [10]

I.7 Conclusion

Dans ce segment, nous avons été en mesure de structurer nos réflexions sur l’état actuel des énergies renouvelables, que nous avons défini à travers leurs diverses provenances, avantages et inconvénients.

Nous avons également abordé la situation actuelle de cette énergie à l’échelle internationale. Dans le chapitre suivant, nous étudierons le fonctionnement des cellules solaires photovoltaïques ainsi que leurs caractéristiques.

Chapitre II : L'énergie

Solaire Photovoltaïque

II.1 Introduction

Dans le domaine des sciences, il existe un mot qui recouvre la réalité physique qui fait qu'un appel au rayonnement lumineux permet de produire une énergie électrique à partir de la lumière, au moyen d'un transfert d'énergie des photons aux électrons d'un corps [28].

C'est au milieu du dix-neuvième siècle (1839) que le physicien français A. Becquerel livre la réalité photovoltaïque, qu'expliquera plus tard Albert Einstein en 1905. C'est grâce à ce dernier qu'Einstein obtiendra en 1921 le prix Nobel de Physique [28], [33].

Photo dans PV provient du mot grec phos qui veut dire lumière, et volt provient de la famille du physicien Alessandro Volta (1745-1827) l'un des premiers à traiter l'électricité.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les cellules solaires photovoltaïques en précisant leurs principes de fonctionnement avec une explication approfondie du phénomène photovoltaïque, et les divers facteurs extérieurs qui ont leur incidence sur les cellules. Nous allons aussi exposer les divers paramètres électriques caractéristiques.

II.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'aptitude à convertir directement la lumière, notamment le rayonnement solaire, en énergie électrique a été révélé en 1954 avec la découverte de l'effet photovoltaïque. Ce phénomène exploite les caractéristiques quantiques de la lumière pour convertir l'énergie incidente en électricité, dont le composant fondamental de cette conversion photovoltaïque est la cellule solaire, appelée également photopile [34].

II.2.1 Effet photovoltaïque

Le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques repose sur l'effet photovoltaïque, consistant en l'absorption des photons au sein d'un matériau semi-conducteur, générant une tension électrique : le courant continu produit à partir du rayonnement solaire pourra alimenter un appareil ou charger une batterie [33].

La lumière du soleil est composée de photons transportant une énergie correspondant à chacune des longueurs d'onde de son spectre.

Un photon percute une cellule photovoltaïque, son énergie est transmise à un électron, faisant ainsi passer l'électron au-delà de son emplacement normal au sein de l'atome, donc faisant également apparaître un « trou » devenu partie d'un circuit dans lequel circule le courant. Ce phénomène est celui de la paire électron-trou [33].

Une cellule photovoltaïque se comporte en réalité comme une diode : elle est composée de deux couches de matériaux semi-conducteurs, dopés de façon à faire passer les charges négatives dans l'une des couches, alors que l'autre se voit affectée au transport des charges positives. Un champ électrique permanent existe au sein de cette cellule permettant de séparer les paires électrons-trous ainsi créé [35].

Le principe du bipôle diode permet ainsi, une fois la paire électron-trou créée, de séparer les charges positives des charges négatives (une différence de potentiel existe non seulement entre les couches N et P de la cellule mais aussi entre ces deux charges). Un courant électrique circule lorsque des contacts N et P sont reliés via une résistance externe (ampoule par exemple) [20].

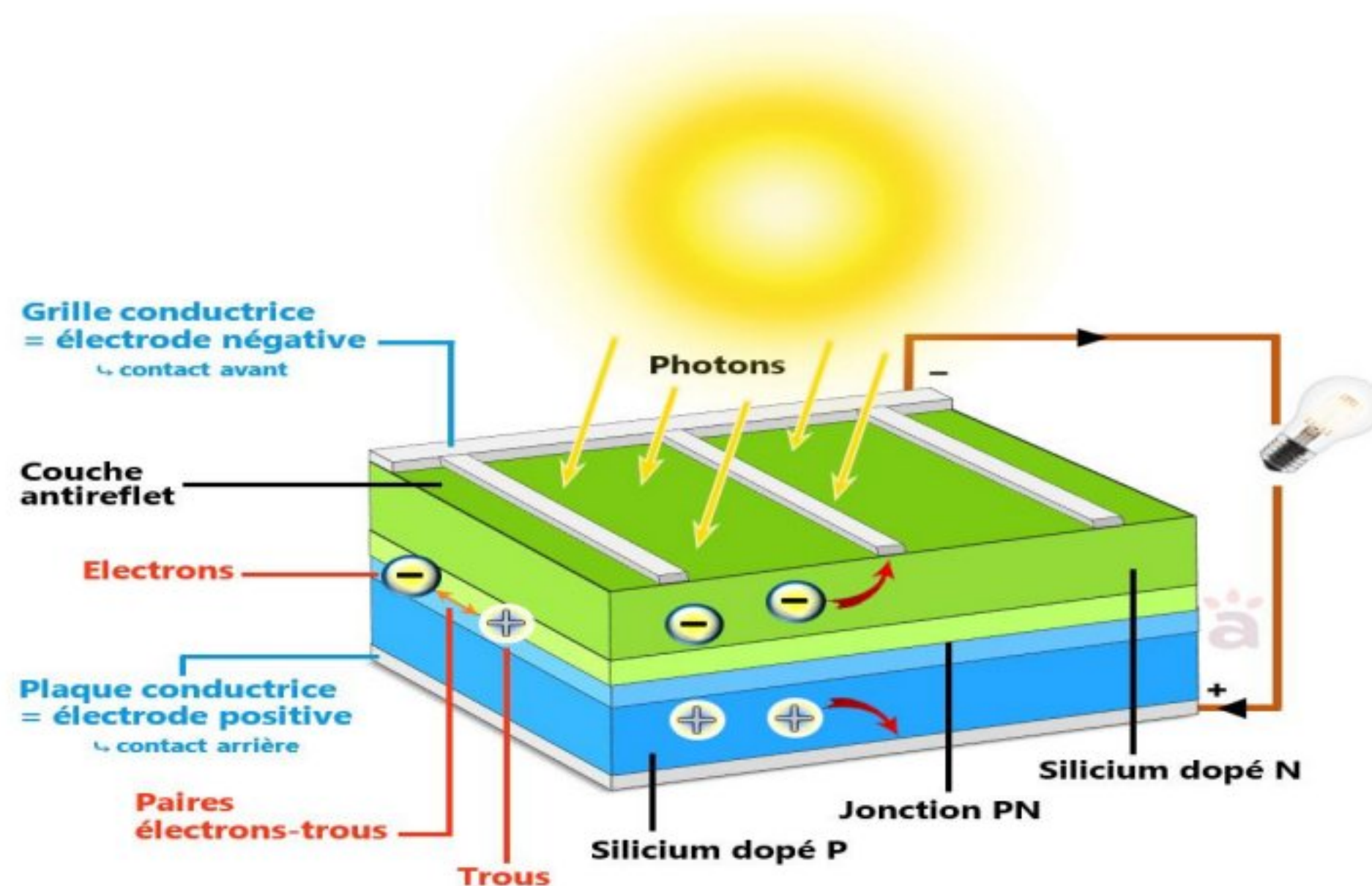


Figure 2. 1 principe de l'effet photovoltaïque [36]

II.2.2 Structure d'une cellule photovoltaïque

Pour mieux comprendre le fonctionnement, examinons la structure d'une cellule photovoltaïque basée sur une jonction P-N. Quand la première partie N entre en interaction avec la seconde partie P du même monocristal, les électrons majoritaires de la partie N se dispersent vers la partie P où ils sont en minorité, laissant ainsi des atomes donneurs (dopants de type N, comme le phosphore) chargés positivement derrière eux [37].

De même, les atomes du côté P (dopés avec des accepteurs, comme le bore) se déplacent vers le côté N, laissant en arrière des atomes qui se comportent comme des accepteurs de charge négative. À la jonction, une région de charge dépourvue de porteurs majeurs libres se constitue appelée zone de charge d'espace [36].

C'est dans cette zone de charge d'espace (ZCE) que se constitue un champ électrique interne qui perturbe alors le mouvement des porteurs majoritaires, ce qui va établir l'équilibre thermodynamique[34].

L'addition de contacts métalliques sur les régions n et p débouche sur l'établissement d'une diode. Ces contacts métalliques doivent permettre d'établir une liaison ohmique avec le semi-conducteur [28].

Quand la jonction est exposée à la lumière, les photons dont l'énergie est égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite transmettent leur énergie aux atomes. Chaque photon facilite le transfert d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction, tout en créant un trou mobile, engendrant ainsi une paire électron-trou [28].

Si une charge est connectée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N se dirigent vers les trous de la zone P par le biais de la liaison externe, créant ainsi une différence de potentiel (DDP) [34], [37].

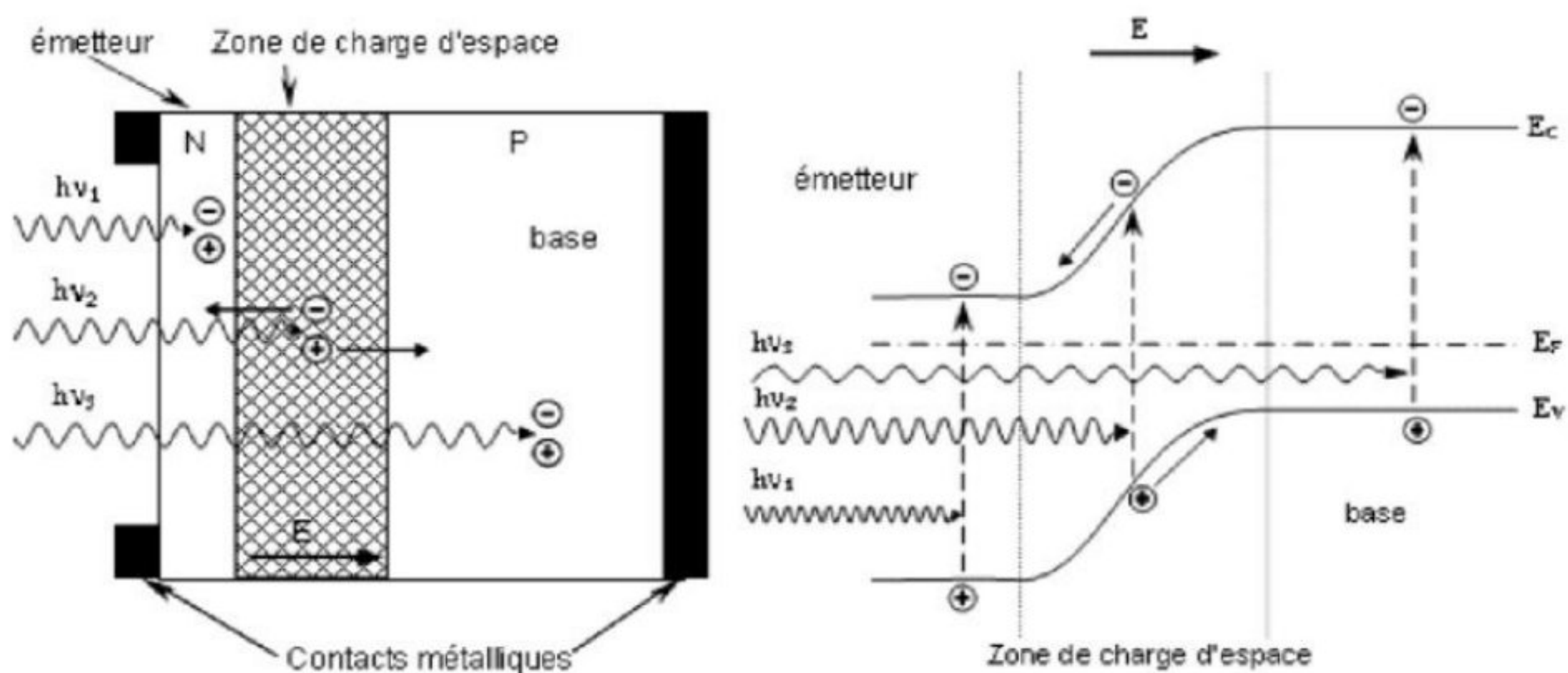


Figure 2. 2 Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque [38]

II.2.3 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque est constitué d'un générateur de courant qui simule l'illumination et d'une diode en parallèle qui représente la jonction PN. Cependant, le schéma équivalent réel prend en considération l'impact des résistances parasites dues à la production, illustré sur le schéma par deux résistances [34].

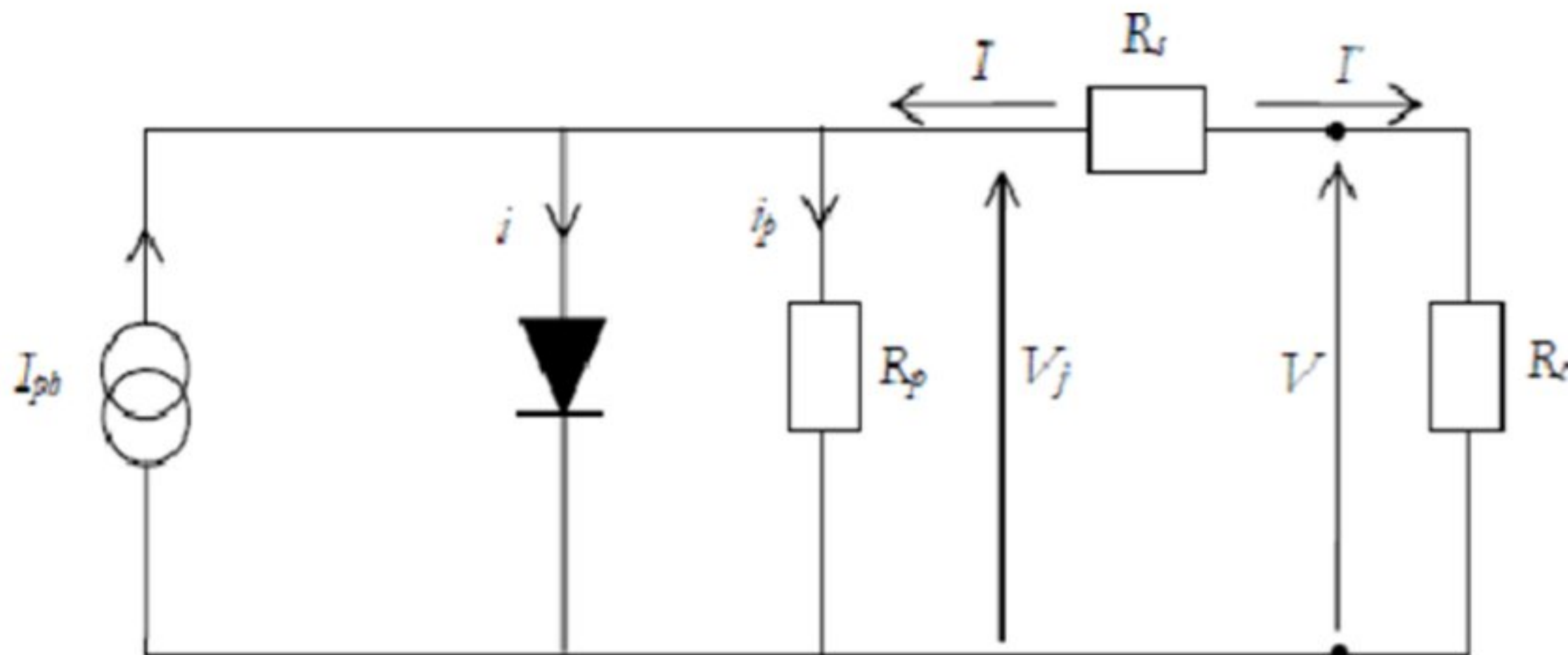


Figure 2. 3 Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque avec résistance série et Shunt [39].

Ce schéma inclut :

- Un générateur de courant (I_{ph}) : produit un courant correspondant au courant photo-généré.
- Une diode (D) : elle représente la jonction P-N.
- Une résistance en série R_s : elle représente les pertes de résistance dans la cellule photoélectrique.
- Une résistance en parallèle (appelée résistance shunt R_{sh}) : correspond à une résistance de fuite se situant entre les deux zones N et P de la jonction.

Il s'ensuit qu'un segment du courant I_{ph} sera déviée par cette résistance et ne pourra donc pas être fournie à la charge. Il faudra que cette résistance soit aussi grande que possible.

II.2.4 Conversion de la lumière en électricité

Le principe selon lequel les cellules photovoltaïques fournissent du courant électrique repose sur l'effet photoélectrique, consistant à forcer les électrons et les « trous libres » à être affectés chacun à une face opposée du matériau, au lieu de se recombiner naturellement.

