REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
- تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Énergie et environnement

Présenté par : ZAHAF Imad Eddine

BABA Meriem

Thème

Conception d'un système d'éclairage agricole alimenté par énergie solaire

Soutenu publiquement, le 29 septembre 2026, devant le jury composé de :

M. Mohammed MEBROUKI	M.C.A	ESSA Tlemcen	Président de jury
Mme. Inchirah SARI ALI	M.C.A	Univ. Tlemcen	Encadrante
Mme. Amina GHOMRI	Professeur	ESSA Tlemcen	Co-encadrante
M. Farid OUDJAMA	M.C.B	ESSA Tlemcen	Examinateur 1
Mme. Djamila KHERBOUCHE	M.C.A	ESSA Tlemcen	Examinateur 2

Année universitaire : 2025/2026

Remerciement

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante, Mme Inchirah SARI ALI, pour son accompagnement constant, sa disponibilité, ses précieux conseils, ainsi que pour la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre co-encadrante, Mme Amina GHOMRI, pour ses orientations pertinentes, son soutien scientifique et les nombreuses remarques constructives qui ont contribué à l'amélioration de ce travail.

Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur Mohammed MEBROUKI, Président du jury, pour l'honneur qu'il nous fait en acceptant de présider et d'évaluer ce mémoire.

Nos vifs remerciements s'adressent également à Monsieur OUDJAMA Farid et à Madame Djamila KHERBOUCHE pour avoir accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury. Leurs remarques, leurs observations et leur expertise constituent pour nous une contribution précieuse.

Nous remercions particulièrement Monsieur MESSIRDI Mohamed et Monsieur CHEMIDI Abdelkarim pour leurs conseils avisés, leur disponibilité et les connaissances qu'ils nous ont transmises durant notre formation.

Nos remerciements s'étendent à l'ensemble des enseignants, du personnel administratif et technique de l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, qui ont contribué à notre formation académique et à notre développement personnel tout au long de notre cursus universitaire.

Enfin, nous adressons notre gratitude à nos familles, à nos amis, à nos collègues ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont soutenus, encouragés et aidés de près ou de loin dans l'aboutissement de ce travail.

À toutes et à tous, nous exprimons notre sincère reconnaissance et notre profond respect.

Dédicace 1

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, qui ont toujours été ma plus grande source de force, de motivation et d'inspiration. Merci pour votre amour inconditionnel, votre soutien indéfectible, vos sacrifices et tous les efforts que vous avez consentis pour me permettre d'atteindre ce stade de mon parcours. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles, et aucun mot ne saurait exprimer pleinement ma gratitude et mon profond respect. Que ce travail soit le témoignage de ma reconnaissance et une modeste récompense pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À moi-même, pour les efforts fournis, les sacrifices consentis, les défis relevés et la persévérance dont j'ai fait preuve tout au long de ce parcours afin d'atteindre cet objectif.

À mes chers frères, Habibou et Nadir, ainsi qu'à mes chères sœurs, Khadidja et Ritadj, pour leur soutien, leurs encouragements et leur présence à mes côtés.

À Houari, Sifou et Hichem, ainsi qu'à tous mes cousins, amis et collègues de la faculté, pour leur aide, leur amitié et les précieux moments partagés durant ces années d'études.

À toute ma famille, avec une pensée particulière pour ma chère tante et mes grands-pères. Qu'Allah leur accorde Sa miséricorde et les accueille dans Son vaste paradis. Leur souvenir demeure une source de motivation et de force.

Enfin, je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma réussite et qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon parcours.

À tous, j'exprime ma sincère gratitude et mon profond respect.

Imad

Dédicace 2

Je dédie ce modeste travail, avant tout, à moi-même, pour tous les efforts fournis, pour la patience, le courage et la persévérance dont j'ai fait preuve durant tout ce parcours. Malgré les difficultés, les sacrifices, les moments de fatigue et de doute, j'ai continué à avancer jusqu'à atteindre cette étape importante de ma vie. Aujourd'hui, je suis fière de moi, fière d'avoir tenu bon et d'être arrivée jusqu'ici.

Je dédie ensuite ce travail à ma chère mère, la personne qui a tant souffert, prié et sacrifié pour moi. À celle qui m'a toujours soutenue, encouragée et accompagnée dans chaque étape de ma vie. Maman, si je suis arrivée là où je suis aujourd'hui, c'est grâce à ton amour, ta patience et tes sacrifices. Que Dieu te protège et te garde pour moi.

À mon cher père, que Dieu lui accorde Sa miséricorde et l'accueille dans Son vaste paradis. Cela fait seulement quatre mois que tu nous as quittés, mais ton absence est immense. J'aurais tellement aimé que tu sois présent aujourd'hui, que tu me voies réussir et que tu partages avec moi ce moment de joie. Cette réussite est aussi pour toi, papa. Que Dieu t'accorde Sa paix éternelle.

À mes chères sœurs Nabila et Jamila, qui ont toujours été présentes à mes côtés. Merci pour votre soutien, votre amour, vos encouragements et votre présence dans les moments difficiles comme dans les moments heureux. Vous avez été pour moi une source de force et de réconfort.

À mes chères amies, que je considère comme des sœurs : Ahlem, Souhila, Loubna, Rabiaa et Ikram. Merci pour votre amitié sincère, votre soutien, vos mots réconfortants et votre présence précieuse tout au long de ce parcours. Vous avez rendu les moments difficiles plus légers et les beaux moments encore plus précieux.

Enfin, je dédie ce travail à tous mes collègues, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'aiment, qui m'ont soutenue de près ou de loin, et qui ont cru en moi. À chacun de vous, je vous adresse toute ma gratitude et ma reconnaissance.

Meriem

Résumé

Ce mémoire présente l'étude, le dimensionnement et la simulation d'un système photovoltaïque autonome destiné à l'alimentation de l'éclairage d'une exploitation agricole située dans la région de Tlemcen. L'étude porte sur trois zones principales de la ferme : le hangar, l'étable et la serre. Dans un premier temps, les principes de conversion photovoltaïque ainsi que les différentes technologies d'éclairage sont étudiés, avec un intérêt particulier pour les cellules tandem pérovskite/silicium et la technologie LED. Le potentiel solaire du site et les besoins d'éclairage sont ensuite analysés afin de déterminer la consommation énergétique de l'exploitation. Le dimensionnement du système photovoltaïque est réalisé en prenant comme référence **le scénario hiver maximal**, considéré comme la situation la plus contraignante, avec une consommation journalière de **16,10 kWh/j**. Le système comprend un champ photovoltaïque tandem, un régulateur MPPT, un parc de batteries et des luminaires LED alimentés en courant continu. Le panneau tandem étudié présente une puissance de **605 Wc** et un rendement estimé à **28,8 %**. Une comparaison avec un module monocristallin en silicium de même puissance est également réalisée. Enfin, la modélisation et la simulation sous MATLAB/Simulink permettent d'étudier le comportement électrique du panneau tandem et de vérifier le fonctionnement du système autonome et du stockage énergétique. Les résultats obtenus montrent le potentiel de la technologie tandem pour les applications photovoltaïques agricoles autonomes.