Pour comprendre la conversion photovoltaïque, il est crucial de saisir trois processus physiques qui se déroulent dans les matériaux impliqués, tel que l'illustre le diagramme ci-après :

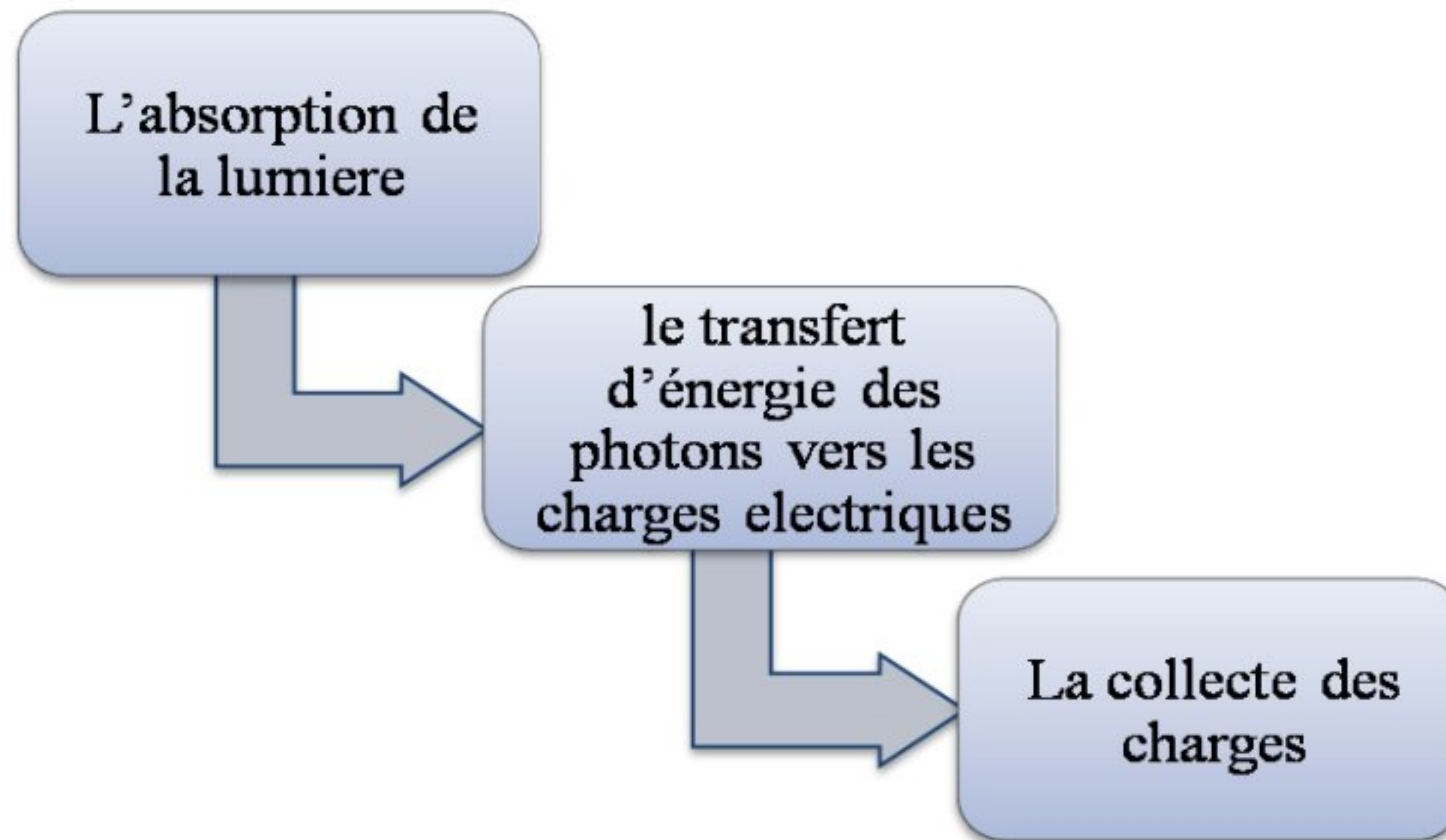


Figure 2. 4 Diagramme de la transformation de la lumière en électricité.

II.2.4.1 L'absorption de la lumière :

La lumière est formée de photons qui peuplent l'onde électromagnétique et qui ont une certaine énergie selon leur longueur d'onde [37].

L'absorption est un phénomène au moyen duquel le matériau acquiert l'énergie d'un photon pour la transformer en une autre forme d'énergie, selon l'équation ci-dessous :

$$E = h \frac{C}{\lambda} \quad 2.1$$

Ou :

- h : constante de Planck ($6.662 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ Kg/s}$)
- C : vitesse de la lumière
- λ : La longueur d'onde

II.2.4.2 Le transfert d'énergie des photons vers les charges électriques :

Les photons qui sont absorbés transfèrent leur énergie aux électrons périphériques (les plus éloignés du noyau) qui sont ainsi libérés de l'attraction finale de leur noyau.

Ces électrons excités passent alors de la bande de valence vers la bande de conduction, ce qui leur permet de circuler librement à l'intérieur du matériau et de constituer un courant électrique lorsqu'ils sont dirigés vers les contacts externes.

L'électron libéré laisse alors un « trou » qui a une charge positive. Quand cet électron est recruté au-dehors, c'est l'électron d'un atome voisin qui vient combler ce trou, créant ainsi un autre trou, et ainsi de suite.

Cela se traduit par une circulation de charges élémentaires, d'électrons dans un sens et de trous dans l'autre sens, soit le courant électrique [37].

II.2.4.3 La collecte des charges :

Les charges libérées par l'illumination doivent circuler pour pouvoir générer de l'énergie, elles doivent donc être « attirées » hors du matériau semi-conducteur, dans un circuit électrique.

Cette extraction des charges s'effectue au sein d'une jonction créée dans le semi-conducteur. Le champ électrique au niveau de la jonction permet de séparer les charges négatives et positives. Il empêche la recombinaison des électrons et des trous et guide les charges vers les contacts externes.

L'objectif de cette jonction est de générer un champ électrique à l'intérieur du matériau, pour entraîner d'un côté les charges négatives et de l'autre les charges positives. Le dopage du semi-conducteur permet d'accéder à cette extraction des charges.

Dans le cas d'une photopile au silicium, la jonction est établie entre une région N dopée par du phosphore et une région P dopée par du bore.

Un champ électrique est alors établi à l'interface de ces deux régions, dans la jonction P-N, pour séparer les charges positives et négatives.

Ce dopage va en effet permettre d'amener les charges excédentaires à améliorer la conduction dans le semi-conducteur [37].

II.2.5 Conditions de fonctionnement optimales

II.2.5.1 Irradiation solaire

Dans le domaine de l'énergie solaire et de l'énergie photovoltaïque, l'irradiation est un élément clé pour calculer l'énergie solaire disponible en un endroit donné afin de déterminer la puissance potentielle des panneaux solaires ou d'autres dispositifs solaires [40].

Les deux types principaux d'irradiation solaire sont :

- l'irradiation horizontale globale (GHI) :

Elle représente le rayonnement total reçu dans la lumière du soleil sur une surface horizontale.

- l'irradiation normale directe (DNI) :

Elle correspond à la quantité de rayonnement solaire provenant du rayonnement solaire direct frappant une surface perpendiculaire.

II.2.5.2 Rendement photovoltaïque

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est le rapport entre la puissance électrique produite par la cellule et la puissance lumineuse apportée à la cellule. La puissance électrique créée, souvent exprimée en Watt crête (Wc), étant un pourcentage de la puissance solaire reçue par la cellule.

Pour définir le rendement, les cellules, réunies en modules puis en panneaux, sont étalonnées en étant mises face à un simulateur solaire, lequel recrée les conditions optimales d'ensoleillement de 1 000 W de lumière par mètre carré et de température ambiante de 25° C [28].

II.2.5.3 Influence géographique

Dans des conditions réelles, la quantité d'électricité produite par la cellule, est définie comme le « produit d'électricité », dépendra non seulement du rendement tout au long de l'année mais aussi du niveau d'ensoleillement moyen dans la région sur l'année.

Un panneau à rendement identique produira trois fois plus d'électricité dans le désert du Sahara que dans d'autre région du nord [28].

II.2.5.4 Variabilité climatique

Les éléments atmosphériques tels que les nuages, les particules en suspension et la vapeur d'eau influencent de manière importante l'ensoleillement.

On utilise des techniques de correction atmosphérique et des modèles sophistiqués pour prendre en compte ces éléments et obtenir des évaluations précises de ces ressources solaires [40].

II.2.5.5 Contraintes du site

L'irradiation solaire peut être modulée de manière significative grâce aux caractéristiques du terrain (reliefs, inclinaisons, obstacles) et par les ombres des ouvrages à proximité [40].

II.3 Caractéristiques électriques des cellules solaires

II.3.1 Courant de court-circuit (I_{cc})

La grandeur notée ici I_{cc} , c'est-à-dire le courant de court-circuit dans la cellule qui est en mA est le courant qui circule dans la cellule sous éclairement lorsqu'on ne lui applique aucune tension extérieure (en prenant $V=0$ dans le schéma de l'équivalent) [37].

Il s'élève linéairement avec le niveau d'illumination de la cellule et il est fonction de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs de charges et de la température [36].

La formule suivante illustre l'intensité du court-circuit I_{cc} :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \times \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s I_{cc})}{nKT} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad 2.2$$

Avec :

- I_{cc} : courant de court-circuit.
- I_{ph} : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement.
- I_s : courant de saturation.
- R_s : résistance série du générateur solaire.
- R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire.

Pour un éclairement standard (1 kW/m^2), la résistance série a un impact très faible. Dans ce cas le courant de court-circuit peut être considéré comme égal au photo-courant I_{ph} , d'où le fait qu' I_{cc} est proportionnel à l'éclairement Φ [40].

$$I_{cc} = I_{ph} = c \Phi \quad 2.3$$

Où :

- C : constante.
- Φ : Flux solaire

II.3.2 Tension en circuit ouvert (V_{oc})

La tension à vide exprimée en millivolts, est mesurée en circuit ouvert sans circulation de courant à travers la cellule. Elle dépend de la différence des travaux des électrodes et de la résistance Shunt, de la température, de l'éclairement [36].

Elle est exprimée par la relation :

$$V_{co} = V_{th} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad 2.4$$

Ce qui correspond aux bornes de la cellule lorsque le courant fourni par la cellule solaire est nul.

II.3.3 Point de puissance maximale

Il émerge l'idée selon laquelle la puissance fournie par une cellule solaire est optimale lorsque le produit $V \times I$ est le plus grand. Si V_m et I_m sont, pour leur part, la tension et le courant pour lesquels a lieu ce maximum, la puissance maximale est donc la surface du plus grand rectangle de côté V_m et I_m qu'on peut placer sous la courbe $I(V)$ [41].

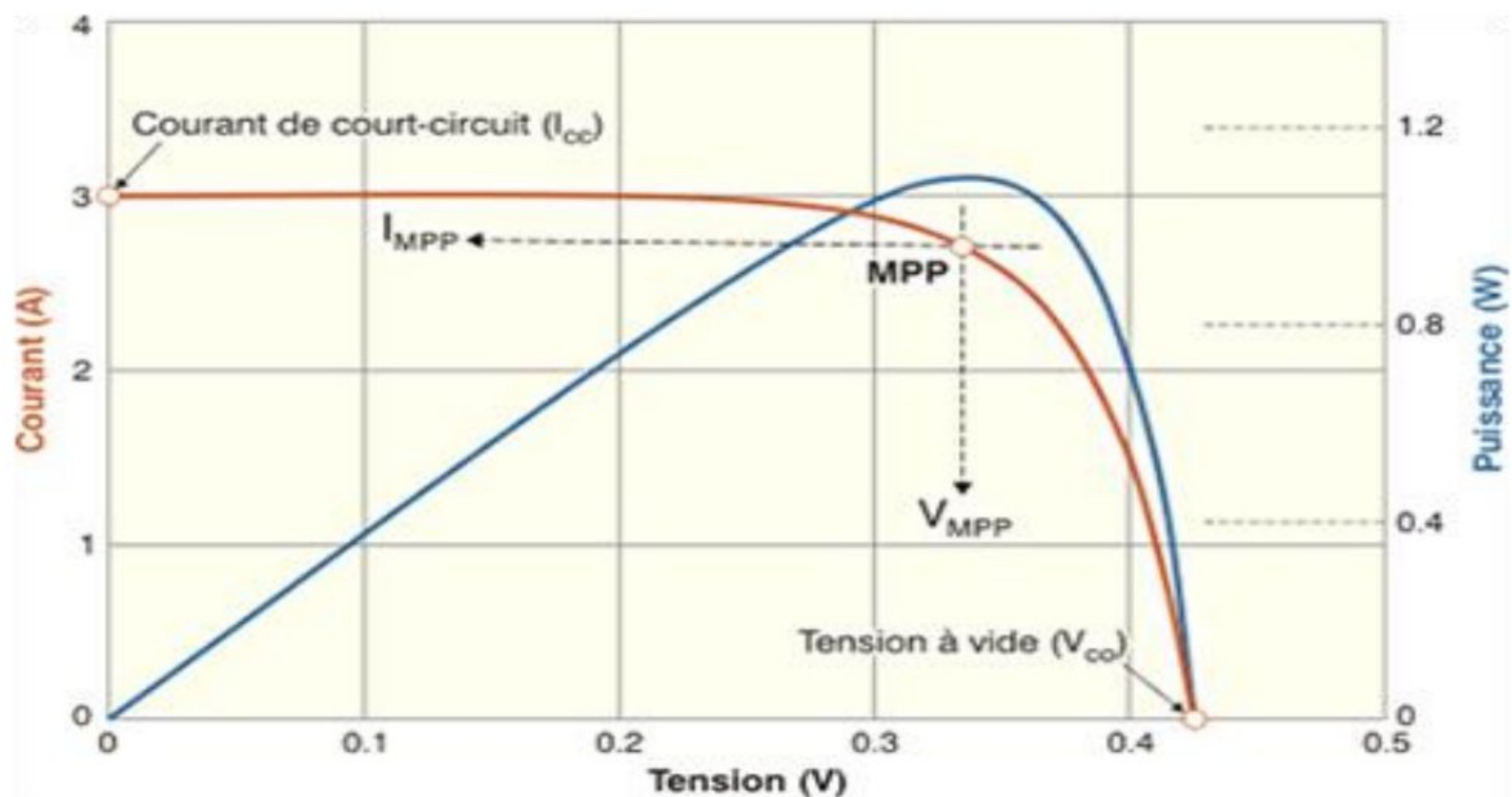


Figure 2. 5 Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque [42]

II.3.4 Facteur de forme (FF)

Les valeurs V_{max} et I_{max} sont déterminées afin que le produit $|V_{max} \cdot I_{max}|$ soit maximal. Ce produit représente la puissance maximale P_{max} que la cellule photovoltaïque peut délivrer, obtenue au point P_{max} en faisant varier la valeur de la résistance externe, lorsque l'aire du rectangle défini par les axes Ox , Oy et les droites $x=I_m$ et $y=V_m$, est maximale [37].

Le facteur de forme (FF) « en anglais : Fill Factor » est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale et son produit ;

D'où :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad 2.5$$

Ce paramètre entre 0 et 1 (exprimée en %) caractérise la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique I-V de la cellule solaire. Si celle-ci était carrée le Fill Factor serait égale à 1, généralement le Fill Factor prendra des valeurs comprise entre 0.6 et 0.85. Au fur et à mesure que le facteur de forme augmente, le rendement de conversion augmente également [41].

En dehors de ce point de fonctionnement particulier P_m , le phénomène de recombinaison baisse le courant à des points de fonctionnement où $V_x > V_m$ et des pertes de chaleur (effet joule) dans les résistances séries apparaissent si $I > I_m$ [37].

II.3.5 Rendement de conversion (η)

Le rendement de conversion est indiqué en pourcentage et se réfère à la performance de la conversion en matière de puissance. Il s'agit du rapport entre la puissance maximale générée par la cellule et la puissance du rayonnement solaire reçu par celle-ci [37].

Si S représente la surface de la cellule (en m^2) et E correspond à l'éclairement-irradiante (en W/m^2). On exprime le rendement énergétique comme suit :

$$\eta = \frac{P_m}{P_{inc}} S \quad 2.6$$

- P_{inc} : puissance incident ;
- S : Surface de la cellule photovoltaïque ;

Avec :

$$P_m = FF * I_{cc} * V_{co} \quad 2.7$$

$$\eta = \frac{FF * I_{cc} * V_{co}}{P_{inc}} * S \quad 2.8$$

Donc :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{FF * I_{cc} * V_{oc}}{P_{inc}} \quad 2.9$$

On peut optimiser ce rendement en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [37].

II.4 Association série et parallèle des cellules

Un générateur photovoltaïque est le résultat de l'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série ou en parallèle [31].

Lorsque les cellules sont connectées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, entraînant une augmentation de la tension totale du générateur. De plus, si les cellules sont connectées en parallèle, le courant augmentera [43].

II.4.1 Association en série

Une série de cellules assemblées (N_s) aide à augmenter la tension du générateur photovoltaïque [43].

On fait circuler le même courant à travers les cellules et la caractéristique résultante de l'arrangement en série est obtenue en cumulant les tensions individuelles de chaque cellule [44].

Les graphes suivants démontrent les caractéristiques résultantes ($I_{cc}N_s$, $V_{co}N_s$) acquises en connectant en série (indice s) un certain nombre N_s de cellules identiques (I_{cc} , V_{co}).

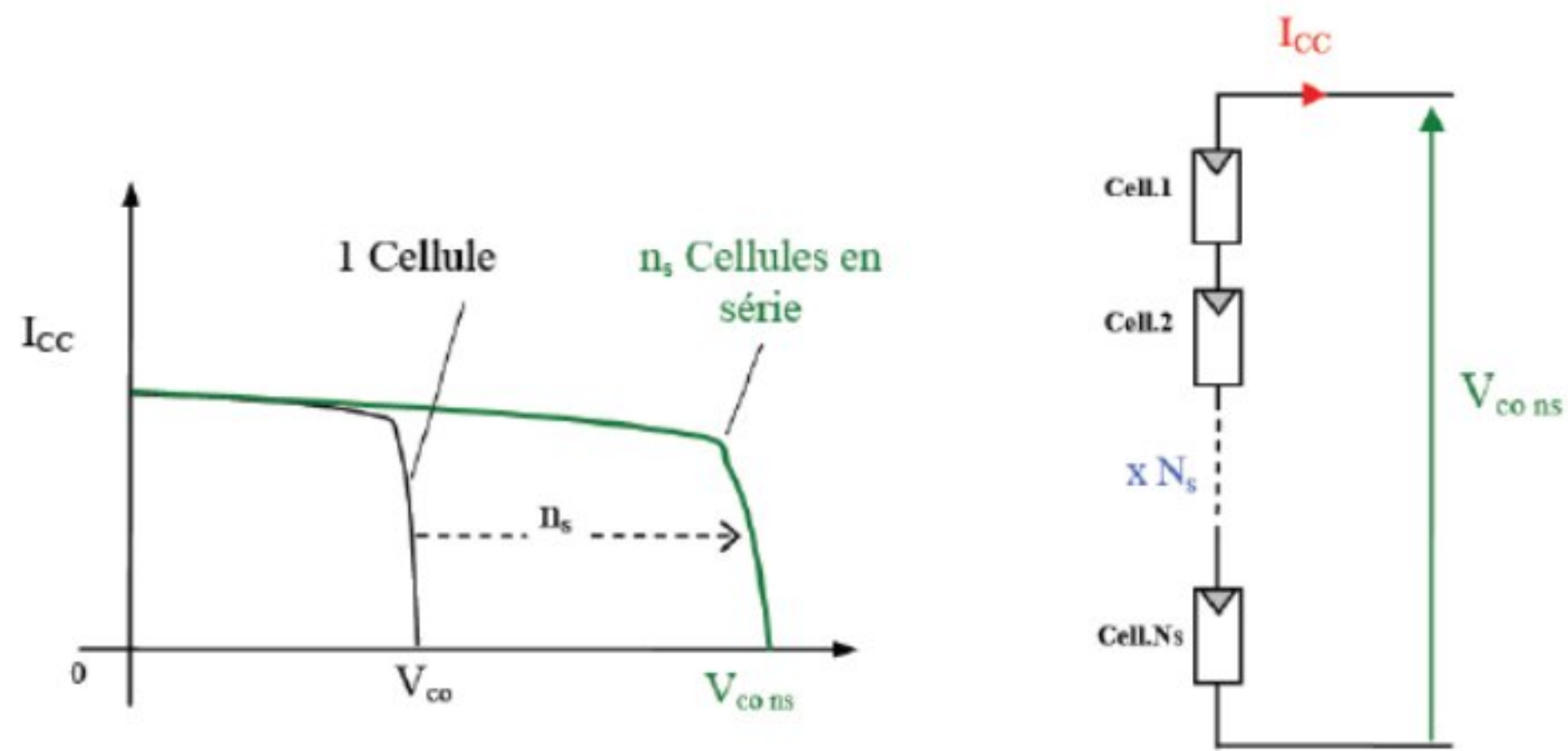


Figure 2. 6 Caractéristique résultant d'un groupement de N_s cellule en série [45]

Les équations ci-dessous résument les caractéristiques électriques d'une conjonction en série de cellules (N_s) [43].

$$V_{coNs} = N_s \times V_c \tag{2.10}$$

$$I_{cc} = I_{ccNs} \tag{2.11}$$

Où :

- V_{coNs} : l'addition des tensions en circuit ouvert pour N_s cellules connectées en série.
- I_{ccNs} : Le courant de court-circuit pour N_s cellules également en série.

II.4.2 Association en parallèle

Les caractéristiques du regroupement en parallèle des cellules sont l'inverse de celles du regroupement en série.

Dans un assemblage de cellules connectées en parallèle, toutes les cellules sont exposées à la même tension, et la caractéristique globale du regroupement est déterminée par l'addition des courants pour une tension spécifique [44].

Les illustrations ci-après présentent les caractéristiques obtenues (I_{pcc} , V_{pco}) en combinant en parallèle (indice p) N [43].

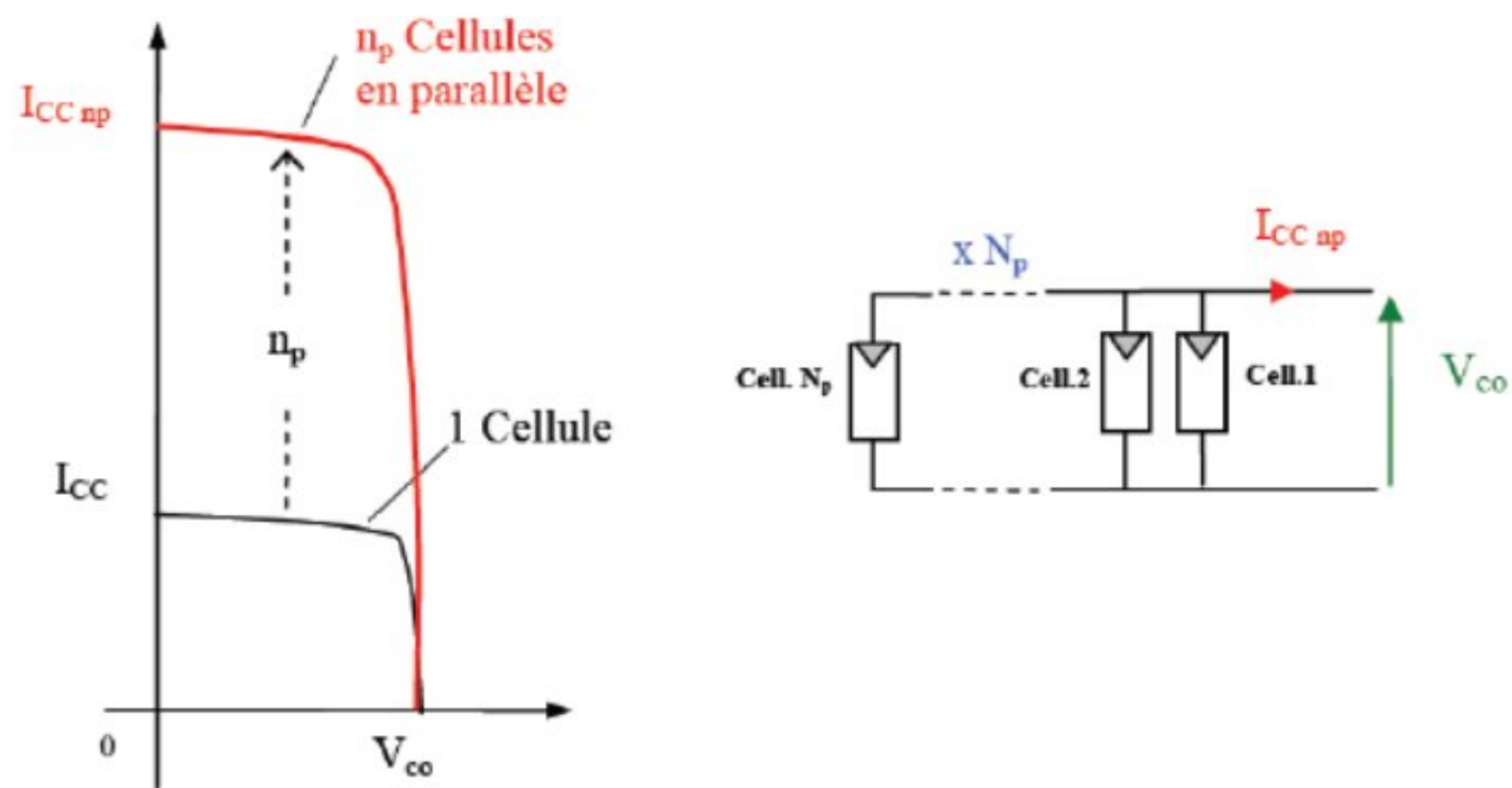


Figure 2. 7 Caractéristiques résultant d'un groupement en parallèle de N_p cellule [46]

Avec :

$$I_{ccNp} = N_p \times I_{cc} \quad 2.12$$

$$V_{co} = V_{coNp} \quad 2.13$$

Où :

I_{ccNp} : la somme des courants de court-circuit des cellules N_p connectées en parallèle

V_{coNp} : la tension en circuit ouvert pour les cellules N_p également disposées en parallèle.

II.4.3 Association hybride (série/parallèle)

L'assemblage hybride améliore simultanément le courant de court-circuit global et la tension de circuit ouvert totale.

La courbe caractéristique courant/tension d'un générateur photovoltaïque peut être théoriquement déterminée par la combinaison en série et en parallèle des cellules élémentaires prévues identiques qui le constituent, selon le rapport N_s par rapport à l'axe des tensions et le rapport N_p par rapport à l'axe des courants. N_s et N_p représentent respectivement le nombre de cellules disposées en série et en parallèle [47].

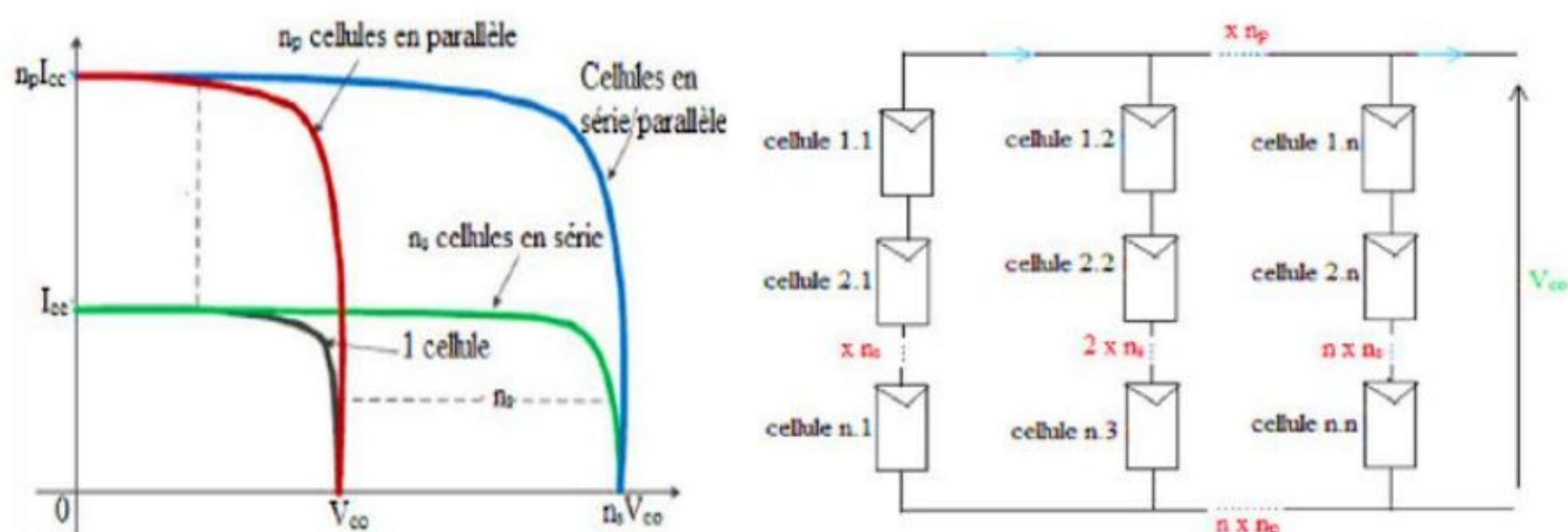


Figure 2. 8 Caractéristique résultant d'un assemblage série/parallèle de N_s et N_p cellule [47].

Les formules suivantes fournissent les valeurs de courant de court-circuit total et de tension à vide totale [43] :

$$I^{tcc} = N_p \times I_{cc} \tag{2.14}$$

$$V^{tco} = N_s \times V_{co} \tag{2.15}$$

En fonction de la configuration en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{co} peuvent varier considérablement.

Le comportement général d'un générateur photovoltaïque composé de plusieurs cellules est comparable à celui d'une cellule élémentaire, à condition qu'il n'y ait pas de disparité entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

II.5 Module photovoltaïque

Les panneaux solaires sont composés d'un assemblage de cellules. Ces cellules peuvent être reliées en série ou en parallèle. La liaison en série des cellules facilite l'augmentation de la tension globale, alors que le raccordement en parallèle sert à augmenter le courant [31].

La majorité des panneaux disponibles sur le marché se composent de 36 cellules en silicium cristallin [30].

II.5.1 Panneau solaire

Étant donné la tension modeste générée par une cellule photovoltaïque (environ 0,5 V) et sa capacité de puissance restreinte, il est essentiel d'en réunir plusieurs. Ainsi, nous parvenons à obtenir un panneau solaire [48].

L'arrangement en série des cellules accroît la tension, tandis que leur configuration en parallèle favorise une augmentation du courant. Par conséquent, il est possible d'avoir un générateur photovoltaïque qui convient aux applications souhaitées [47].

Les caractéristiques I-V d'un panneau solaire varient en fonction de la température et de l'irradiante, tout comme c'est le cas pour une seule cellule solaire. Le rendement des panneaux solaires est aussi affecté par d'autres éléments essentiels, comme l'environnement, l'emplacement, la qualité de surface et les ombres incomplètes [43].

L'intensité du courant de court-circuit I_{cc} et la tension à circuit ouvert V_{co} varient en fonction de la configuration des cellules (série ou parallèle) [45].

En règle générale, un module photovoltaïque contient 36 ou 72 cellules agencées en série. Cependant, ce nombre peut être adapté selon les besoins spécifiques. On rencontre aussi bien des modules composés de 40, 54, 72 voire même 96 cellules en série [30].

Les cellules sont interconnectées en série pour constituer une unité PV. Chaque unité est par la suite branchée en antiparallèle avec une diode de dérivation afin d'empêcher un fonctionnement inversé (par exemple, lors d'une ombre) [47].

Il serait idéal de connecter une diode by-pass par cellule, cependant, cette approche est rarement utilisée en raison de sa complexité et de son coût prohibitif. Il est possible de mettre en place deux configurations différentes pour l'installation des diodes by-pass [31].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, en mettant l'accent sur l'effet photovoltaïque, mais aussi nous avons expliqué la mise en place des cellules photovoltaïques et leurs conditions optimales.

Ensuite, nous avons examiné les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et leurs différents arrangements.

A la fin de ce chapitre nous nous sommes intéressés au module photovoltaïque.

**Chapitre III : Intégration
des Systèmes
Photovoltaïques dans les
Télécommunications**

III.1 Introduction

L'approvisionnement en énergie électrique des infrastructures de télécommunication, notamment sur les sites en milieu rural ou isolés, se révèle le délicat, compte tenu de l'absence ou de l'instabilité des réseaux électriques classiques d'autre part, et le recours aux groupes électrogènes soit alimentés en combustibles fossiles est peu fiable, coûteux et polluant, d'autre part [49], [50].

Dans cette situation, l'énergie solaire photovoltaïque apparaît comme un moyen propre, économique et durable, qui est d'autant plus au portée des territoires au fort ensoleillement pour alimenter en énergie électrique les stations de base / répéteurs / antennes relais à distance des centres de consommation [51], [52].

Les systèmes photovoltaïques permettent en effet une alimentation totalement autonome (isolée) ou hybride, qui consomme d'autres sources d'énergie, et surtout, l'intégration de cette technologie dans le secteur des télécommunications participe d'une logique environnementale dans la mesure où elle s'inscrit dans les dispositifs globaux d'inversion de la tendance à la diminution des émissions polluantes et de la diminution des coûts d'exploitation[53], [54].

Ce chapitre aura pour objectif d'établir un panorama du solaire dans les télécommunications autonome, de ses différentes applications concrètes et des profils énergétiques des équipements concernés, mais aussi des enjeux techniques.

III.2 Rôle de l'énergie solaire dans les systèmes autonomes télécommunications

III.2.1 Contexte et justification de l'utilisation du solaire

La forte poussée de l'expansion des réseaux de télécommunications, notamment en zone rurale et isolée, est à l'origine de préoccupantes difficultés pour assurer l'alimentation électrique de ces équipements. En effet, dans de certaines régions, le raccordement au réseau électrique est inexistant ou peu fiable, conduisant à une priorité accordée à l'adoption de solutions d'alimentation autonomes sur lesquelles l'énergie solaire photovoltaïque s'affiche comme une des formes de production d'électricité très crédibles [49].

Afin de soutenir l'utilisation du solaire photovoltaïque, il est d'abord opportun de mentionner la bonne capacité d'irradier du rayonnement solaire dans de nombre de zones géographiques et particulièrement dans les régions intertropicales où la ressource est largement disponible. cette forme de production de l'électricité va pouvoir alimenter diverses puissances et besoins en énergie , tous adaptables grâce à des systèmes photovoltaïques modulaires, en capacité de satisfaire les besoins d'alimentation électrique de stations de base de communication, tel GSM ou 5G, wifi, mais aussi des systèmes de surveillance ou de divers capteurs [49].

Des investigations réalisées dans certains pays fournissent la preuve que, du point de vue énergétique, les systèmes photovoltaïques permettent de satisfaire les besoins en énergie des tours de télécommunication situées en milieu rural et désertique (dans plus de 90 % des cas) tout en réduisant la dépendance des dispositifs sur générateurs diesel [52]. Dans d'autres régions, la problématique n'est plus technique, mais économique : l'électrification solaire des infrastructures isolées en réseaux, peut s'avérer un bon placement, avec des retours sur investissements inférieurs à 5 ans [51].

III.2.2 Avantages énergétiques et économiques

Les systèmes solaires assurent l'autonomie par rapport aux réseaux électriques conventionnels et aux sources d'énergie fossile. Les panneaux photovoltaïques, une fois en place, apportent une source d'énergie renouvelable, inépuisable, silencieuse et de bonne fiabilité au long cours [50].

III.2.3 Contribution à la durabilité environnementale

La meilleure solution, pour réduire l'impact sur l'environnement des systèmes de télécommunications, est bien les énergies solaires photovoltaïque, là où les groupes électrogènes Diesel émettent des polluants, à savoir du CO₂ [52], alors que l'énergie photovoltaïques est propres et non polluants, du fait de son processus de production d'énergie. Il s'agit également de sources d'énergie moins bruyantes et donc moins polluantes auditivement, ce qui est devenu de plus en plus nécessaire à prendre en compte dans les espaces urbains habités.

III.2.4 Comparaison avec les systèmes d'alimentation traditionnels

Dans le domaine des communications et des réseaux, les systèmes énergétiques classiques (groupes électrogènes diesel, raccordé au réseau électrique public, etc.) montrent plusieurs limites. Le caractère régulier de l’approvisionnement en carburant des générateurs induit d’importantes charges logistiques et des risques d’interruption pour ces systèmes [54].

À l’inverse, le réseau électrique est sujet parfois à des coupures répétées surtout dans les pays en développement, les systèmes solaires à batteries de stockage sont plus autonomes et mieux résilients que le réseau en cas d’accident subit [55].

Le tableau 3.1 résume l’essentiel des différences existantes :

Critère	Solaire photovoltaïque	Générateur Diesel	Réseau électrique
Coût d'exploitation	Très faible	Élevé	Variable
Fiabilité en zone isolée	Élevée (avec stockage)	Moyenne (dépend du carburant)	Faible à moyenne
Maintenance	Faible	Fréquente	Dépend de l’infrastructure
Impact environnemental	Très faible	Fort (émissions, bruit)	Variable
Autonomie	Élevée	Moyenne à élevée	Faible en zones non couvertes

Tableau 3. 1 Comparaison des solutions d’alimentations pour les infrastructures télécoms en zones isolées

Il est à noter que dans certains cas, les coûts logistiques comme le transport du diesel peuvent représenter 70 % des coûts d’exploitation alors qu’à l’opposé, la part de la maintenance serait de moins de 10 % pour un système photovoltaïque [54].

III.2.5 Typologie des architectures énergétiques Telecom-PV

La réussite de l'intégration de l'énergie photovoltaïque au profit des équipements de télécommunication repose sur le choix d'architectures énergétiques diverses conçues pour émerger des exigences géographiques, économiques, techniques et opérationnelles.