Mots-clés : Énergie photovoltaïque, système autonome, éclairage agricole, LED DC, tandem pérovskite/silicium, batteries LiFePO4, MPPT, MATLAB/Simulink.

Abstract

This thesis presents the study, sizing, and simulation of a standalone photovoltaic system designed to supply the lighting requirements of an agricultural farm located in the Tlemcen region of Algeria. The study focuses on three main areas of the farm : the storage hangar, the stable, and the greenhouse. First, the basic principles of photovoltaic energy conversion and the main lighting technologies are reviewed, with particular attention to perovskite/silicon tandem solar cells and LED technology. The solar potential of the site and the lighting requirements are then analyzed in order to determine the energy demand of the farm. The photovoltaic system is sized according to the **maximum winter scenario**, considered the most demanding operating

condition, with a daily energy consumption of **16.10 kWh/day**. The proposed system consists of a tandem photovoltaic array, an MPPT charge controller, a battery storage system, and DC LED lighting loads. The studied tandem module has a rated power of **605 Wp** and an estimated efficiency of **28.8%**. A comparison with a conventional monocrystalline silicon module having the same rated power is also carried out. Finally, MATLAB/Simulink modeling and simulation are used to investigate the electrical behavior of the tandem module and to verify the operation of the autonomous photovoltaic system and its energy storage. The results demonstrate the potential of tandem photovoltaic technology for standalone agricultural applications.

Keywords : Photovoltaic energy, standalone system, agricultural lighting, DC LED, perovskite/silicon tandem, LiFePO4 batteries, MPPT, MATLAB/Simulink.

ملخص

يتناول هذا البحث دراسة وتصميم ومحاكاة نظام كهروضوئي مستقل مخصص لتغذية نظام الإضاءة في مزرعة فلاحية تقع بمنطقة تلمسان في الجزائر. تركز الدراسة على ثلاث مناطق رئيسية بالمزرعة، وهي المستودع والإسطبل والبيت البلاستيكي. في البداية، تم عرض المبادئ الأساسية لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، بالإضافة إلى دراسة تقنيات الإضاءة المختلفة، مع التركيز بشكل خاص على الخلايا الشمسية الترادفية من نوع بيروفسكايت/سيليكون وتقنية الإضاءة .LED بعد ذلك، تم تحليل الإمكانات الشمسية للموقع واحتياجات الإضاءة من أجل تحديد الاستهلاك الطاقوي للمزرعة. وقد تم اعتماد **سيناريو الشتاء الأقصى** كأساس لعملية تصميم النظام، باعتباره الحالة الأكثر صعوبة، حيث يبلغ الاستهلاك اليومي حوالي **16.10كيلوواط ساعي/اليوم** .يتكون النظام المدروس من حقل كهروضوئي ترادفي، ومنظم شحنMPPT ، ومجموعة من البطاريات، بالإضافة إلى أحمال إضاءة LED تعمل بالتيار المستمر. يتميز اللوح الترادفي المدروس بقدرة اسمية قدرها **605واط ذروة** وبمردود مقدر بحوالي .**28.8 %**كما تمت مقارنة أدائه مع لوح كهروضوئي تقليدي أحادي التبلور من السيليكون له نفس القدرة الاسمية. وأخيرًا، تم استخدام برنامج MATLAB/Simulink لنمذجة ومحاكاة الخصائص الكهربائية للوح الترادفي والتحقق من أداء النظام الكهروضوئي المستقل ونظام تخزين الطاقة. وتبين النتائج الإمكانات الواعدة لتقنية الألواح الترادفية في التطبيقات الكهروضوئية الزراعية المستقلة .

الكلمات المفتاحية :الطاقة الكهروضوئية، النظام المستقل، الإضاءة الزراعية، LED بالتيار المستمر، بيروفسكايت/سيليكون ترادفي، بطارياتLiFePO4 ، MPPT، MATLAB/Simulink.

Sommaire

Liste des figures i
Liste des tableaux iv
Liste des symboles v
Liste des acronymes vii
Inroduction générale 2

Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire et l'éclairage.

I. Introduction 5
I.1. Transformation de l'énergie solaire en énergie électrique : concepts généraux 5
I.1.1. La cellule photovoltaïque 5
I.1.2. Le dopage des matériaux semi-conducteurs 6
I.1.2.1. Dopage de type N 7
I.1.2.2. Dopage de type P 7
I.1.3. Jonction P-N 8
I.1.4. Principe de conversion photovoltaïque 9
I.1.5. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque 10
I.1.6. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque 10
I.1.7. Paramètres affectant sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque 12
I.1.7.1. Influence de température 12
I.1.7.2. Influence de L'éclairement 13
I.1.8. Facteur de forme (FF) 13
I.1.9. Le rendement 14
I.1.10. Technologie des cellules à pérovskite 14
I.1.10.1. Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskite 14
I.1.10.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à pérovskite 15
I.1.10.3. Caractérisation et performance des cellules solaires à pérovskite 16
I.2. Les systèmes photovoltaïques autonomes 18
I.3. Avantages et désavantages des systèmes photovoltaïques 19
I.4. L'éclairage : principes et caractéristiques fondamentales 20
I.4.1. Définitions du flux lumineux et de l'éclairement 20

I.4.1.1. Flux lumineux 20
I.4.1.2. L'éclairement 20
I.4.2. Différents types d'éclairage existant 22
I.4.2.1. Eclairage direct 22
I.4.2.2. Eclairage indirect 22
I.4.2.3. Eclairage mixte 22
I.4.3. Luminaires 23
I.4.4. Technologies des sources lumineuses et adoption des LED 23
I.4.4.1. Lampes à incandescence 23
I.4.4.2. Lampes fluorescentes 26
I.4.4.3. Lampes à LED 28
I.4.4.4. Autres types de lampes 28
I.4.5. Choix de la technologie LED pour l'éclairage 29
I.5. Conclusion 29
Chapitre II : Etude et dimensionnement du système d'éclairage solaire.
II. Introduction 31
II.1. Analyse du site agricole 31
II.1.1. Localisation de la ferme agricole 31
II.1.2. Étude du climat de l'exploitation agricole 32
II.1.2.1. Évolution mensuelle de l'irradiation solaire globale du site 32
II.1.2.2. Évolution quotidienne de l'irradiation solaire globale du site 34
II.1.2.3. Données mensuelles de température du site étudié 36
II.2. Analyse des besoins lumineux de l'exploitation 37
II.2.1. Définition des zones de travail et objectifs d'éclairement 37
II.2.1.1. Le Hangar de stockage (Matériel et récolte) 38
II.2.1.2. L'étable (Zone d'élevage) 39
II.2.1.3. La serre agricole (zone de culture et de précision) 39
II.2.2. Méthodologie de dimensionnement de l'éclairage intérieur 39
II.2.2.1. Calcul de l'indice du local K et du facteur de suspension J 40
II.2.2.2. Facteur de réflexion FR 41
II.2.2.3. Facteur de dépréciation d 41

II.2.2.4. Facteur d'utilance u 42
II.2.2.5. Flux total à fournir F et la puissance totale 42
II.2.2.6. Placement des LEDs 43
II.2.3. Application pratique à la ferme étudiée 44
II.2.3.1. Sélection des sources lumineuses et luminaires : 44
II.2.3.2. Calculs détaillés par zone 45
II.2.3.3. Répartition des luminaires pour chaque zone 47
II.3. Profil de charge pour l'éclairage agricole 48
II.3.1. Profil de charge journalière 48
II.3.2. Profile de charge annuelle 51
II.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque 52
II.4.2. Dimensionnement du parc de batteries 52
II.4.2.1. Choix de la batterie (Lithium- Fer-Phosphate) 52
II.4.2.2. Calcul de nombre de batteries 53
II.4.3. Choix de régulateur de charge 53
II.4.4. Dimensionnement des panneaux photovoltaïques tandem (Pérovskite/Silicium) 55
II.4.4.1. Choix de panneaux photovoltaïque : 55
II.4.4.2. Calcul de nombre de panneaux photovoltaïque : 55
II.4.5. Choix des câbles 56
II.4.5.1. Câbles DC (panneaux → régulateur) 57
II.4.5.2. Câbles DC (régulateur → batteries) 58
II.5. Etude économique 58
II.5.1. Cas 1 : durée de vie du tandem limitée à environ 8 ans 60
II.5.2. Cas 2 : durée de vie du tandem comparable à celle du silicium 60
II.6. Conclusion 61

Chapitre III : Simulation et interprétations des résultats.

III. Introduction 63
III.I. Le panneau tandem pérovskite/silicium 64
III.2. Matlab SIMULINK 65
III.3. Simulation de panneau tendem 66
III.3.1. Modelisation de panneau 66

III.3.2. Résultats de simulation 68
III.3.2.1.Courbe I-V 68
III.3.2.2. Courbe P-V 68
III.3.2.3. Paramètres électriques obtenus 69
III.3.3. L'effet d'irradiance et température sur Voc , Isc , Pmax et le rendement 70
III.3.3.1. L'effet d'irradiance 70
III.3.3.2. L'effet de la température 73
III.4. Simulation de panneau silicium 77
III.4.1. Simulation avec Pvarray 77
III.4.2. Résultats de simulation avec Pvarray 78
III.4.3. L'effet d'irradiance et température sur Voc , Isc , Pmax et le rendement 79
III.4.3.1. L'effet d'irradiance 79
III.4.3.2. L'effet de la température 80
III.5. Interprétations des résultats et comparaison entre tandem et silicium 82
III.5.1. Interprétations des résultats 82
III.5.2. Comparaison générale 84
III.6. Simulation du système photovoltaïque autonome avec batteries pour l'alimentation d'éclairage 85
III.6.1. Étapes de simulation du champ photovoltaïque autonome 86
III.6.1.1. Modélisation du champ photovoltaïque 86
III.6.1.2. Mesure de la tension et du courant du champ PV 88
III.6.1.3. Commande MPPT et méthode de « switch » 88
III.6.1.4. Convertisseur DC-DC 89
III.6.1.5. Batteries de stockage 90
III.6.1.6. Bus continu DC 91
III.6.1.7. Commande de gestion de la batterie 91
III.6.1.8. La charge DC (LED) 92
III.6.2. Résultats de simulation 93
III.6.2.1. Fonctionnement pendant la journée 93
III.6.2.1.1. Fonctionnement du MPPT et la méthode Switch 93
III.6.2.1.2. l'état de chargement de batteries 95

III.6.2.2. Fonctionnement pendant la nuit 96
III.6.2.2.1. Décharge de la batterie 96
III.6.2.2.2. Alimentation de la charge LED 97
III.6.3. interprétation des résultats 99
III.7. Conclusion 101
Conclusion générale 104
Références bibliographique 107

Liste des figures

Figure I.1 : Composition d'une cellule solaire . **6**
Figure I.2 : Structure de silicium. **6**
Figure I.3 : Dopage de type N **7**
Figure I.4 : Dopage de type P **8**
Figure I.5 : Jonction P-N. **8**
Figure I.6 : L'effet photovoltaïque . **9**
Figure 1.7 : fonctionnement de cellule photovoltaïque. **10**
Figure 1.8 : Caractéristique I-V **11**
Figure I.9 : Caractéristiques de la cellule photovoltaïques. **12**
Figure I.10 : Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V . **12**
Figure I.11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V . **13**
Figure I.12 : Représentation des différentes configurations : a) architecture planaire classique (n-i-p) b) architecture mésoscopique classique (n-i-p) c) architecture planaire inversée (p-i-n) . **15**
Figure I.13 : Une cellule à pérovskite : HTL pour les trous, ETL pour les électrons, couche active pour la lumière . **16**
Figure I.14 : Mesure des caractéristiques J-V des cellules solaires en lumière et obscurité .. **16**
Figure I.15 : Configuration d'un système photovoltaïque autonome . **18**
Figure I.16 : Flux lumineux **20**
Figure I.17 : Le changement du niveau moyen de luminosité . **21**
Figure I.18 : Eclairage direct et indirect . **22**
Figure I.19 : Eclairage mixte . **22**
Figure I.20 : Luminaire. **23**
Figure I.21 : Lampe Lampes à incandescence standard. **24**
Figure I.22 : Lampes tungstène-halogène. **25**
Figure I.23 : Tube fluorescente. **26**
Figure I.24 : Lampes fluorescentes compacts. **27**
Figure I.25 : Lampe à LED. **28**
Figure II.1 : Représentation satellitaire de ferme de chiali. **31**
Figure II.2 : Irradiation mensuelle de la ferme de l'année 2023. **32**
Figure II.3 : Irradiation journalier de la ferme. **34**
Figure II.4 : Température mensuelle de la ferme **36**