Cette typologie est principalement fondée sur quatre critères essentiels : le niveau d'autonomie énergétique souhaité ; l'existence d'un stockage ; la nature de l'ensemble des sources d'énergies combinées ; le mode de raccordement au réseau électrique fourni.

Ce qui permet d'identifier plusieurs configurations types : systèmes totalement autonomes (off-grid), micro-réseaux (microgrids) intelligents mutualisés, systèmes hybrides et systèmes connectés au réseau avec secours local.

III.2.5.1 Architecture off-grid (autonome)

Les systèmes énergétiques produits en autoconsommation, cependant, dits « off-grid », sont totalement autonomes, totalement excentrés du réseau électrique, car ils ne bénéficient que de l'énergie solaire dont le site a besoin, le stockage utilitaire étant effectué par une batterie durant la nuit ou les jours très nuageux.

Ces architectures composées de panneaux photovoltaïques, de contrôleur de charge MPPT, d'onduleur DC/AC ou DC/DC et d'unités de stockage sont principalement installées en zones rurales ou isolées pour alimenter des stations BTS en montagne, des relais de sécurité, des réseaux de suivi de points d'eau, etc. Mais cela traite de la règle de l'art pour une capacité à dimensionner au pire climat avec un coût initial plus élevé (en rapport qualité prix) de l'installation, notamment en rapport aux batteries et à une maintenance plus lourde [49, 51,52].

III.2.5.2 Architecture hybride (PV + générateur ou autre source)

Hybride, c'est ainsi que l'on désigne cette catégorie de configuration d'architecture composée d'un dispositif de source d'énergie renouvelable photovoltaïque associée à un ou plusieurs autres dispositifs de sources à dynamique spécifique (générateurs diesel, éolien ou micro-hydraulique,...), par un système de gestion de l'énergie (EMS – Energy management system) préconisant d'en faire bon usage par le biais d'un arbitrage des sources et d'une optimisation de l'utilisation.

Ces systèmes se trouvent alors, selon les cas, couplés à des sites critiques ou des zones semi-urbaines, permettant une importante réduction de consommation de carburants fossiles

(jusqu'à 70 % d'économie de diesel), au bénéfice de la prise en charge d'un besoin d'automatisation des installations sensibles (réseau militaire, ferroviaire,...), à laquelle le caractère incontournable des automates industriels (PLC) est indissociable [50,55].

III.2.5.3 Architecture grid-connected avec back-up solaire

Ce modèle de production photovoltaïque décentralisé est assujéti à un réseau public. C'est dire qu'un système de secours (type batterie et parfois groupe électrogène) est incontournable pour faire face aux besoins en cas de coupure du réseau, si ce n'est pour l'alimentation de ceux-ci, puisque le réseau public est ainsi, du moins quand le raccordement s'opère à titre gratuit. Un onduleur bidirectionnel (ou smart inverter) et un SCADA (supervision et contrôle des moyens de production) complètent habituellement ce dispositif. C'est un schéma à rechercher dans des réseaux instables ou coupés de façon fréquente, pour réduire le coût du stockage tout en demeurant dans le niveau de continuité du service [49,54].

III.2.5.4 Architecture micro-grid photovoltaïque télécom

Le micro-réseau est un réseau d'électricité local autonome, constitué de plusieurs unités d'usage (par exemple : stations de télécommunications, écoles, centres de santé) alimentées par un champ solaire commun, mutualisant les batteries. Le Système de Gestion de l'Energie animera dynamiquement le pilotage en temps réel de ces flux. Ce modèle présente les avantages de l'économie d'échelle, de la résilience locale, de la flexibilité d'intégrer d'autres sources d'énergie renouvelable (biogaz, petite hydraulique, etc.) et pourra s'appliquer dans les zones rurales ou systèmes de développement communautaire [51-53].

III.2.5.5 Architecture PV mobile (déploiement rapide)

Les architectures mobiles, aussi connues comme systèmes de déploiement rapide, se composent d'unités solaires transportables, qui peuvent être assemblées dans des valises, conteneurs ou véhicules. Elles sont spécialement conçues pour l'urgence : télécommunications d'urgence, interventions humanitaires ou militaires. Il est possible de faire fonctionner le déploiement sans carburant et d'intégrer immédiatement à des relais VSAT, des antennes à courte durée de vie ou des réseaux de radio mobile [49].

Architecture	Principe	Éléments clés	Avantages	Inconvénients / Contraintes	Applications typiques
Off-Grid (Autonome)	Fonctionnement indépendant du réseau	PV + batteries + contrôleur MPPT + onduleur (ou DC-DC)	Autonomie totale, idéal pour zones sans réseau	Coût initial élevé, dépendance au stockage, maintenance des batteries	BTS rurale, répéteurs isolés, systèmes d'alerte
Hybride (PV + Diesel ou autre)	PV couplé à un générateur (ou autre source renouvelable)	PV + générateur diesel ou éolien + EMS ou PLC	Fiabilité accrue, réduction carburant, automatisation possible	Coûts liés au carburant ou à la maintenance du générateur	Sites critiques, zones semi-rurales, usage militaire
Grid-Connected avec Back-up	Connecté au réseau avec secours solaire	PV + onduleur bidirectionnel + réseau public + batterie/générateur en secours	Réduction de la facture, haute disponibilité, monitoring intelligent	Dépendance au réseau, pas totalement autonome	Zones urbaines à réseau instable
Microgrid Télécom PV	Réseau local partagé, multi-usager	Champ PV central + stockage partagé + EMS	Résilience locale, économies d'échelle, mutualisation des ressources	Complexité de gestion, dépendance à un EMS fiable	Villages connectés, sites communautaires, hubs IoT
Mobile PV (déploiement rapide)	Système transportable et autonome	PV portable (valises, conteneurs, remorques) + batteries intégrées + interfaces radio/VSAT	Installation rapide, pas besoin de carburant, idéal pour urgences	Puissance limitée, durée de service courte sans recharge	Télécoms d'urgence, catastrophes naturelles

Tableau 3. 2 Comparaison des architectures énergétiques pour les installations télécoms alimentées par photovoltaïque

III.3 Applications et apports des systèmes photovoltaïques en télécommunications

Les nécessités évolutives de connectivité telle qu'on les connaît en milieu rural et éloigné ou sinistrée se traduisent dans les réalités de mise en œuvre de solutions d'alimentation à la fois robustes, fiables et écologique.

En fournissant à la fois une énergie renouvelable, modulaire et autonome, les systèmes photovoltaïques (PV) s'avèrent à même de répondre aux besoins des infrastructures télécoms modernes en termes d'accompagnement de la continuité de service mais aussi de réduction du recours à des générateurs thermiques et au pétrole ou au combustible fossile.

III.3.1 Alimentation des stations de base (BTS) en zones rurales

L'énergie solaire trouve dans la télécommunication l'une de ses plus importantes applications, auxquelles participe l'émission des stations de base, solution acérée puisque ces dernières ont besoin d'une alimentation instantanée et stable afin d'assurer correctement leur fonctionnement et ce n'est pas toujours le cas dans les territoires non raccordés au réseau électrique.

Nous déploierons à cet effet des systèmes photovoltaïques assortis de batteries, eux-mêmes adaptée à ce besoin de conformité énergétique en proposant une offre qui produit une énergie propre et durable et non polluante, produire.

Les recherches menées par certaines études ont montré qu'un système d'énergie hybride photovoltaïque (souvent couples avec un éolien ou avec un groupe électrogène de secours) permettait de diminuer le coût d'exploitation et de maintenance donc d'assurer la disponibilité [50], [53].

Un système d'accumulateurs, etc. complète l'autonomie pendant les périodes de faible insolation qui est demandée pour maintenir les communications.

Il montre en effet cette étude que l'optimisation technoeconomique de ces installations PV à station télécommunication elle permet de maximiser l'efficacité énergétique tout en minimisant les coûts en durée de vie.

Concernant à ce propos, des essais ont eu lieu au Koweït [52] justifiant le système d'alimentation solaire pour les stations de bases BTS en fonction des milieux réticulaires pour les retiens et des milieux désertiques.

Les équipes du Koweït ont réalisé des expériences en milieu désertique [52] sur une station de base et observé qu'un système hybride photovoltaïque (batterie + diesel de secours pilotée par un contrôle système) a permis d'atteindre 72h d'autonomie de fourniture sans soleil tout en réduisant les émissions de CO₂ de 80 %.

Ces résultats ont été réaffirmés par des modèles techno-économiques [55] qui suggèrent l'intérêt de rechercher la taille optimale des panneaux et des batteries pour amortir les coûts sur 20 ans.

III.3.2 Solutions pour les répéteurs et antennes relais isolées

Il arrive fréquemment que, sur des réseaux de télécommunications à couverture très large, des répéteurs ou des antennes relais soient implantés dans des lieux difficilement accessibles et mal raccordables à une source d'énergie électrique.

Dans de tels cas, le système photovoltaïque présenté comme autonome, assurant une cadence de recharge des batteries sans usure, un entretien quasi nul réduit à l'extrême le besoin d'interventions humaines coûteuses et délicates, reste souvent la solution la plus adéquate.

En équipant les panneaux photovoltaïques de batteries, on peut fournir une autonomie de quelques jours, voire, en plus, en faible ensoleillement [49,50].

De surcroît, cette solution se révèle adaptée aux milieux extrêmes tels que les montagnes, les forêts tropicales ou les déserts, où le transport de l'énergie sous forme de diesel pour générateurs devient logistique- et économiquement hi-throvables ou devenus invivables [54].

Les dispositifs photovoltaïques mis en place peuvent pallier aux problèmes de logistique du transport du combustible (forêts tropicales, montagnes, etc.), pour certains jusqu'à 200 % du prix d'achat du pétrole ou du diesel [54].

Les panneaux de 500 W avec batteries lithium peuvent tenir 5 jours, même pour des antennes très puissantes (en l'absence de soleil) [49].

III.3.3 Intégration dans les réseaux IoT et systèmes de surveillance

Dans plusieurs champs tels que l'agriculture, l'environnement, l'industrie, ou la sécurité etc., les technologies de l'Internet des Objets (IoT) engendrent de vastes surfaces parfois organisées en réseaux de capteurs et dispositifs de suivi qui se rencontrent souvent électriquement isolés.

Le démarrage de microsystèmes de production photovoltaïques en rend l'architecture de fonctionnement tout à fait autonome.

Tout en étant garnis de capteurs connectés (températures, humidités, pollutions, mouvements, ...), ils sont de fait aptes à fonctionner durant plusieurs années sans aucune intervention [51,53].

En effet, souvent alimentés par l'installation de solutions d'accumulateurs d'énergie [51] vérifiant des critères de qualité se surajoutent aux cibles de l'IoT classique des valeurs ajoutées différentes des filières classiques de l'IoT, pourquoi pas des dispositifs IoT raccordés dans lequel l'énergétique est fortement interface de raccordement non autonome, durable, fiable (cependant de faible empreinte carbone).

Les microsystèmes photovoltaïques au service de l'approvisionnement énergétique des capteurs IoT présentent en effet l'intérêt environnemental d'être peu énergivores, souvent sous 10 W, pour fonctionner de façon autonome pendant plusieurs années sans intervention humaine, ce qu'on trouve particulièrement mis en avant dans les propositions de projets-pilotes d'agriculture intelligente [51].

Leur modularité est par ailleurs un des points forts qui leur permet d'être déployés sur un très grand nombre de sites en lien par le développement facilitée par des politiques énergétiques soutenant les énergies renouvelables garantissant la souplesse d'un intégration massifiée [53].

III.3.4 Cas d'usage pour les télécommunications d'urgence

Les crises que l'on rencontre, qu'elles soient de nature naturelle (catastrophes naturelles) ou humaine (conflits de toute sorte ou crises internationales) affaiblissent souvent les systèmes traditionnels de secours.

En raison des réseaux électriques classiques inopérants, les autorités doivent généralement déclencher le fameux « Plan Orsec », qui garantit que les secours peuvent être mises en place.

Ce plan comprend entre autres le déploiement d'hôpitaux de campagne qui nécessitent un préalable d'installation des réseaux de télécommunications d'urgence (liaisons satellites et radios), dont la mise en service nécessite en amont une préparation technique.

Dans ces situations, l'ajout de systèmes photovoltaïques portables fixés aux unités mobiles (containers, véhicules, tours) devient particulièrement intéressant.

Facilement déplorables dans l'urgence sur le terrain, ces dispositifs seront capables de faire fonctionner et éclairer tous les équipements de télécommunication permettant la prise en charge des premiers secours.

Ainsi ceux-ci vont pouvoir assurer une autonomie énergétique ne nécessitant pas de carburant, très difficile à acheminer et à stocker en situation de crise.

Donc, en situation de crise, si aucune infrastructure électrique classique n'est disponible, les systèmes solaires vont devenir les outils de communication par excellence pour maintenir les contacts dans les opérations d'urgence.

III.4 Profil énergétique des stations de télécommunication

Le défi majeur que représente la mise en place d'une alimentation énergétique pour stations de télécommunication est particulièrement important pour des stations isolées, notamment rurales. De là la nécessité de bien comprendre le profil énergétique des stations pour dimensionner au mieux et de façon pertinente un système photovoltaïque économique et fiable.

III.4.1 Analyse des besoins énergétiques par type de station

En fonction de la taille, du type et de la fonction, les stations de télécommunication sont différentes et présentent des besoins spécifiques, en termes de besoins énergétiques.

III.4.1.1 Stations de base rurales

Souvent situées sur des sites isolés mal raccordés au réseau électrique, elles doivent être autonomes. Leur consommation énergétique apparaît généralement faible (1 kW et 3 kW, selon les équipements mobilisés : transmetteurs, récepteurs, antennes) [49,52].

III.4.1.2 Stations urbaines

Raccordées au réseau principal, leur besoin d'alimentation est plus important (3 kW à 10 kW, en fonction du niveau de trafic dans la zone concernée). En effet, les installations de télécommunications urbaines doivent être plus sophistiquées que celles déployées en milieu rural, en raison de la concentration des besoins de communication et du déploiement d'un seul réseau de transport qui doit rester relativement réduit [51].

III.4.1.3 Micro et pico BTS

Unités plus petites, exceptionnelles, qui servent à compléter la couverture radioélectrique dans de zones réduites, ou à l'intérieur des bâtiments. Faibles en consommation (quelques centaines de watts), elles doivent davantage bénéficier d'une souplesse en matière d'alimentation [55]. Chaque type de station génère un profil de consommation à définir précisément en amont lors du dimensionnement du système solaire.

III.4.2 Facteurs influençant la consommation énergétique

Les véritables réalités de consommation de ces stations, doivent être rapportées à différents facteurs :

III.4.2.1 Le volume de trafic et la charge des réseaux en général

Le niveau de consommation varie en fonction du trafic voix (appel) et du volume de données échangées. Par exemple, lors de périodes de pointe ou d'événements exceptionnels, on peut parler de surconsommation [52].

III.4.2.2 La technologie utilisée

La migration vers la 4G et la 5G est l'un des causes de l'augmentation de puissance de la station ; mais elle doit être comprise également comme une meilleure gestion de la consommation grâce à des protocoles de gestion d'énergie et à de meilleurs équipements [52].

III.4.2.3 Les conditions météorologiques

Les besoins de climatisation ou de ventilation de certains équipements plus ou moins performants, tout particulièrement dans les zones chaudes, conduisent à des pics de consommation susceptible d'atteindre une partie importante de la consommation globale [50].

III.4.2.4 La qualité du réseau électrique

La présence d'un réseau peu stable dans certaines zones nécessite de recourir à des systèmes de secours (batteries, groupe électrogène au gaz) et renchérit ainsi les coûts de consommation comme d'exploitation [49].

III.4.2.5 L'état et la maintenance des équipements

L'état des composants, dont notamment les batteries, joue dans le temps sur la consommation globale.

III.4.3 Méthodologie de dimensionnement des systèmes PV

Dans la perspective de dimensionner un système photovoltaïque pour les besoins énergétiques des stations de télécommunication, plusieurs étapes doivent être suivies :

III.4.3.1 La détermination précise de la charge

Il s'agit de caractériser la consommation moyenne et la consommation maximale sur un jour type en prenant en compte les variations saisonnières et de l'heure de la journée qui impactent notamment la consommation des différents équipements (transmetteur, alimentation, refroidissement...) [51].

III.4.3.2 L'étude des données solaires disponibles localement

La ressource solaire du site étant tributaire de données fournies par les bases de données météorologiques et de mesures in situ, on retiendra notamment les données suivantes : la moyenne journalière de l'irradiante solaire, la durée d'ensoleillement, la température ambiante [54]

III.4.3.3 Le choix des composants

Il faut dimensionner les panneaux photovoltaïques, les batteries pour le stockage de la ressource pour pallier l'intermittence, les onduleurs, régulateurs de charge en fonction de la charge et de la ressource solaire. Le dimensionnement doit garantir une autonomie suffisante, généralement comprise entre 24 et 72 heures, suivant la criticité de la station [55].

III.4.3.4 Simulation et validation

Le fonctionnement du système photovoltaïque a été simulé avec un logiciel spécifique au type de simulation permettant de simuler les pertes, les cycles de charge/décharge, et les différentes conditions climatiques. Ce type de simulation permet, pour ce type de problème d'optimiser une configuration par réduction du coût et amélioration de la fiabilité [55].

III.4.4 Optimisation des profils de consommation

Afin de maximiser les bénéfices à la fois énergétiques et économiques des installations photovoltaïques, il est prévu :

III.4.4.1 Des équipements à haut rendement

L'optimisation de la matérielle télécoms peu consommateurs et l'actualisation des dispositifs pour réduire la consommation totale [50].

III.4.4.2 Une gestion énergétique adaptée

Des systèmes de gestion de l'énergie (Energie Management Systèmes EMS) permettent de faire coïncider les consommations dans la même dimension des équipements avec les productions énergétiques solaires et de stockage tout en réduisant d'une part la consommation des équipements de confort par une meilleure gestion de leur modulation d'une part sur les équipements voués à l'indispensable [50].

III.4.4.3 Des systèmes hybrides

L'association photovoltaïque d'une part à une source d'énergie renouvelable (éolien/micro-hydraulique) ou d'autre part à un générateur diesel permet de réduire la dépendance à un type d'énergie tout en assurant une continuité du service d'autre part [54].