Figure II.5 : Diagramme de l'éclairement pour chaque zone de la ferme. **38**
Figure II.6 : Différents zone de la ferme agricole. **40**
Figure II.7 : Puissance LED vs nombre de luminaires. **47**
Figure II.8 : Profils journaliers de la puissance consommée pour les quatre scénarios d'éclairage. **50**
Figure II.9 : Energie journalière totale en fonction de chaque saison. **50**
Figure II.10 : Energie annuelle en fonction de chaque saison. **51**
Figure II.11 : Batterie AQ-LITH D48-50. ..... **53**
Figure II.12 : Régulateur de charge 120A MPPT Solar Charge Controller 480V PV Input. **54**
Figure II.13 : Système photovoltaïque autonome avec des batteries. **58**
Figure III.1 : Paramétrage du panneau tandem pérovskite/silicium sous Simulink. **67**
Figure III.2 : Schéma de simulation du panneau tandem pérovskite/silicium sous Simulink. **67**
Figure III.3 : Caractéristique I-V du panneau tandem pérovskite/silicium sous les conditions STC. **68**
Figure III.4 : Caractéristique P-V du panneau tandem pérovskite/silicium sous les conditions STC. **69**
Figure III.5 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V du panneau tandem pérovskite/silicium. **71**
Figure III.6 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique P-V du panneau tandem pérovskite/silicium. **71**
Figure III.7 : Variation du rendement du panneau tandem pérovskite/silicium en fonction de l'irradiance. **72**
Figure III.8 : Paramétrage du panneau tandem pour l'étude de l'influence de la température. **74**
Figure III.9 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V du panneau tandem pérovskite/silicium. **74**
Figure III.10 : Variation du rendement du panneau tandem pérovskite/silicium en fonction de la température. **75**
Figure III.11 : Caractéristiques I-V et P-V du module LONGi LR7-72HTH-605M simulées à 25 °C. **78**
Figure III.12 : Influence de l'irradiance sur les caractéristiques I-V et P-V du module silicium LONGi. **79**
Figure III.13 : Variation du rendement du module silicium LONGi en fonction de l'irradiance. **79**

Figure III.14 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V du module silicium LONGi. **81**
Figure III.15 : Variation du rendement du module silicium LONGi en fonction de la température. **81**
Figure III.16 : Comparaison du rendement des modules tandem pérovskite/silicium et silicium en fonction de l'irradiance. **83**
Figure III.17 : Comparaison du rendement des modules tandem pérovskite/silicium et silicium en fonction de température. **84**
Figure III.18 : Schéma de simulation du système photovoltaïque autonome avec batterie et onduleur pour l'alimentation de charge DC. **86**
Figure III.19 : Configuration du champ photovoltaïque dans le bloc PV Array. **87**
Figure III.20 : Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque complet. **87**
Figure III.21 : Algorithme MPPT basé sur la méthode Perturb and Observe. **88**
Figure III.22 : Stratégie de commande MPPT avec limitation du courant. **89**
Figure III.23 : Structure du convertisseur DC-DC Buck utilisé dans le système photovoltaïque autonome. **90**
Figure III.24 : Modèle de la batterie de stockage utilisé dans la simulation. **91**
Figure III.25 : Paramètres de la batterie Lithium-Ion utilisée dans la simulation. **91**
Figuer III.26 : Commande de gestion de la batterie. **92**
Figure III.27 : Algorithme de gestion de la charge et de la décharge de la batterie. **92**
Figure III.28 : La charge DC (charge résistive). **93**
Figure III.29 : Tension du champ photovoltaïque avant le convertisseur Buck pour 200W/m^2. **94**
Figure III.30 : Tension après le convertisseur Buck au niveau du bus continu. **94**
Figure III.31 : Le courant absorbé par les batteries en fonction de temps. **95**
Figure III.32 : Évolution du SOC de la batterie pendant la phase de charge. **95**
Figure III.33 : Évolution du SOC de la batterie pendant la phase de décharge. **96**
Figure III.34 : Tension continue aux bornes de la batterie et de la charge d'éclairage DC. **97**
Figure III.35 : Courant absorbé par la charge DC. **98**
Figure III.36 : Puissance active absorbé par la charge DC. **98**

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de système photovoltaïque [16]. **19**
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de lampe tungstène-halogène [19]. **25**
Tableau I.3 : Avantages et inconvénients de tube fluorescent. **26**
Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de lampes fluorescentes compacts. **27**
Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de lampes à LED [19]. **28**
Irradiation (W/m^2) **33**
Tableau II.1 : Evolution mensuelle du rayonnement solaire global du site agricole **33**
Tableau II.2 : Différentes valeurs journaliers d'irradiation globale de la ferme. **35**
Tableau II.3 : Zones de travail de la ferme. **37**
Tableau II.4 : Chiffres de facteur de réflexion [19]. **41**
Tableau II.5 : Différents valeurs des certains facteurs [19]. **42**
Tableau II.6 : Valeurs de facteur d'utilance u [19]. **42**
Tableau II.7 : Les distances maximales entre le luminaire [19]. **43**
Tableau II.8 : Caractéristiques techniques des luminaires sélectionnés pour les différentes zones de la ferme. **44**
Tableau II.9 : Synthèse des paramètres de dimensionnement d'éclairage LED par zone. **46**
Tableau II.10 : Durées d'éclairage (h/j) selon la saison et le niveau d'utilisation. **48**
Tableau II.11 : Energie journalière consommée (Wh/j) **49**
Tableau II.12 : Energie annuelle totale pour chaque scénario. **51**
Tableau II.13 : Caractéristiques de batterie AQ-LITH D48-50. ..... **52**
Tableau II.14 : Caractéristiques du régulateur de charge 120A MPPT Solar Charge Controller 480V PV Input. **54**
Tableau II.15 : Fiche technique d'un panneau tandem pérovskite et silicium. **55**
Tableau II.16 : Sections des câbles [22]. **57**
Tableau II.17 : Prix des équipements d'installation du système d'éclairage alimenté par le champ photovoltaïque. **59**
Tableau III.1 : Paramètres électriques du panneau tandem pérovskite/silicium [26]. **66**
Tableau III.2 : Paramètres électriques obtenus par simulation du panneau tandem pérovskite/silicium sous les conditions STC. **69**
Tableau III.3 : Paramètres électriques du module photovoltaïque en silicium monocristallin LONGi LR7-72HTH-605M. **77**

Liste des symboles

- **I** : Courant électrique.
- **V** ou **U** : Tension électrique.
- **Icc** ou **Isc** : Courant de court-circuit.
- **Voc** ou **Uoc** : Tension en circuit ouvert.
- **Pmax** : Puissance maximale délivrée par la cellule ou le module photovoltaïque.
- **IMPP** ou **JMPP** : Courant, ou densité de courant, au point de puissance maximale.
- **UMPP** ou **VMPP** : Tension au point de puissance maximale.
- **J** : Densité de courant.
- **J0** : Densité de courant de saturation.
- **Jph** : Densité de courant photogénéré.
- **η** : Rendement de conversion ou rendement du luminaire.
- **Pcu** : Puissance crête unitaire d'un module photovoltaïque.
- **Sm** : Surface du module photovoltaïque.
- **Enom** : Éclairement nominal standard, égal à 1000 W/m².
- **q** : Charge élémentaire.
- **λ** : Longueur d'onde de la lumière.
- **Ψph** : Flux spectral de photons.
- **F** : Flux lumineux total.
- **Fu** : Flux lumineux unitaire d'un luminaire.
- **E** : Éclairement lumineux.
- **E0** : Éclairement moyen initial.
- **Es** : Éclairement moyen en service.
- **Em** : Éclairement moyen maintenu.
- **K** : Indice du local.
- **J** : Indice de suspension.
- **FR** : Facteur de réflexion.
- **d** : Facteur de dépréciation lié à l'empoussiérage, à l'usure et à la maintenance.
- **u** : Facteur d'utilance.
- **a** : Longueur du local.
- **b** : Largeur du local.
- **h** : Hauteur utile entre le luminaire et le plan de travail.

- **h1** : Hauteur de suspension entre le plafond et le luminaire.
- **N** : Nombre total de luminaires.
- **Pu** : Puissance unitaire d'un luminaire.
- **PT** : Puissance totale installée.
- **DM** : Distance maximale entre deux luminaires.
- **Ej** : Énergie journalière consommée.
- **t** : Temps ou durée de fonctionnement.
- **W** : Watt, unité de puissance.
- **Wc** : Watt-crête, unité de puissance nominale d'un module photovoltaïque.
- **W/m²** : Watt par mètre carré, unité d'irradiance solaire.
- **Wh/j** : Wattheure par jour, unité d'énergie consommée quotidiennement.
- **kWh/j** : Kilowattheure par jour.
- **kWh/an** : Kilowattheure par an.
- **lm** : Lumen, unité de flux lumineux.
- **lx** : Lux, unité d'éclairement lumineux.
- **lm/W** : Lumen par Watt, unité d'efficacité lumineuse.
- **K** : Kelvin, unité de température de couleur.
- **°C** : Degré Celsius, unité de température.
- **SOC** : State Of Charge

Liste des acronymes

- **AM 1.5** : Air Mass 1.5 (Spectre solaire de référence utilisé pour les tests).
- **DC** : Direct Current (Courant continu).
- **DSSC** : Dye-Sensitized Solar Cells (Cellules solaires sensibles au colorant).
- **EQE** : External Quantum Efficiency (Efficacité quantique externe).
- **ESSA** : École Supérieure en Sciences Appliquées (Tlemcen).
- **ETL** : Electron Transport Layer (Couche de transport d'électrons).
- **FF** : Facteur de Forme (Fill Factor).
- **FTO** : Fluorine-doped Tin Oxide (Oxyde conducteur transparent).
- **HID** : High Intensity Discharge (Lampe à décharge haute pression).
- **HTL** : Hole Transport Layer (Couche de transport des trous).
- **IP** : Indice de Protection (exemples mentionnés : IP43, IP65).
- **IRC** : Indice de Rendu des Couleurs.
- **ITO** : Indium Tin Oxide (Oxyde conducteur transparent).
- **LED** : Light-Emitting Diode (Diode électroluminescente).
- **LFC** : Lampe Fluorescente Compacte.
- **LiFePO4** : Lithium Fer Phosphate (Technologie de batterie utilisée).
- **MPPT** : Maximum Power Point Tracking (Recherche du point de puissance maximale).
- **PCE** : Power Conversion Efficiency (Rendement de conversion de puissance).
- **PV** : Photovoltaïque.
- **SOC** : State of Charge (État de charge de la batterie).
- **STC** : Standard Test Conditions (Conditions standard de test : 1000 W/m² et 25 °C).
- **TCO** : Transparent Conductive Oxide (Oxyde conducteur transparent).

Introduction générale

L'énergie constitue un élément essentiel au développement des activités agricoles, notamment dans les exploitations isolées ou éloignées des infrastructures électriques. Dans ce contexte, l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution particulièrement intéressante grâce à la disponibilité de la ressource solaire et à la possibilité de mettre en place des systèmes autonomes adaptés aux besoins locaux. L'éclairage constitue notamment un besoin important dans les bâtiments agricoles, les zones d'élevage, les espaces de stockage et les serres, où il permet d'améliorer les conditions de travail, la sécurité et la continuité des activités pendant les périodes de faible luminosité.

Parallèlement, le développement des technologies LED permet de réduire considérablement la consommation électrique des systèmes d'éclairage. L'utilisation de luminaires alimentés directement en courant continu présente également un intérêt pour une installation photovoltaïque autonome, puisqu'elle permet de conserver une architecture énergétique simplifiée entre le stockage et la charge.

Dans ce travail, une attention particulière est portée à la technologie photovoltaïque tandem pérovskite/silicium, qui présente un potentiel de rendement supérieur à celui des modules classiques en silicium. Le panneau tandem étudié dans ce mémoire est modélisé à partir de paramètres issus de travaux expérimentaux et présente une puissance nominale de **605 Wc** avec un rendement simulé de **28,8 %**. Une comparaison avec un module monocristallin de même puissance permet d'évaluer son comportement sous différentes conditions d'irradiance et de température.

L'objectif principal de ce mémoire est donc de concevoir et d'évaluer un système photovoltaïque autonome destiné à l'éclairage d'une exploitation agricole située dans la région de Tlemcen. L'étude comprend l'analyse du potentiel solaire du site, la détermination des besoins d'éclairage du hangar, de l'étable et de la serre, le dimensionnement des équipements de production et de stockage, ainsi qu'une étude économique comparative entre les technologies tandem et silicium.

Le mémoire est organisé en trois chapitres. **Le premier chapitre** présente les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque et les technologies d'éclairage, en particulier les cellules à pérovskite et les LED. **Le deuxième chapitre** est consacré à l'étude du site agricole, à l'analyse des besoins d'éclairage, au profil de consommation et au dimensionnement du système photovoltaïque et de ses différents composants. **Le troisième chapitre** présente la modélisation et la simulation sous MATLAB/Simulink du panneau tandem, sa comparaison avec le silicium ainsi que la simulation du système autonome avec batteries et charge d'éclairage DC.

Cette démarche permet d’évaluer à la fois les performances énergétiques, le fonctionnement du stockage et la faisabilité globale de la solution étudiée.

.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie solaire et l'éclairage

I. Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire se présente comme une alternative incontournable, particulièrement pour l'électrification de sites isolés tels que les exploitations agricoles, où le raccordement au réseau classique est souvent complexe et coûteux.

Ce premier chapitre a pour objectif de poser les fondements théoriques indispensables à la compréhension et à la conception de notre système d'alimentation autonome. Dans un premier temps, nous aborderons les principes physiques de la conversion photovoltaïque, en mettant un accent particulier sur la technologie émergente des cellules à pérovskite, dont l'architecture innovante offre des rendements très prometteurs. Dans un second temps, nous examinerons les concepts essentiels de la photométrie et les différentes technologies de sources lumineuses. Cette analyse nous permettra de justifier de manière objective le choix technologique de l'éclairage LED, une étape primordiale pour la réduction de la consommation énergétique et l'optimisation globale de notre installation.