III.4.4.4 Prévention et surveillance permanente

L'optimisation se fait aussi par le suivi en permanence de la performance du système ainsi que par un suivi périodique permettant un diagnostic et une action le plus rapidement possible sur tout dysfonctionnement [49].

III.4.4.5 Adaptation des profils de consommation

Des dispositifs peuvent être mis en place pour lisser les pointes de consommation, avec par exemple le fonctionnement de certaines opérations pendant les heures d'ensoleillement maximal, ou en utilisant des batteries intelligentes afin de décaler la consommation.

III.5 Contraintes et défis de l'alimentation photovoltaïque des infrastructures télécoms

Bien que l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans les systèmes de télécommunication présente de multiples avantages, elle entraîne également des contraintes et des défis techniques, économiques ou réglementaires. Pour garantir la viabilité des solutions

proposées dans la durée, il est nécessaire d'anticiper ces freins et d'élaborer des stratégies appropriées.

III.5.1 Gestion de l'intermittence et solutions de stockage

L'un des principaux inconvénients qui se présente lorsque l'on considère l'énergie solaire est qu'elle est variable : la production d'énergie électrique dépend de l'ensoleillement et n'est donc pas continue, notamment lorsque le soleil ne brille plus la nuit ou lorsque le temps est « couvert » durant plusieurs jours.

C'est un véritable défi pour assurer un approvisionnement efficace et pérenne des stations de télécommunication. Différentes solutions sont possibles :

III.5.1.1 Batteries de stockage

Elles permettent d'emmagasiner l'excédent de production d'énergie durant la journée tendent au moment de faible production.

En effet, les batteries disponibles sont principalement à technologie lithium-ion, en raison de leur densité de stockage, de leur longévité et de leurs performances [55].

III.5.1.2 Systèmes hybrides

Coupler le système photovoltaïque à d'autres sources d'énergie (éolienne, générateur diesel, réseau électrique intermittent), assurerait une meilleure continuité de la fourniture de l'énergie [52,55].

III.5.1.3 Dimensionnement optimal

L'étude des caractéristiques de la charge, des profils de consommation et de l'irradiation solaire, permet de définir la taille du système ainsi que la capacité du stockage associé, ce qui réduit le risque de rupture d'approvisionnement.

III.5.2 Aspects techniques et maintenance des installations

Les dispositifs photovoltaïques utilisés pour les télécommunications sont très souvent installés dans des conditions difficiles (chaleur, poussière, humidité ou zones d'accès difficile). Ces conditions impactent le fonctionnement et la fiabilité des équipements.

Les contraintes techniques sont alors les suivantes :

III.5.2.1 Détérioration des panneaux solaires

L'exposition permanente des équipements au soleil et à la pluie dégrade le rendement des panneaux de l'ordre de 0,5 % à 1 % par an.

III.5.2.2 Surveillance et gestion à distance

Pour éviter des missions coûteuses par les déplacements et dangereuses, un besoin de télémétrie pour suivre en temps réel l'état de la performance énergétique et l'état des batteries [49].

III.5.2.3 Maintenance préventive

Le nettoyage des panneaux, la vérification des câblages, le contrôle du bon fonctionnement des régulateurs et des onduleurs sont des gestes préventifs nécessaires pour garantir la fiabilité du système [50].

III.5.2.4 Gestion thermique

Dans les zones chaudes, la chaleur peut fragiliser les équipements [51], il faut parfois intégrer un système de ventilation passive ou active pour éviter une trop forte montée en température.

III.5.3 Défis économiques et analyse coûts-bénéfices

Le coût d'acquisition d'un système photovoltaïque autonome peut être élevé au départ, particulièrement dans le cadre de l'achat des panneaux, des accumulateurs, des onduleurs ainsi que pour la mise en œuvre de l'installation. Mais cette dépense doit être appréciée en fonction de l'horizon d'amortissement. Les éléments à intégrer dans l'analyse coûts-bénéfices :

III.5.3.1 La réduction des coûts d'exploitation (OPEX)

Contrairement aux générateurs diesel, les systèmes solaires ne nécessitent pas de coûts récurrents pour l'achat de carburant donc, sur plusieurs années, les dépenses sont moindres [51, 54].

III.5.3.2 L'allègement de l'empreinte carbone

Par le biais de l'utilisation de sources renouvelables, on réduit les émissions de CO₂, ce qui constitue un atout dans le cadre des impératifs environnementaux des opérateurs télécoms [52, 53].

III.5.3.3 Durée de vie/ return on investment (ROI)

Les systèmes bien entretenus ont une durée de vie de 20 ans et plus, le retour sur investissement n'est envisageable au bout de moins de 5 à 7 ans suivant la qualité du site et l'intensité d'ensoleillement.

III.5.3.4 Les aides et incitations

Certains pays, via subventions, crédits d'impôt ou plans verts contribuant à la réalisation de projets de ce type, lèvent des freins économiques à l'adoption du photovoltaïque [53].

III.5.4 Cadre réglementaire et normatif

Ce sont bien les dispositifs législatifs, les normes et règlements nationaux ou régionaux qui vont définir les conditions de choix et d'implantation des installations solaires photovoltaïques pour les équipements de télécommunications :

III.5.4.1 Normes de sécurité électriques

Il existe l'exigence de la conformité des installations aux normes de sécurité électriques en vigueur (nationales ou internes, IEC, IEEE, NFPA, ...).

III.5.4.2 Autorisation d'implantation

Des autorisations administratives particulières sont parfois à solliciter pour l'implantation de systèmes solaires, selon la nature de l'environnement, protégé ou non (zones rurales, zones protégées...)

III.5.4.3 Intégration réseau

En matière d'installations hybrides ou interconnectées au réseau électrique, le cadre des normes de connexion aux réseaux des énergies électriques doit bien entendu s'appliquer

III.5.4.4 Responsabilités contractuelles

Il est dans l'intérêt des exploitants de télécommunications d'indiquer clairement leurs responsabilités pour la maintenance et la propriété des installations solaires et des obligations afférentes au recyclage terminal des batteries et panneaux photovoltaïques, en tant que matériels électriques et électroniques.

Le principe des Objectifs de Développement Durable (ODD), ODD 7 notamment accès à une énergie propre et à prix abordable, va progressivement appuyer les politiques d'adoption du photovoltaïque dans les télécommunications.

III.6 Conclusion

L'exploitation de l'énergie photovoltaïque que dans les télécommunications constitue une alternative propre et fiable pour répondre aux besoins des zones isolées ou mal alimentées par le réseau électrique.

Ce chapitre aura permis d'illustrer les enjeux du photovoltaïque au travers de ses atouts, de ses diverses applications, des profils énergétiques des stations télécoms ainsi que les principaux freins à levier tant techniques qu'économiques ou réglementaires.

La présentation des différentes architectures énergétiques (autonomes, hybrides, connectées ou mobiles) démontrera que tous les sites peuvent se voir offrir une solution adaptée.

Le prochain chapitre sera consacré au dimensionnement d'un système photovoltaïque destiné à alimenter ne installation télécom.

Chapitre IV :
Dimensionnement
photovoltaïque pour une
installation des
télécommunications

IV.1 Introduction

L'accès à une alimentation électrique fiable constitue un enjeu majeur pour garantir la continuité des services de télécommunication, notamment dans les zones éloignées et dépourvues de réseaux conventionnels [54]. Dans un pays comme l'Algérie, où l'irradiation solaire varie considérablement d'une région à une autre, le recours à l'énergie photovoltaïque apparaît comme une solution durable et économiquement avantageuse pour rendre les stations télécom autonomes [55, 56].

La conception d'un système photovoltaïque autonome nécessite une approche méthodique et rigoureuse afin de couvrir les besoins énergétiques quotidiens, d'assurer une autonomie suffisante lors des périodes de faible ensoleillement et de prolonger la durée de vie des équipements de stockage [57, 58]. À cette fin, plusieurs paramètres essentiels doivent être pris en compte : la consommation spécifique de la station, le potentiel solaire du site, ainsi que les caractéristiques techniques et le rendement des modules photovoltaïques, des batteries, de l'onduleur et du régulateur de charge [59].

Dans ce chapitre, une méthodologie de dimensionnement est exposée à travers deux études de cas représentatives : une station 5G implantée à Tamanrasset, région saharienne à fort ensoleillement, et une autre à Tizi Ouzou, localité montagnaise au rayonnement solaire plus modeste. Cette approche comparative permet de mettre en évidence l'impact des conditions climatiques sur la configuration du générateur photovoltaïque et du système de stockage, afin de garantir une alimentation autonome, fiable et continue [60].

IV.2 Dimensionnement des Systèmes Photovoltaïques Autonomes

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome est une phase déterminante pour garantir la continuité et la fiabilité de l'alimentation énergétique dans les sites isolés, notamment dans le secteur des télécommunications. Contrairement aux systèmes raccordés au réseau, les systèmes autonomes doivent être capables de fonctionner indépendamment, en s'appuyant exclusivement sur l'énergie solaire et un système de stockage adapté [56].

IV.2.1 Objectifs et enjeux du dimensionnement

Le principal objectif du dimensionnement est de concevoir un système capable de satisfaire la demande énergétique de l'installation tout au long de l'année, en tenant compte des variations saisonnières de l'irradiation solaire et de la consommation électrique. Il s'agit d'optimiser la taille des composants afin de minimiser les coûts tout en assurant une autonomie et une fiabilité suffisantes [57, 59]. Dans les zones rurales désertiques, comme le Sahara algérien, ce défi est accentué par les conditions environnementales extrêmes : fortes températures, poussière, accès difficile pour la maintenance, etc. Cela nécessite un surdimensionnement prudent des systèmes, associé à une sélection rigoureuse des équipements [57].

IV.2.2 Étapes du dimensionnement d'un système PV autonome

Le processus de dimensionnement se décompose en plusieurs étapes clés, chacune jouant un rôle fondamental dans la performance globale du système [56, 59] :

IV.2.2.1 Évaluation de la charge électrique

Identification des équipements à alimenter, estimation de leur consommation quotidienne, hebdomadaire et annuelle. Pour une station télécom, cela inclut les unités de transmission, les systèmes de refroidissement, les dispositifs de sécurité, etc.

IV.2.2.2 Analyse des ressources solaires

Collecte des données d'irradiation solaire (en kWh/m²/jour) sur le site d'installation. Cette analyse est généralement réalisée à partir de bases de données météorologiques ou via des modèles de ciel clair [58].

IV.2.2.3 Calcul de la puissance du générateur PV

Détermination du nombre de modules photovoltaïques nécessaires pour assurer la production énergétique suffisante. Ce calcul prend en compte les pertes (température, poussière, orientation, câblage) et le rendement du système [60].

IV.2.2.4 Dimensionnement du stockage

Le dimensionnement des batteries est essentiel pour assurer l'alimentation pendant les périodes sans soleil (nuit, jours nuageux). Il dépend de la consommation, de l'autonomie souhaitée et de la profondeur de décharge admissible [57].

IV.2.2.5 Sélection des composants électroniques

Choix du régulateur de charge, de l'onduleur (si nécessaire), des protections et de l'architecture du système (DC ou AC). Ces composants doivent être compatibles avec les exigences de fiabilité et de durabilité dans un environnement contraignant [60].

IV.2.3 Contraintes spécifiques aux installations autonomes télécom

Les systèmes photovoltaïques destinés aux télécommunications présentent des exigences spécifiques, notamment :

IV.2.3.1 Disponibilité continue de l'énergie

Toute interruption du service peut entraîner une perte de connectivité. Le système doit être conçu avec un taux de disponibilité supérieur à 99 % [56].

IV.2.3.2 Maintenance minimale

Étant donné l'éloignement des sites, le système doit nécessiter peu d'interventions techniques, d'où l'importance de la qualité des composants et du bon dimensionnement [57].

IV.2.3.3 Adaptation au climat désertique

Les hautes températures réduisent le rendement des modules PV et accélèrent le vieillissement des batteries. Des solutions comme la sur ventilation passive, l'orientation optimale ou le choix de batteries spécifiques (gel, lithium) doivent être envisagées [59].

IV.3 Analyse de la Charge Énergétique de la Station 5G

Le dimensionnement efficace d'un système photovoltaïque autonome pour une station de télécommunication repose sur une évaluation rigoureuse de la charge énergétique. Cette étape permet de déterminer la quantité exacte d'énergie électrique nécessaire quotidiennement pour alimenter les équipements de la station, en tenant compte de leurs spécificités techniques, de leur temps de fonctionnement et des exigences de disponibilité.

IV.3.1 Description des équipements et besoins énergétiques

Une station 5G typique comprend une série d'équipements actifs et passifs ayant chacun une consommation spécifique. La Table 1 présente les principaux composants retenus pour ce cas d'étude, avec leurs caractéristiques énergétiques estimées.

Équipement	Puissance nominale (W)	Durée de fonctionnement (h/j)	Énergie quotidienne (Wh/j)
Unité radio (RRU + antennes Massive MIMO)	300 W	24 h	7 200 Wh
Unité de bande de base(BBU)	200 W	24 h	4 800 Wh
Système de transmission (routeur + switch)	100 W	24 h	2 400 Wh
Système de surveillance et gestion (NMS)	80 W	24 h	1 920 Wh
Système de refroidissement (ventilateurs DC)	300 W	10 h	3 000 Wh
Éclairage et systèmes auxiliaires	30 W	12 h	360 Wh
Total quotidien	910 W	—	19 680 Wh/jour

Tableau 4. 1 Estimation de la consommation énergétique des équipements d'une station 5G rurale

Ces valeurs s'appuient sur les profils réels rapportés dans plusieurs études de dimensionnement PV pour stations télécom isolées [56], [57].

Il est important de noter que les unités radio (RRU) et la bande de base (BBU) sont les plus énergivores en raison de leur fonctionnement continu.

IV.3.2 Profil de consommation journalier et saisonnier

Le profil de consommation énergétique varie en fonction du temps (jour/nuit) et des saisons, bien que la variation soit relativement faible dans une station 5G bien régulée. Ces fluctuations doivent néanmoins être prises en compte pour un dimensionnement fiable.

IV.3.2.1 Profil journalier

La consommation est relativement constante, car les équipements critiques fonctionnent en continu. Une augmentation ponctuelle peut apparaître durant la journée, liée à :

- L'activation des systèmes de refroidissement (entre 10h et 18h),
- l'augmentation du trafic réseau aux heures de pointe (soirées).

IV.3.2.2 Profil saisonnier

En été, la charge de refroidissement augmente significativement à cause des hautes températures (souvent $> 45\text{ °C}$ dans le Sahara), ce qui élève la consommation journalière jusqu'à +15 %. En hiver, les besoins en refroidissement diminuent, mais la production PV peut également baisser à cause de l'ensoleillement plus faible et de l'inclinaison solaire réduite.

IV.3.3 Critères de disponibilité et continuité de service

L'objectif principal d'un système de télécommunication autonome est d'assurer un service ininterrompu, même en l'absence d'ensoleillement pendant plusieurs jours consécutifs.

Les critères de disponibilité généralement exigés sont :

- Taux de disponibilité $> 99\%$, soit une indisponibilité maximale d'environ 87 heures par an
- Autonomie énergétique de 2 à 3 jours, assurée par le système de stockage, pour faire face aux périodes sans production solaire suffisante (mauvais temps, poussière, etc.)

- Protection des équipements contre les coupures et les surtensions, via des régulateurs et convertisseurs appropriés
- Fiabilité des batteries à températures extrêmes, un facteur critique dans les environnements désertiques, nécessitant l'usage de technologies telles que le LiFePO4 ou le Gel/AGM renforcé [59].

L'analyse de la disponibilité est essentielle pour garantir la continuité des services 5G, particulièrement pour les applications critiques (IoT, santé, sécurité) dans les zones rurales.

IV.4 Ressources Solaires et Conditions Environnementales du Sahara Algérien

L'optimisation du dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour une station 5G rurale dans le Sahara algérien dépend fortement de la connaissance des ressources solaires locales et des conditions environnementales spécifiques à cette région. Cette section examine les données d'irradiation solaire, les effets des températures élevées, ainsi que l'impact de la poussière et du climat sur le dimensionnement du système.

IV.4.1 Données d'irradiation solaire locale

Le Sahara algérien est l'une des régions les plus ensoleillées au monde. Selon les données du PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) et de la base de données NASA POWER, l'irradiation solaire annuelle moyenne sur surface horizontale varie entre 2 200 et 2 600 kWh/m²/an, avec une irradiation journalière moyenne atteignant 5,5 à 7,2 kWh/m²/jour selon les régions comme Adrar, Tamanrasset ou In Salah [56, 58]. Ces valeurs permettent de garantir un potentiel de production solaire élevé tout au long de l'année.

En effet, une station BTS télécom installée à Adrar peut bénéficier de plus de 3 500 heures d'ensoleillement par an, ce qui est largement suffisant pour satisfaire les besoins d'une infrastructure télécom autonome [56].

IV.4.2 Influence des températures élevées et de la poussière sur les performances PV

IV.4.2.1 Températures élevées

Dans le Sahara, la température ambiante peut atteindre plus de 50 °C, entraînant une température de fonctionnement des modules photovoltaïques souvent supérieure à 65 °C. Ce phénomène a un impact direct sur la performance des modules solaires, car le rendement décroît avec l'augmentation de la température selon un coefficient typique de $-0,45 \text{ \%/}^\circ\text{C}$ pour les cellules en silicium cristallin [60]. Une élévation de 40 °C par rapport aux conditions STC peut donc engendrer une perte de puissance d'environ 18 %, ce qui doit être compensé par un surdimensionnement du champ photovoltaïque.

IV.4.2.2 Encrassement (poussière)

Le phénomène d'encrassement, ou *soiling*, est accentué par les tempêtes de sable fréquentes dans la région saharienne. Des études montrent que l'accumulation de poussières peut entraîner des pertes de rendement allant de 5 % à 30 % selon la fréquence de nettoyage [56]. Une simulation a montré qu'un nettoyage hebdomadaire réduit ces pertes à moins de 10 %, tandis qu'une absence de nettoyage pendant un mois peut induire des pertes énergétiques de 25 % [56].