I.1. Transformation de l'énergie solaire en énergie électrique : concepts généraux

I.1.1. La cellule photovoltaïque

L'élément central de toute installation photovoltaïque est la photopile, également connue sous le nom de cellule photovoltaïque. Elle est conçue avec des matériaux semi-conducteurs et a la capacité de convertir directement la lumière en électricité [1].

Elle se compose principalement de [1] :

- Une mince couche de matériau semi-conducteur, caractérisée par une bande interdite qui sert de barrière énergétique que les électrons ne peuvent traverser sans une stimulation externe. Ce matériau, à l'instar du silicium, présente une conductivité significative et des caractéristiques électriques ajustables.
- Une couche anti-reflets qui promeut l'absorption optimale de la lumière solaire.
- Une électrode conductrice située sur le côté supérieur (cathode) et une autre sur le côté inférieur (anode).

Une cellule photovoltaïque fonctionne grâce à un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque, qui se manifeste par la production d'une force électromotrice lorsque sa surface est exposée à la lumière. En général, la tension produite varie entre 0,3 V et 0,7 V .

Cette variation dépend du matériau employé, de sa configuration ainsi que d'éléments tels que la température et l'usure de la cellule [2].

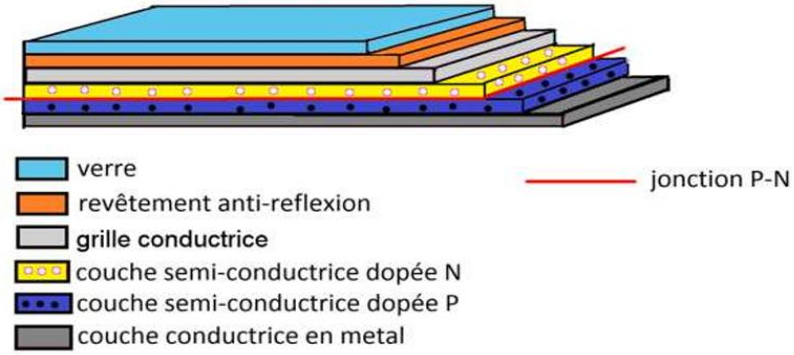


Figure I.1 : Composition d'une cellule solaire [1].

I.1.2. Le dopage des matériaux semi-conducteurs

Parmi les semi-conducteurs utilisés en photovoltaïque, le silicium est le plus connu. Il constitue la base de la majorité des cellules solaires et des dispositifs électroniques grâce à sa bonne conductivité, sa stabilité chimique et sa capacité à être facilement dopé pour former des zones P et N. Sa disponibilité et ses propriétés physiques en font le matériau de choix pour de nombreuses applications semi-conductrices.

Les semi-conducteurs sont des substances ayant une résistivité électrique située entre celle des conducteurs et celle des isolants. Le silicium, qui possède quatre électrons de valence, forme quatre liaisons covalentes avec les atomes environnants. Dans ce contexte, tous les électrons participent à ces liaisons, ce qui fait qu'aucun électron n'est disponible pour garantir la conductivité électrique [3].

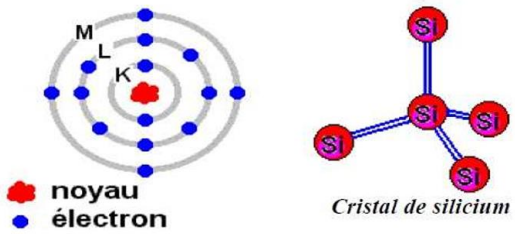


Figure I.2 : Structure de silicium.

Le dopage est une opération réalisée sur les semi-conducteurs dans le but d'augmenter leur conductivité électrique. En introduisant des impuretés spécifiques dans le matériau, il est possible de créer des zones P et N, essentielles au fonctionnement des dispositifs électroniques et des cellules photovoltaïques. Cette technique permet ainsi de contrôler précisément le comportement électrique du semi-conducteur et d'améliorer son efficacité.

I.1.2.1. Dopage de type N

Pour qualifier le semi-conducteur de type N, il faut observer que le cristal contient très peu de vides par rapport aux électrons. Cela se produit lorsqu'un atome de silicium est remplacé par un atome pentavalent, comme le phosphore, dont quatre électrons se lient aux atomes voisins tandis que le cinquième reste libre. Sous l'effet de la chaleur, cet électron libre peut facilement passer dans la bande de conduction, ce qui entraîne une augmentation significative du nombre d'électrons disponibles [3].

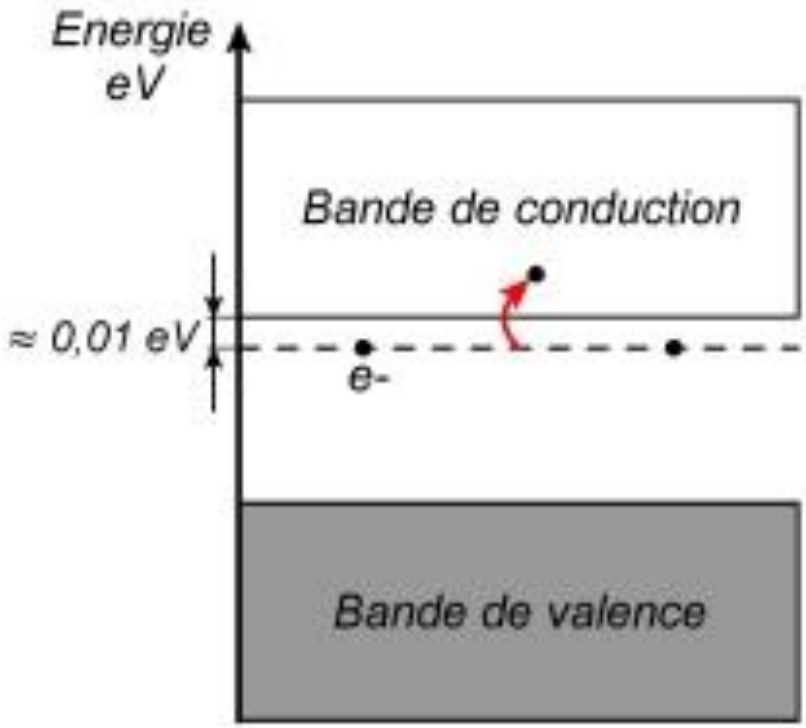


Figure I.3 : Dopage de type N

I.1.2.2. Dopage de type P

Quand on intègre des atomes trivalents, ceux-ci utilisent leurs trois électrons pour établir des liaisons covalentes avec trois atomes adjacents, laissant un vide en ce qui concerne la quatrième liaison. Ce vide peut se propager à travers le cristal, facilitant ainsi le passage du courant. Dans ce scénario, la quantité de trous dépasse de loin celle des électrons libres dans le cristal intrinsèque, produisant ainsi un cristal dopé de type P [3].

Ce type de dopage modifie profondément le comportement électrique du matériau, en rendant la conduction principalement assurée par les charges positives. Les trous créés se déplacent facilement dans le réseau cristallin, ce qui améliore la circulation du courant. Ainsi, le semi-conducteur obtenu présente des propriétés spécifiques adaptées à de nombreuses applications électroniques.

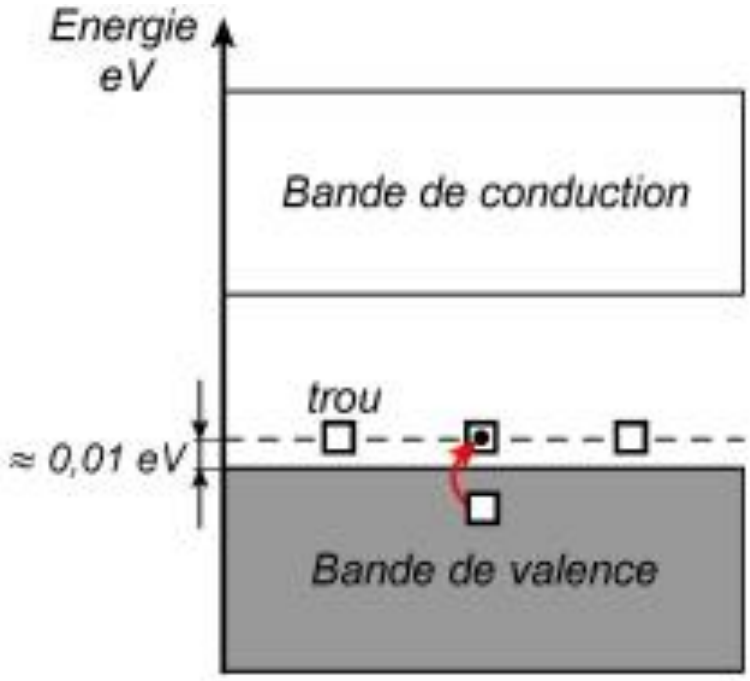


Figure I.4 : Dopage de type P

I.1.3. Jonction P-N

L'association d'une zone dopée P et d'une zone dopée N est ce que l'on appelle la jonction PN. Dans la zone de jonction, également connue sous le nom de zone de transition, les charges libres de chaque côté se séduisent et se recombinent, jusqu'à leur disparition. C'est dans cette zone que seuls les ions fixes subsistent, créant un champ électrique interne qui bloque la traversée de la jonction par les charges libres restantes dans les zones P et N, empêchant ainsi leur recombinaison [3].

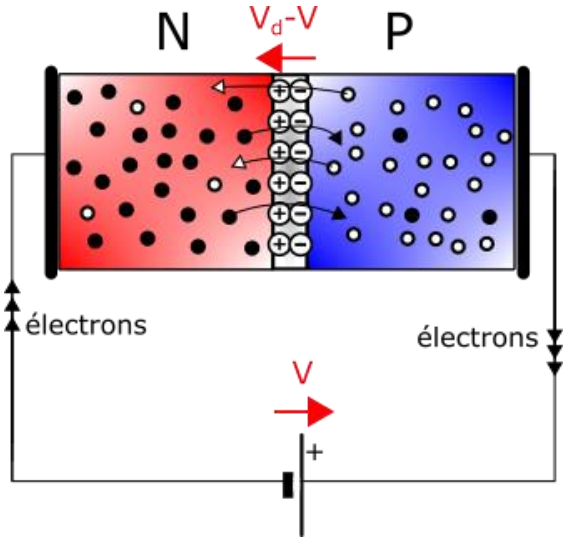


Figure I.5 : Jonction P-N.

I.1.4. Principe de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, soit la capacité des photons à créer des porteurs de charge (électrons et trous) dans un matériau, est le principe fondamental sur lequel repose la transformation de l'énergie solaire en électricité [1].

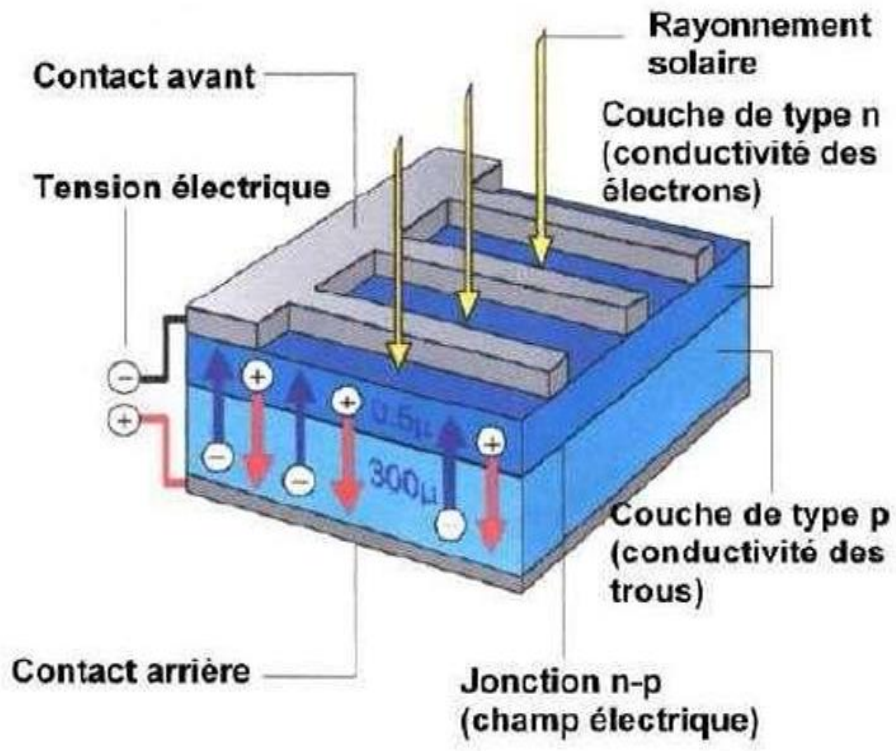


Figure I.6 : L'effet photovoltaïque [1].

Nous avons la figure I.6 qui décrit le phénomène. Quand un semi-conducteur est soumis à une lumière dont l'énergie des photons atteint au moins le gap énergétique du matériau, l'absorption de ces photons entraîne la transition des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, générant ainsi des paires électron-trou. Ces porteurs sont capables de conduire le courant dans le matériau lorsqu'il est polarisé, un phénomène connu sous le nom de photoconductivité [1].