Pour y remédier, il est recommandé :

- d'installer les panneaux avec une inclinaison minimale de 20° pour favoriser l'auto nettoyage
- d'utiliser des revêtements anti-poussière ou des systèmes de nettoyage automatiques
- de choisir des modules PV résistants à la chaleur, comme les couches minces ou les technologies bifaciales [59].

IV.4.3 Impact climatique sur le dimensionnement

Les conditions climatiques sahariennes influencent directement le dimensionnement et le choix des équipements :

IV.4.3.1 Surdimensionnement du générateur PV

Pour compenser les pertes dues à la température et à l'encrassement, une marge de 20 à 35 % est recommandée [57, 59].

IV.4.3.2 Choix technologique adapté

Les batteries à technologie GEL ou LiFePO₄, plus résistantes à la chaleur, sont préférées. Les régulateurs MPPT assurent une meilleure gestion de la puissance produite sous rayonnement variable.

IV.4.3.3 Dispositifs de protection

Le système doit inclure des protections contre la surtension, les surchauffes et la décharge profonde. Des modèles de dimensionnement prenant en compte les variations saisonnières de Température, l'irradiation, et le taux de poussière, permettant d'optimiser le rendement tout en garantissant la continuité du service télécommunication doivent être appliqués [56, 57].

IV.5 Dimensionnement du Générateur Photovoltaïque

Le dimensionnement du générateur photovoltaïque constitue une étape essentielle afin de garantir une production électrique suffisante pour couvrir l'ensemble des besoins énergétiques de l'installation, tout en tenant compte des conditions climatiques du site et de la durée effective de production solaire. La démarche adoptée repose sur le calcul de la puissance crête du champ photovoltaïque, suivi du choix approprié des modules solaires et de leur configuration.

IV.5.1 Calcul de la puissance crête nécessaire

La puissance crête du champ photovoltaïque est déterminée à partir de la consommation énergétique quotidienne de l'installation et de la durée effective de production solaire. On suppose que la totalité de l'énergie doit être produite durant la période d'ensoleillement disponible.

La surface nécessaire du champ photovoltaïque s'exprime selon la relation suivante :

$$S_{pv} = \frac{E_{cons} \times 24}{H_{PSH} \times t} \quad 4.1$$

Où :

- E_{cons} est l'énergie électrique journalière à fournir (en kWh/jour),
- H_{PSH} est l'irradiation solaire moyenne journalière sur le site (en kWh/m²/jour),
- t est la durée quotidienne de production effective (en heures).

La puissance crête du champ photovoltaïque est ensuite obtenue en multipliant la surface calculée par la puissance nominale fournie par mètre carré sous conditions standards (STC) :

$$P_{champ} = S_{pv} \times P_{surf} \quad 4.2$$

Où :

- S_{pv} est la surface nécessaire du champ photovoltaïque (en m²),
- P_{surf} est la puissance nominale par m² de module PV, dépend du rendement du module, (en W/m²).

Pour assurer la continuité de service et compenser les pertes climatiques (poussière, chaleur), il est conseillé d'ajouter une marge de sécurité de 20–35 %, ce qui donne une puissance totale recommandée de 1.5 kWc à 1.6 kWc [57, 59].

IV.5.2 Prise en compte des pertes et facteurs correctifs

Le rendement réel du générateur photovoltaïque est affecté par divers facteurs :

IV.5.2.1 Pertes thermiques

Diminution du rendement des modules de $-0,4$ à $-0,5$ %/°C au-delà de 25 °C. Dans le Sahara, cela peut représenter 15–20 % de pertes en été [58].

IV.5.2.2 Encrassement

Les pertes dues à la poussière peuvent atteindre 25 % en l'absence de nettoyage régulier [56].

IV.5.2.3 Mismatch et câblage

Pertes typiques de 2–4 % dues aux différences entre modules et à la résistance des conducteurs.

IV.5.3.4 Convertisseurs et contrôleurs

Pertes de 5–10 % sur les régulateurs MPPT et onduleurs.

Ainsi, un facteur global de pertes de 25 à 30 % est souvent appliqué dans les environnements désertiques pour obtenir un dimensionnement réaliste du champ PV.

IV.5.3 Choix des modules PV

Le choix des modules photovoltaïques se base sur des critères de performance, de rendement et de fiabilité.

IV.5.3.1 Détermination du nombre de modules

Le nombre total de modules nécessaires est déterminé par

$$N_{module} = \frac{P_{champ}}{P_{module}} \quad 4.3$$

Où :

- P_{champ} est la puissance crête totale requise pour le champ photovoltaïque,
- P_{module} est la puissance nominale d'un module photovoltaïque choisi.

Ces modules sont regroupés en série et en parallèle afin d'adapter la tension du générateur aux exigences du régulateur de charge et à la tension nominale du système de stockage.

La configuration électrique est conçue pour :

- Assurer une tension suffisante à l'entrée du régulateur MPPT,
- Optimiser le rendement de conversion,
- Faciliter l'installation et la maintenance.

Cette organisation garantit la couverture des besoins énergétiques quotidiens tout en assurant la robustesse et la fiabilité du système photovoltaïque.

IV.5.3.2 Technologies à privilégier

IV.5.3.2.1 Les modules monocristallins

Offrent un meilleur rendement (18–22 %) mais sont plus sensibles à la chaleur.

IV.5.3.2.2 Les modules polycristallins

Sont légèrement moins performants mais plus robustes thermiquement.

IV.5.3.2.3 Les modules à couche mince (CIGS, CdTe)

Présentent une bonne tolérance à la température et un bon comportement sous faible éclairement, mais nécessitent plus de surface [59].

IV.6 Dimensionnement du Système de Stockage Énergétique

Le système de stockage joue un rôle critique dans les installations photovoltaïques autonomes, en assurant la disponibilité de l'énergie en l'absence d'ensoleillement (nuit, temps couvert). Dans le contexte d'une station 5G rurale isolée dans le Sahara, son dimensionnement doit garantir la continuité de service, malgré les conditions environnementales extrêmes.

IV.6.1 Estimation de l'autonomie nécessaire

L'autonomie énergétique correspond au nombre de jours durant lesquels la station peut fonctionner sans apport solaire. Elle dépend de la criticité de l'application et de la variabilité climatique. Pour les télécommunications, un minimum de 2 à 3 jours est recommandé [56, 57].

L'énergie à stocker est calculée comme suit :

$$\text{Estockage} = E_{\text{cons}} \times N_{\text{autonomie}} \quad 4.4$$

Où :

- E_{cons} : Énergie journalière consommée (kWh/jour)
- $N_{\text{autonomie}}$: Nombre de jours d'autonomie souhaité (jours)

IV.6.2 Sélection et capacité des batteries

Afin de garantir une alimentation continue de l'installation durant les périodes sans production d'énergie solaire, il est nécessaire de dimensionner correctement le système de stockage. La capacité totale de stockage des batteries peut être calculée à partir de l'énergie quotidienne consommée, du nombre de jours d'autonomie souhaité, et de la tension nominale du système. La capacité totale des batteries, exprimée en ampères-heures (Ah), est donnée par la relation suivante

$$C_{batt} = \frac{E_{stockage}}{V_{systeme}} \quad 4.5$$

Avec :

- C_{batt} : Capacité totale de stockage des batteries (Ah)
- $V_{systeme}$: Tension nominale du système de batteries (V)

IV.6.2.1 Technologies courantes

IV.6.2.1.1 Batteries plomb-acide

Moins chères, mais sensibles à la chaleur, faible DoD (~50 %), entretien nécessaire.

IV.6.2.1.2 Batteries lithium-ion

Plus coûteuses, mais meilleure durée de vie, haute densité énergétique, bon comportement thermique.

IV.6.2.1.3 Batteries au gel (VRLA)

Intermédiaires, sans entretien, tolèrent mieux les températures.

IV.6.3 Facteurs influençant la durée de vie des batteries dans le Sahara

Dans un environnement saharien, plusieurs facteurs réduisent la durée de vie des batteries :

IV.6.3.1 Températures élevées

Chaque augmentation de 10 °C au-dessus de 25 °C peut réduire la durée de vie de moitié [60]. Il est donc crucial de ventiler ou enterrer partiellement les batteries pour limiter la température.

IV.6.3.2 Cycles de charge/décharge profonds

Préférer des cycles partiels pour prolonger la vie, surtout pour le plomb-acide.

IV.6.3.3 Maintenance

Les batteries au plomb nécessitent un contrôle régulier du niveau d'électrolyte et de la tension. Le monitoring intelligent est recommandé.

IV.6.3.4 Vieillesse chimique

Plus rapide dans les conditions extrêmes, surtout pour les batteries plomb-acide [57].

La durée de vie attendue varie :

- Plomb-acide : 2 à 5 ans dans le désert,
- VRLA : 5 à 7 ans,
- Lithium-ion : 8 à 12 ans avec bonne gestion thermique [59].

IV.7 Régulation et Conversion d'Énergie

Le système de régulation et de conversion d'énergie assure l'adaptation entre les sources d'énergie (PV et batteries) et les équipements télécoms. Il comprend principalement les régulateurs de charge (contrôleurs MPPT/PWM) et les onduleurs ou convertisseurs DC/AC.

Leur choix impacte directement la fiabilité, l'efficacité et la durée de vie du système.

IV.7.1 Onduleurs ou convertisseurs

Les équipements télécoms peuvent fonctionner en courant continu (DC) ou alternatif (AC). Dans le cas des stations 5G, certains équipements actifs exigent une alimentation AC (230 V), ce qui justifie l'intégration d'un onduleur.

IV.7.1.1 Types de convertisseurs

IV.7.1.1.1 DC/DC

Utilisés pour adapter les tensions entre le PV, la batterie et les équipements DC.

IV.7.1.1.2 DC/AC (onduleur)

- a) **Onde sinusoïdale pure** : essentielle pour les équipements sensibles.
- b) **Onde modifiée** : acceptable pour charges résistives, mais à éviter pour les équipements électroniques [59].

IV.7.1.2 Dimensionnement de l'onduleur

La puissance nominale de l'onduleur est déterminée à partir de la puissance maximale des charges à alimenter, corrigée par le rendement global du système afin de prendre en compte les pertes éventuelles.

Elle est calculée selon la relation suivante :

$$P_{ond} = \frac{P_{max}}{\eta_{tot}} \quad 4.6$$

Avec :

- P_{ond} : Puissance nominale de l'onduleur (W)
- P_{max} : Puissance maximale des charges (W)
- η_{tot} : Rendement global

IV.7.1.3 Intégration dans le système

- a) **Architecture centralisée** : un seul onduleur pour toutes les charges AC.
- b) **Architecture décentralisée** : plusieurs micro-onduleurs (plus rare en télécom).
- c) **Gestion intelligente** via un contrôleur central ou EMS (Energy Management System) pour optimisation énergétique.

IV.7.2 Régulateurs de charge

Le régulateur de charge est un composant essentiel qui contrôle la tension et le courant issus des panneaux PV vers les batteries.

Il préserve les batteries contre la surcharge et la décharge profonde, et optimise la captation d'énergie.

IV.7.2.1 Types de régulateurs

- a) **PWM (Pulse Width Modulation)** : économique, rendement modéré, adapté aux petits systèmes.
- b) **MPPT (Maximum Power Point Tracking)** : plus cher, mais offre jusqu'à 30 % de gain énergétique en capturant le point de puissance maximale des panneaux, surtout utile en conditions variables (comme dans le Sahara) [60].

IV.7.2.2 Dimensionnement

Le régulateur de charge est un élément essentiel pour assurer une gestion efficace de l'énergie entre les panneaux photovoltaïques, le stockage par batteries et les charges. Il doit être dimensionné en fonction de la puissance maximale de l'onduleur et de la tension nominale du système afin de supporter le courant maximal transitant du champ photovoltaïque vers le stockage.

La valeur nominale du courant du régulateur se calcule ainsi :

$$I_{reg} = \frac{P_{ond}}{V_{batt}} \quad 4.7$$

- I_{reg} : Courant nominal du régulateur (A)
- P_{ond} : Puissance nominale de l'onduleur (W)
- V_{batt} : Tension nominale du banc de batteries (V)

IV.7.2.3 Fonctions avancées

- Compensation de température
- Protection électronique
- Surveillance à distance (SNMP/RS485 pour télécoms)

IV.8 Dimensionnement photovoltaïques autonomes pour une station télécommunication en Algérie

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour une station de télécommunication en site isolé en Algérie est une étape cruciale pour garantir la continuité de service et l'indépendance vis-à-vis du réseau électrique conventionnel. Il doit tenir compte des paramètres climatiques locaux, du profil de consommation de l'équipement télécom, ainsi que de la fiabilité souhaitée.

IV.8.1 Étude de cas n°1 : Station télécom 5G à Tamanrasset

IV.8.1.1 Hypothèses de base

Paramètre	Valeur
Consommation quotidienne	19,68 kWh/jour
Tension du système	48 V
Autonomie souhaitée	2 jours
Irradiation solaire moyenne	7,5 kWh/m ² /jour
Durée effective de production	8 heures/jour
Puissance maximale instantanée	910 W
Rendement global (onduleur + régulateur)	75 %
Puissance crête module PV	225 Wc

Tableau 4. 2 Valeur de la station télécom 5G à Tamanrasset.

IV.8.1.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

IV.8.1.2.1 Surface du champ PV

$$S_{pv} = \frac{E_{cons} \times 24}{H_{PSH} \times t} = \frac{19680 \times 24}{7500 \times 8} = 7,872 \quad 4.8$$

$$S_{pv} \approx 8 \text{ m}^2 \quad 4.9$$

IV.8.1.2.2 Puissance crête du champ PV

$$P_{\text{champ}} = S_{\text{pv}} \times P_{\text{surf}} = 8 \times 170 = 1360 \quad 4.10$$

$$P_{\text{champ}} = 1360 \text{ Wc} \quad 4.11$$

IV.8.1.2.3 Nombre de modules PV

$$N_{\text{module}} = \frac{P_{\text{champ}}}{P_{\text{module}}} = \frac{1360}{225} = 6,04 \quad 4.12$$

$$N_{\text{module}} \approx 7 \text{ module} \quad 4.13$$

IV.8.1.2.4 Choix pratique

7 modules PV de 225 Wc chacun.

IV.8.1.3 Dimensionnement de l'onduleur**IV.8.1.3.1 Puissance de l'onduleur**

$$P_{\text{ond}} = \frac{P_{\text{max}}}{\eta_{\text{tot}}} = \frac{910}{0,75} = 1213,33 \quad 4.14$$

$$P_{\text{ond}} \approx 1,3 \text{ kW} \quad 4.15$$

IV.8.1.3.2 Choix pratique

Un onduleur de 1,5 kW sous 48 V est recommandé pour garantir une marge de sécurité.

IV.8.1.4 Dimensionnement du stockage**IV.8.1.4.1 Énergie totale à stocker pour 2 jours**

$$\text{Estockage} = E_{\text{cons}} \times \text{Nautonomie} = 19680 \times 2 = 39360 \quad 4.16$$

$$\text{Estockage} \approx 39,36 \text{ kWh} \quad 4.17$$

IV.8.1.4.2 Capacité nominale du parc batterie

$$C_{\text{batt}} = \frac{E_{\text{stockage}}}{V_{\text{systeme}}} = \frac{39360}{48} = 820 \quad 4.18$$

$$C_{\text{batt}} = 820 \text{ Ah} \quad 4.19$$

IV.8.1.4.3 Configuration

3 batteries de 275 Ah organisées en série/parallèle pour atteindre la tension de 48 V et la capacité totale.

IV.8.1.5 Dimensionnement du régulateur de charge**IV.8.1.5.1 Courant du régulateur**

$$I_{\text{reg}} = \frac{P_{\text{ond}}}{V_{\text{batt}}} = \frac{1500}{48} = 31,25 \quad 4.20$$

$$I_{\text{reg}} \approx 31\text{A} \quad 4.21$$

IV.8.1.5.2 Choix pratique

Régulateur MPPT de 45 A sous 48 V, pour prévoir une marge de sécurité.

IV.8.2 Étude de cas n°2 : Station télécom 5G à Tizi Ouzou**IV.8.2.1 Hypothèses de base**

Paramètre	Valeur
Consommation quotidienne	19,68 kWh/jour
Tension du système	48 V
Autonomie souhaitée	2 jours
Irradiation solaire moyenne	4,5 kWh/m ² /jour
Durée effective de production	6 heures/jour
Puissance maximale instantanée	910 W
Rendement global	75 %
Puissance crête module PV	225

Tableau 4. 3 Valeur de la station télécom 5G à Tizi-Ouzou

IV.8.2.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïque

IV.8.2.2.1 Surface du champ PV

$$S_{pv} = \frac{E_{cons} \times 24}{H_{PSH} \times t} = \frac{19680 \times 24}{4500 \times 6} = 17,49 \quad 4.22$$

$$S_{pv} \approx 18 \text{ m}^2 \quad 4.23$$

IV.8.2.2.2 Puissance crête du champ PV

$$P_{champ} = S_{pv} \times P_{surf} = 18 \times 170 = 3060 \quad 4.23$$

$$P_{champ} = 3060 \text{ Wc} \quad 4.24$$

IV.8.2.2.3 Nombre de modules PV

$$N_{module} = \frac{P_{champ}}{P_{module}} = \frac{3060}{225} = 13,6 \quad 4.25$$

$$N_{\text{module}} \approx 14 \text{ module} \quad 4.26$$

IV.8.2.2.4 Choix pratique

14 modules PV de 225 Wc chacun.

IV.8.2.3 Dimensionnement de l'onduleur

IV.8.2.3.1 Puissance de l'onduleur

$$P_{\text{ond}} = \frac{P_{\text{max}}}{\eta_{\text{tot}}} = \frac{910}{0,75} = 1213,33 \quad 4.27$$

$$P_{\text{ond}} \approx 1,3 \text{ kW} \quad 4.28$$

IV.8.2.3.2 Choix pratique

Un onduleur de 1,5 kW sous 48 V est recommandé pour garantir une marge de sécurité.

IV.8.2.4 Dimensionnement du stockage

IV.8.2.4.1 Énergie totale à stocker pour 2 jours

$$E_{\text{stockage}} = E_{\text{cons}} \times N_{\text{autonomie}} = 19680 \times 2 = 39360 \quad 4.29$$

$$E_{\text{stockage}} \approx 39,36 \text{ kWh} \quad 4.30$$

IV.8.2.4.2 Capacité nominale du parc batterie

$$C_{\text{batt}} = \frac{E_{\text{stockage}}}{V_{\text{systeme}}} = \frac{39360}{48} = 820 \quad 4.31$$

$$C_{\text{batt}} = 820 \text{ Ah} \quad 4.32$$

IV.8.2.4.3 Configuration

3 batteries de 275 Ah organisées en série/parallèle pour atteindre la tension de 48 V et la capacité totale.

IV.8.2.5 Dimensionnement du régulateur de charge**IV.8.2.5.1 Courant du régulateur**

$$I_{\text{reg}} = \frac{P_{\text{ond}}}{V_{\text{batt}}} = \frac{1500}{48} = 31,25 \quad 4.33$$

$$I_{\text{reg}} \approx 31\text{A} \quad 4.34$$

IV.8.2.5.2 Choix pratique

Régulateur MPPT de 45 A sous 48 V, pour prévoir une marge de sécurité.

IV.8.3 Comparatif des deux sites

Paramètre	Tamanrasset	Tizi Ouzou
Irradiation solaire moyenne (kWh/m ² /jour)	7,5	4,5
Nombre de modules PV nécessaires	7	14
Onduleur recommandé	1,5 kW / 48 V	1,5 kW / 48 V
Capacité batterie totale	~820 Ah	~820 Ah
Régulateur recommandé	45 A MPPT	45 A MPPT

Tableau 4. 4 Comparaison entre valeur de la station télécom 5G à Tamanrasset et à Tizi-Ouzou

IV.8.4 Analyse comparative des deux sites

L'analyse des résultats montre que le dimensionnement du champ photovoltaïque dépend directement du niveau d'irradiation solaire. À Tamanrasset, grâce à un ensoleillement élevé, 7 modules PV suffisent pour couvrir les besoins énergétiques de la station, tandis qu'à Tizi Ouzou, où l'irradiation est plus faible, il est nécessaire d'installer environ 14 modules pour assurer la même production énergétique.

La capacité de stockage et la puissance de l'onduleur restent identiques pour les deux sites, car elles sont dictées par la consommation quotidienne de la station et l'autonomie désirée, indépendamment du potentiel solaire.

Cette comparaison souligne l'importance d'un dimensionnement spécifique à chaque site afin d'assurer la continuité de service tout en optimisant les coûts d'investissement et d'exploitation.

IV.8.5 Simulation et validation du dimensionnement photovoltaïque

Dans le cadre de la vérification du dimensionnement théorique du champ photovoltaïque destiné à alimenter une station télécom 5G en site isolé, une simulation a été réalisée sous Simulink/Simscape Electrical. Cette simulation reproduit le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque élémentaire, afin de générer les courbes caractéristiques Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V) pour des conditions climatiques spécifiques aux sites de Tamanrasset et Tizi Ouzou.

IV.8.5.1 Objectif de la simulation

L'objectif principal de cette modélisation est de :

- Vérifier la puissance de sortie réelle de la cellule pour différents niveaux d'ensoleillement.
- Analyser l'impact de l'irradiante sur le point de puissance maximale (MPP).
- Confirmer la cohérence du dimensionnement théorique du générateur photovoltaïque.

IV.8.5.2 Paramètres du modèle simulé

Dans Simulink/Simscape Electrical, le bloc **Solar Cell** est paramétré selon le modèle à 5 paramètres :

Tableau 4. 5 paramètres du bloc Solar Cell

Paramètre	Valeur	Unité	Remarque
Diode saturation current (I_s)	1e-6	A	Valeur typique pour cellule silicium
Solar-generated current (I_{ph0})	7.34	A	Courant généré en condition nominale
Irradiance used for measurements (I_r0)	<i>variable</i>	W/m ²	Selon le site simulé (voir ci-dessous)
Qualité factor (N)	1.5	-	Facteur de qualité du modèle
Series resistance (R_s)	0	Ohm	Hypothèse de base

Ces paramètres représentent une cellule PV typique, à valider pour le module choisi.

IV.8.5.3 Schéma global de la simulation

La Figure 1 présente le schéma global implémenté sous Simulink :

- Un bloc Repeating Sequence génère un signal de rampe pour faire varier la résistance de charge de la cellule.
- Le sous-système Subsystem1 contient la modélisation interne de la cellule photovoltaïque.

- Les sorties du sous-système (courant et tension) sont traitées pour calculer la puissance instantanée (bloc Product) et exportées dans l'espace de travail pour exploitation et tracé des courbes.

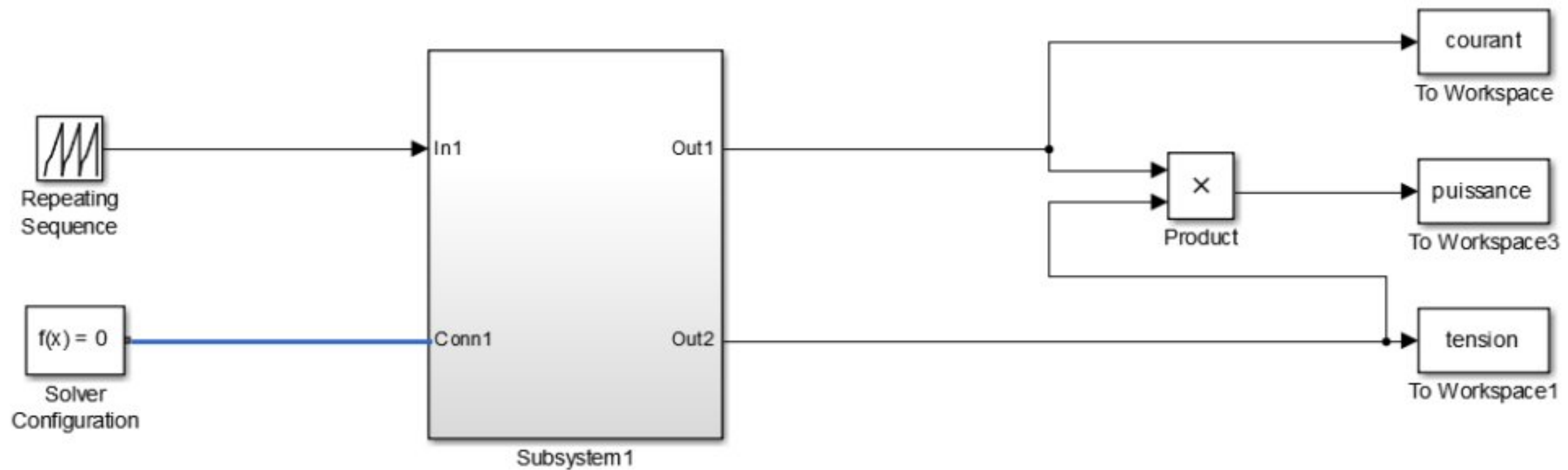


Figure 4. 1 Schéma global de la simulation de la cellule photovoltaïque.

IV.8.5.4 Résultats de la simulation

Les résultats obtenus à partir de la simulation sous Simulink permettent de visualiser les courbes caractéristiques de la cellule photovoltaïque pour des conditions climatiques spécifiques aux sites étudiés.

Les figures suivantes présentent respectivement les courbes Courant-Tension (I-V) et Puissance-Tension (P-V) simulées pour Tamanrasset et Tizi Ouzou.

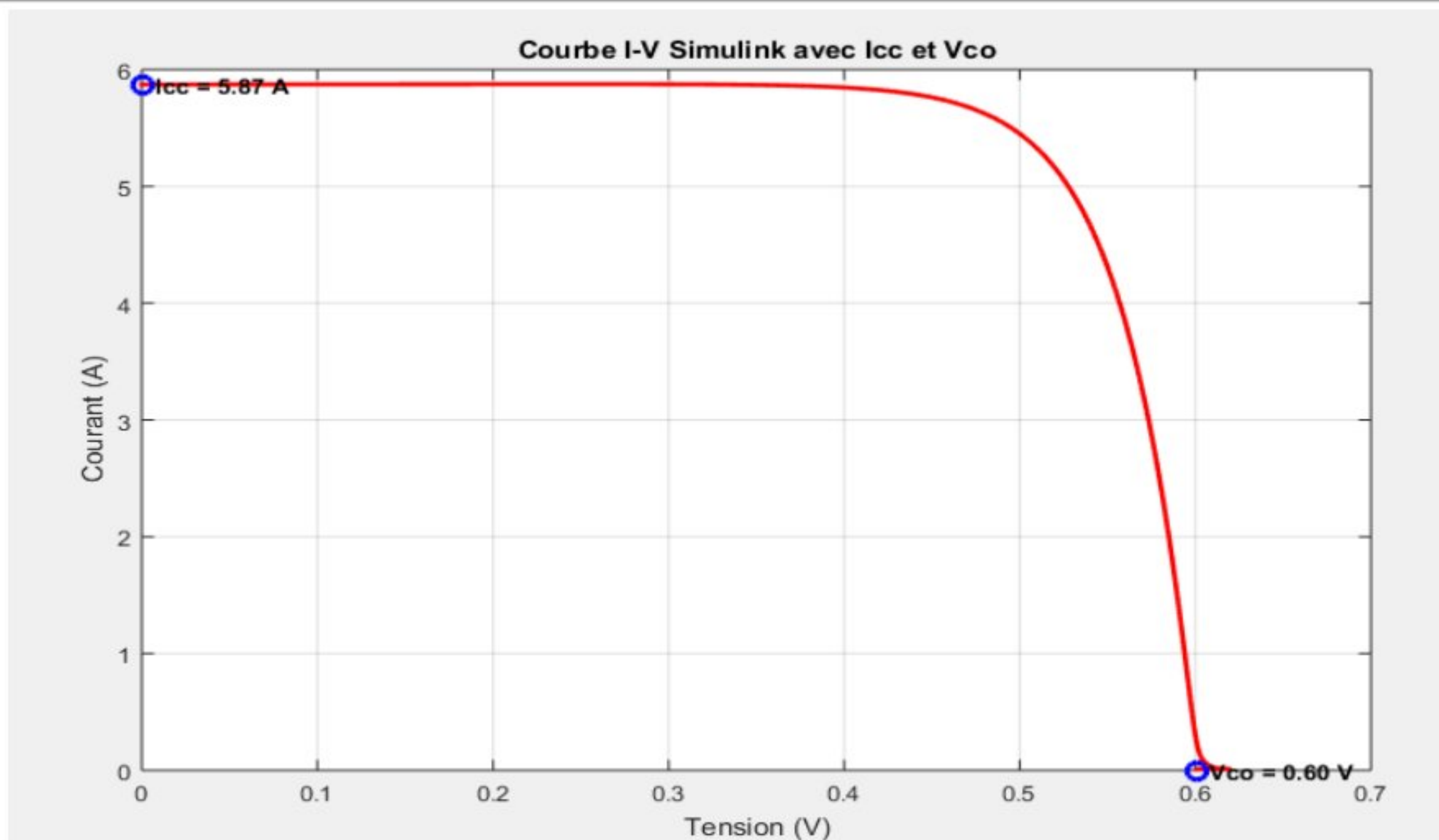


Figure 4. 2 Courbe I-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tizi Ouzou (450 W/m²).

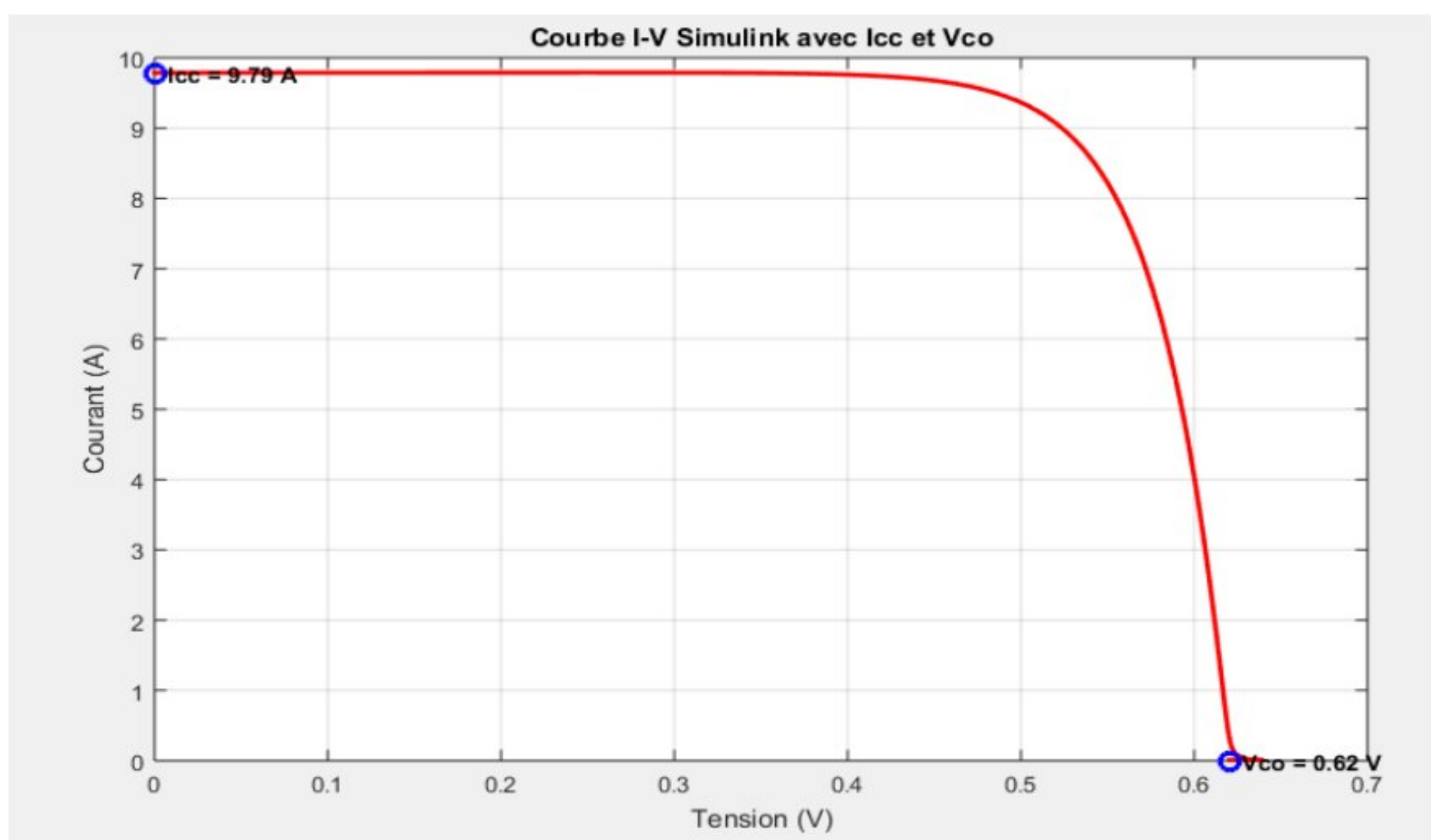


Figure 4. 3 Courbe I-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tamanrasset (750 W/m²).

Cette courbe met en évidence l'évolution du courant de sortie en fonction de la tension aux bornes de la cellule. On observe qu'une augmentation de l'irradiante entraîne une élévation notable du courant de court-circuit (I_{cc}), tandis que la tension en circuit ouvert (V_{co}) reste quasiment constante. Ce comportement est conforme aux caractéristiques physiques d'une cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin.

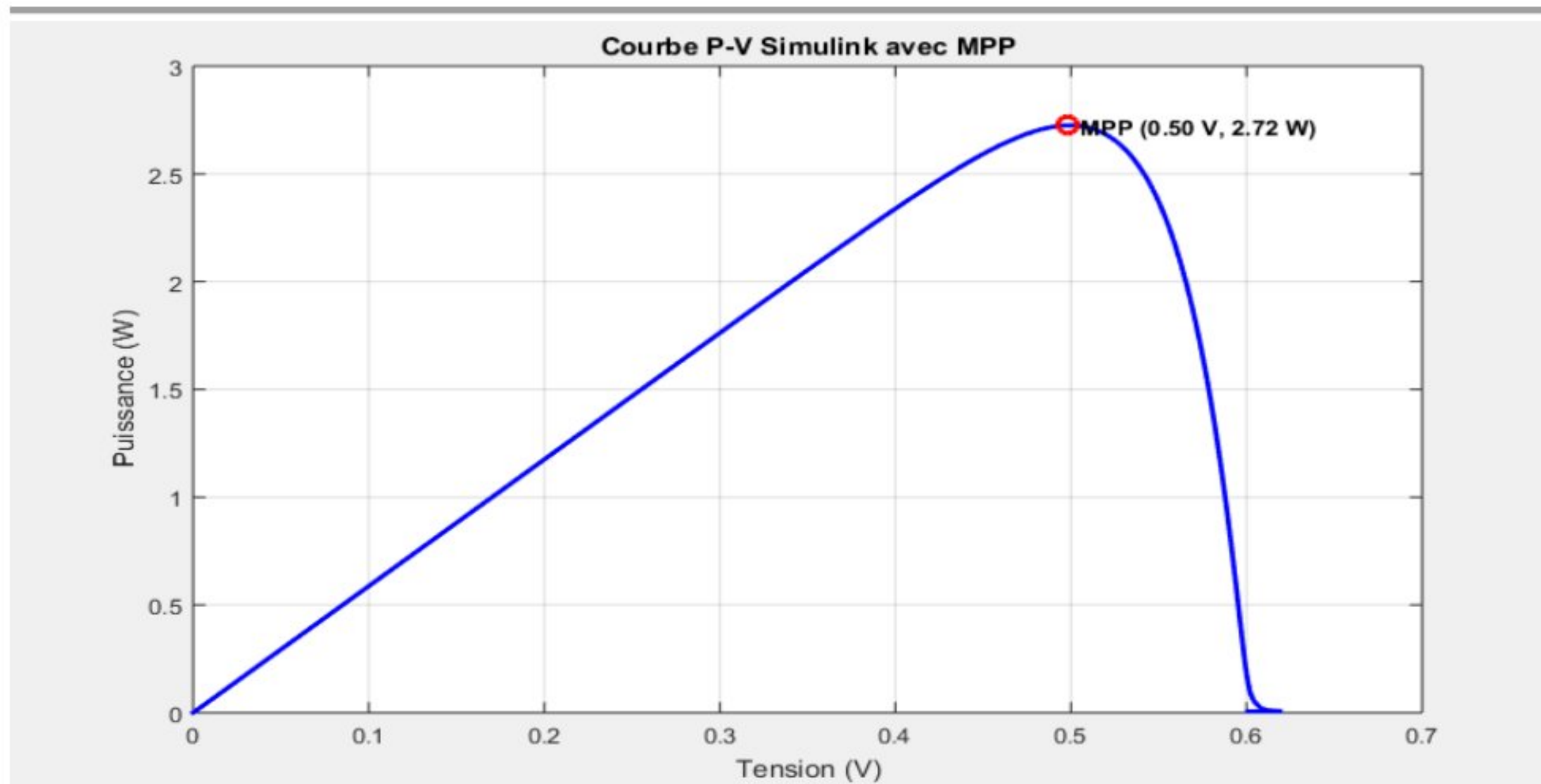


Figure 4. 4 Courbe P-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tizi Ouzou.

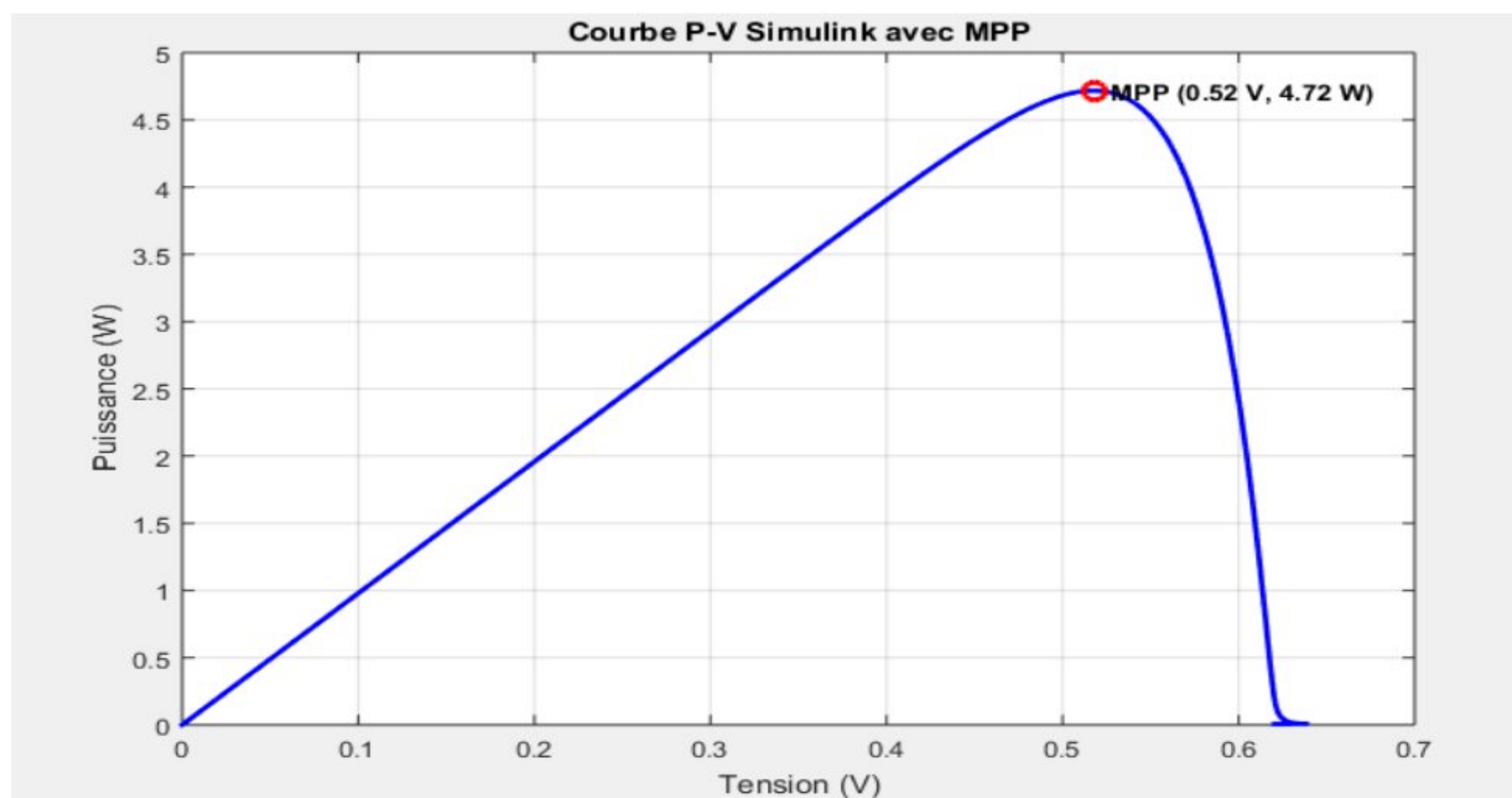


Figure 4. 5 Courbe P-V de la cellule photovoltaïque simulée pour Tamanrasset.

La courbe Puissance-Tension permet d'identifier la puissance maximale extraite de la cellule pour chaque niveau d'ensoleillement. Pour Tamanrasset, où l'irradiance est plus élevée, la puissance maximale se rapproche de la puissance crête nominale du module. Pour Tizi Ouzou, une irradiance plus faible réduit significativement la puissance disponible, justifiant l'augmentation du nombre de modules dans le dimensionnement final.

IV.8.5.5 Analyse et validation

Les résultats de simulation confirment les hypothèses posées lors du calcul théorique :

À Tamanrasset, l'ensoleillement élevé (750 W/m²) permet à la cellule de fonctionner proche de sa puissance maximale, assurant ainsi une production énergétique suffisante avec un nombre de modules réduit.

À Tizi Ouzou, l'ensoleillement plus faible (450 W/m²) entraîne une baisse de la puissance générée. Pour compenser ce déficit, il est nécessaire d'installer un nombre de modules plus élevé afin de maintenir la même capacité de production quotidienne.

Ainsi, la simulation valide la pertinence du dimensionnement différencié selon la localisation géographique, garantissant la couverture des besoins énergétiques de la station télécom 5G en site isolé.

IV.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté une méthodologie détaillée pour le dimensionnement de systèmes photovoltaïques autonomes destinés à l'alimentation énergétique de stations de télécommunication implantées dans des sites isolés. L'étude comparative des sites de Tamanrasset et Tizi Ouzou a permis de démontrer l'influence directe des conditions d'irradiation solaire sur la configuration du générateur photovoltaïque, tandis que les exigences en matière de stockage et de conversion restent principalement dictées par le profil de consommation et le niveau de disponibilité requis.

Les simulations et calculs ont confirmé que, pour les zones à fort rayonnement comme le Sahara, la capacité de production peut être optimisée sans recours à un surdimensionnement excessif, réduisant ainsi les coûts d'investissement. En revanche, pour les régions à ensoleillement plus modéré, il est nécessaire d'adapter la taille du champ PV et la capacité de stockage afin de maintenir la continuité de service, en tenant compte des variations saisonnières et des conditions environnementales contraignantes.

Dans un contexte de télécommunications, la conception d'un système photovoltaïque doit intégrer des marges de sécurité suffisantes pour faire face aux imprévus climatiques et aux contraintes d'exploitation. Le choix de composants robustes, associés à une architecture adaptée

et à une stratégie de maintenance préventive, constitue un levier essentiel pour prolonger la durée de vie du système et garantir un taux de disponibilité supérieur à 99 %.

En conclusion, le dimensionnement rigoureux et le déploiement maîtrisé de solutions photovoltaïques autonomes représentent une alternative fiable et pérenne pour étendre la couverture des réseaux de télécommunication en zones rurales, contribuant ainsi à l'amélioration de l'accès aux services numériques sur l'ensemble du territoire

Conclusion Générale

Conclusion générale

À travers ce mémoire, un panorama complet de l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque pour l'alimentation des infrastructures de télécommunication en site isolé a été présenté, avec une attention particulière portée aux réalités climatiques et techniques de l'Algérie.

Dans un premier temps, une revue générale des énergies renouvelables a permis de rappeler leur rôle stratégique face aux défis énergétiques et environnementaux actuels. L'énergie solaire, en particulier, se distingue par son abondance sur le territoire national et son potentiel à répondre aux besoins des zones éloignées du réseau électrique.

Le deuxième volet a porté sur le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs principales caractéristiques. Cette partie a mis en lumière les aspects physiques et technologiques qui conditionnent le rendement des modules, ainsi que les paramètres essentiels à surveiller pour optimiser leurs performances.

Par la suite, l'intégration des systèmes photovoltaïques dans le domaine des télécommunications a été analysée, en insistant sur les différentes configurations possibles et les contraintes spécifiques liées à l'alimentation ininterrompue des équipements. Cette approche souligne l'importance d'une conception robuste et fiable, adaptée aux contraintes climatiques et aux sites souvent difficilement accessibles.

Enfin, une méthodologie complète de dimensionnement a été exposée et appliquée à des cas concrets, illustrant comment adapter la capacité du générateur photovoltaïque et du stockage aux conditions locales d'irradiation et aux exigences de disponibilité du service. Les exemples étudiés à Tamanrasset et Tizi Ouzou démontrent qu'un dimensionnement précis, associé à une gestion efficace, peut garantir une alimentation stable et durable pour les stations de télécommunications, même en conditions extrêmes.

Ce travail confirme que les systèmes photovoltaïques représentent une solution fiable et durable pour améliorer la couverture télécom dans les zones isolées, tout en favorisant le recours aux énergies propres. Il reste toutefois recommandé de poursuivre les efforts en matière d'innovation technologique et de maintenance préventive pour assurer la pérennité et la performance de ces installations.

Références

- [1] REN21, « Renewables 2023 Global Status Report », Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, Paris, 2023.
- [2] International Energy Agency (IEA), « World Energy Outlook 2023 », IEA, Paris, 2023.
- [3] A. Demirbas, *Energy Sources, Green Energy and Technology*. Springer, 2011.
- [4] M. Green et al., « Solar cell efficiency tables (version 62) », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 30, no. 1, pp. 3–12, 2022.
- [5] J. Nelson, **The Physics of Solar Cells**. Imperial College Press, 2003.
- [6] G. Walker et al., « Integration of renewable energy sources in telecommunication systems », *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 12, pp. 94–101, déc. 2010.
- [7] A. Osseiran et al., « Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project », *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 26–35, mai 2014.
- [8] M. Deruyck, W. Joseph et L. Martens, « Power consumption in wireless access networks », in **Green Communications: Principles, Concepts and Practice**. John Wiley & Sons, 2015.
- [9] ITU-T, « Green power for mobile base stations », *ITU Toolkit on Environmental Sustainability for the ICT Sector*, International Telecommunication Union, Genève, 2021.
- [10] « Énergie renouvelable : sources et données de production 2024 », *ConnaissanceDesEnergies.org*, Consulté le : 20 avril 2025
- [11] F. Sylia et C. C. Armando, « La valorisation des énergies renouvelables en Algérie : enjeux et défis », Consulté le : 17 mai 2025
- [12] N. Piovesan, D. Lopez-Perez, A. D. Domenico, X. Geng et H. Bao, « Power Consumption Modeling of 5G Multi-Carrier Base Stations: A Machine Learning Approach », 8 déc. 2022.

- [13] A. Kwocan, M. D. Buhari, K. Ukagwu et J. Serugunda, « On-site Energy Utilization Evaluation of Telecommunication Base Station: A Case Study of Western Uganda », *KIU J. Sci. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–9, avr. 2023, doi : 10.59568/KJSET-2023-2-1-01.
- [14] L. Pierre-Olivier, « Option Valorisation des Energies Renouvelables », cours présenté par Mme AZIZI Amina
- [15] « Énergie biomasse : définition, fonctionnement, avantages », Consulté le : 20 avril 2025
- [16] Ecoco2, « Les énergies renouvelables : première source d'électricité en Europe en 2024 », *Ecoco2.com* , Consulté le : 21 juin 2025
- [17] « Énergie hydroélectrique : définition et explications », *Techno-Science.net*, Consulté le : 14 avril 2025
- [18] D. Y. Goswami, F. Kreith et J. F. Kreider, **Principles of Solar Engineering**, 3rd ed. Taylor & Francis, 2000.
- [19] « Énergie hydraulique : comment cela fonctionne ? », *HopEnergie.com*, Consulté le : 20 avril 2025
- [20] H. Mammar et M. Belarbi, « Étude des paramètres influençant les performances des cellules solaires sensibilisées par colorant », *Memoire Online*, Consulté le : 22 avril 2025
- [21] Coral, « Installations à biomasse (WTE) : avantages, risques et prévention », Consulté le : 21 juin 2025
- [22] « Géothermie », Wikipédia. Disponible : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Géothermie>.
- [23] M. Gatti, « Les énergies renouvelables, première source d'électricité en Europe », *Eco CO2*, Consulté le : 13 mai 2025
- [24] Ecolab Nalco Water, « Geothermal Power », Consulté le : 21 juin 2025
- [25] L'équipe de rédaction, « Energies renouvelables : avantages et inconvénients ». Consulté le : 13 avril 2025
- [26] C. Jacobs, « Les énergies renouvelables : des perspectives pour l'avenir », *Construction21.org*. Consulté le : 13 avril 2025

[27] Euronews Green, « Développer l'énergie éolienne face à la variabilité du climat », 1 juin 2022. Consulté le : 21 juin 2025

[28] Planète Énergies, « Cellule photovoltaïque – Principe de fonctionnement ». Consulté le : 26 avril 2025

[29] Cozynergy, « Les dernières technologies de panneaux solaires : ce qu'il faut savoir », 2024 . Consulté le : 21 juin 2025

[30] France Renouvelables, « Énergie solaire : fonctionnement des panneaux photovoltaïques ». Consulté le : 26 avril 2025

[31] Technique Solaire, « Les avantages des énergies renouvelables ». Consulté le : 13 avril 2025

[32] C. Fournier, « Les énergies renouvelables sont-elles vraiment une solution écologique ? », Youmatter. Consulté le : 13 avril 2025

[33] « Effet photovoltaïque ». Disponible sur : <https://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/effet-photovoltaïque.html>. Consulté le : 22 avril 2025

[34] « Étude et Simulation d'un panneau photovoltaïque ». Disponible sur : <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/Memoire-finale-pdf.pdf>. [Consulté le : 20 avril 2025].

[35] C. Farida et G. Naima, « Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome ».

[36] A. Carré, « Fonctionnement d'un panneau solaire photovoltaïque : notions générales », Acsolue Energie. Consulté le : 26 avril 2025

[37] Écohabitation, « Comment la lumière peut-elle se transformer en électricité ? ». Consulté le : 22 avril 2025

[38] A. Touati, « Structure et diagramme de bande d'une cellule photovoltaïque », ResearchGate ,Consulté le : 21 juin 2025

[39] M. Said, « Étude et Simulation des paramètres électriques d'une cellule solaire photovoltaïque à base de Silicium ».

- [40] eCampusOntario, « CHAPITRE 2 : Évaluation des ressources solaires », févr. 2024
Consulté le : 26 avril 2025
- [41] M. Benchohra et L. Mouaz, « Étude des propriétés électriques d'une cellule solaire à gap gradué », Thesis, Université Ibn Khaldoun, 2019.
- [42] « Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques », Énergie Plus Le Site. Consulté le : 29 avril 2025
- [43] « Modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque ». [En ligne]. Disponible sur : <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/04/Memoire.Achouri-Med-Cherif.pdf>. [Consulté le : 14 avril 2025].
- [44] S. Haddad, N. Benamrouche, M. A. Handala, M. Rachek et M. Bouheraoua, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative ».
- [45] « Caractéristique résultante d'un groupement de n_s cellules en série », ResearchGate. Consulté le : 30 avril 2025
- [46] « Caractéristique résultante d'un groupement de n_p cellules en parallèle », ResearchGate..Consulté le : 17 mai 2025
- [47] D. Mahamat Defallah, « Étude et conception d'une chaîne photovoltaïque connectée au réseau et étude de la qualité de l'énergie injectée », Memoire Online. Consulté le : 30 avril 2025
- [48] Planète Énergies, « La cellule photovoltaïque : comment ça marche Consulté le : 26 avril 2025
- [49] Green Lancer, « The Use of Solar Power for Telecom Towers », Green Lancer, 2023
- [50] S. Zhang, S. Liu, Y. Shen, A. Shukla, A. R. Mazhar et T. Chen, « Critical review of solar-assisted air source heat pump systems in China: Development, applications, and policy implications », Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 193, 2024, 114291
- [51] Y. Ali, A. Farid et N. Arslan, « A Feasibility Study: Off-Grid Photovoltaic Solar Power Supply to the Remote Areas of Pakistan », ResearchGate, 2023.

- [52] M. W. Baidas, M. F. Almusaiem, R. M. Kamel et S. S. Alanzi, « Renewable-Energy-Powered Cellular Base-Stations in Kuwait's Rural Areas », *Energies*, vol. 15, no. 7, p. 2334, 2022.
- [53] United Nations Development Programme (UNDP), « Goal 7: Affordable and clean energy ».
- [54] M. N. Uddin, M. M. Biswas et S. Nuruddin, « Techno-economic impacts of floating PV power generation for remote coastal regions », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 51, 2022, 101930
- [55] A. S. Ogunjuyigbe, T. R. Ayodele et O. A. Akinola, « Optimal allocation and sizing of PV/wind/split-diesel/battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building », *Applied Energy*, vol. 171, pp. 153–171, juin 2016.
- [56] M. F. F. Alhamad, S. Rehman et S. A. Al-Subaie, « Design and analysis of standalone photovoltaic system for remote telecommunication stations », *Renewable Energy*, vol. 107, pp. 274–284, mars 2017.
- [57] A. Elhadj, A. B. Zerrouki et A. Kheloui, « Sizing and optimization of autonomous photovoltaic system for rural electrification », *Energy Procedia*, vol. 50, pp. 597–606, 2014.
- [58] M. J. Reno, C. W. Hansen et J. R. Stein, « Global horizontal irradiance clear sky models: Implementation and analysis », NREL Technical Report, 2012.
- [59] D. S. Reddy et V. R. Reddy, « A review of sizing optimization techniques for standalone photovoltaic systems », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57, pp. 1116–1129, mai 2016.
- [60] R. Messenger et J. Ventre, *Photovoltaic Systems Engineering*, 3rd ed., Boca Raton, FL, USA : CRC Press, 2012.