Pour une jonction PN, les couples électrons-trous générés dans la zone de charge d'espace sont rapidement dissociés par le champ électrique existant, les électrons étant orientés vers la région N tandis que les trous se dirigent vers la région P. Si la jonction est isolée, une photo-tension apparaît à ses bornes ; si elle est connectée à une charge extérieure, un courant circule sans qu'aucune tension externe ne soit appliquée. Une cellule photovoltaïque fonctionne sur la base de ce principe [4].

I.1.5. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se produit lorsqu'un courant électrique dans un semi-conducteur est généré lorsque des électrons obtiennent assez d'énergie pour transiter de la bande de valence à la bande de conduction. Chaque électron qui reste en arrière crée une lacune, susceptible également de se déplacer et de contribuer au courant total [1].

On considère le courant électrique du matériau comme la combinaison des flux d'électrons et de trous.

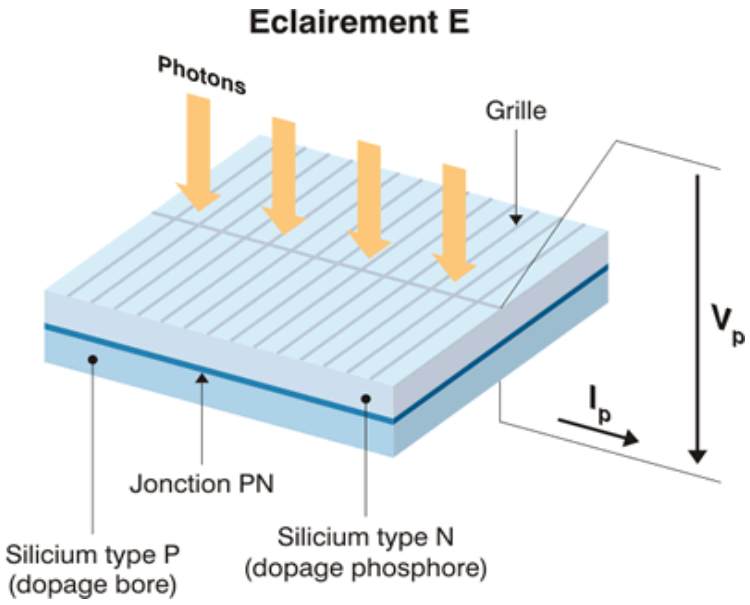


Figure 1.7 : fonctionnement de cellule photovoltaïque.

Quand le semi-conducteur capte l'énergie des photons, des couples électron-trou se créent. D'après la figure I.7, L'effet photoélectrique provoque une altération de la conductivité électrique, exploitée pour concevoir des composants passifs réactifs à la lumière, comme les résistances photoélectriques, couramment utilisées dans le domaine de la photographie et dans diverses applications de mesure de la lumière. Pour qu'un semi-conducteur agisse comme un composant actif, il est nécessaire de créer un flux de porteurs, ce qui exige une force capable de distinguer les électrons des trous en les orientant dans des directions contraires. Cette force est garantie par un champ électrique interne, généré grâce au dopage du matériau [5].

I.1.6. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Dans une cellule photovoltaïque, la puissance électrique générée dépend à la fois du courant fourni et de la tension aux bornes de la cellule. Ces deux paramètres sont déterminés par les propriétés intrinsèques de la cellule, mais aussi par les conditions d'utilisation, en particulier la nature de la charge connectée. Leur interaction est décrite par une relation bien définie, généralement représentée sous forme d'une courbe appelée caractéristique courant-tension.

Cette courbe traduit le comportement électrique de la cellule pour différents points de fonctionnement. Ainsi, comme tout dipôle électrique, la cellule photovoltaïque est caractérisée par cette représentation, qui permet d'analyser et de comprendre son fonctionnement global.

Cette représentation permet d'identifier les points de fonctionnement optimaux de la cellule en fonction des conditions d'utilisation. Elle constitue ainsi un outil essentiel pour analyser ses performances et adapter son exploitation [1].

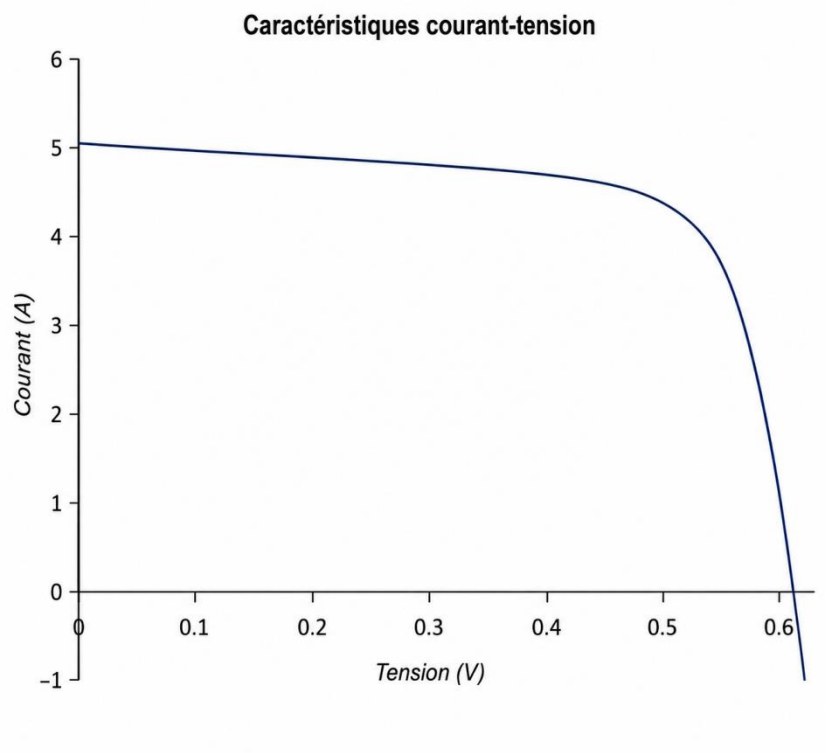


Figure 1.8 : Caractéristique I-V [6].

On peut distinguer des données importants dans l'étude de comportement de la cellule tel que [1] :

- **Courant de court-circuit (I_{cc})**

Le **courant de court-circuit** correspond au courant circulant dans la cellule photovoltaïque lorsque ses deux bornes sont reliées entre elles, ce qui entraîne une **tension nulle**. Dans ces conditions, la puissance électrique qui égale à produit de courant et la tension telle qu'elle est nulle dans ce cas-là.

- **La tension en circuit ouvert (V_{oc})**

La tension en circuit ouvert est celle mesurée aux bornes d'une cellule photovoltaïque sans connexion externe, donc sans courant. La puissance dépend du courant et de la tension, et le point de puissance maximale (MPP), défini par IMPP et UMPP, est représenté sur la courbe courant-tension et puissance-tension.

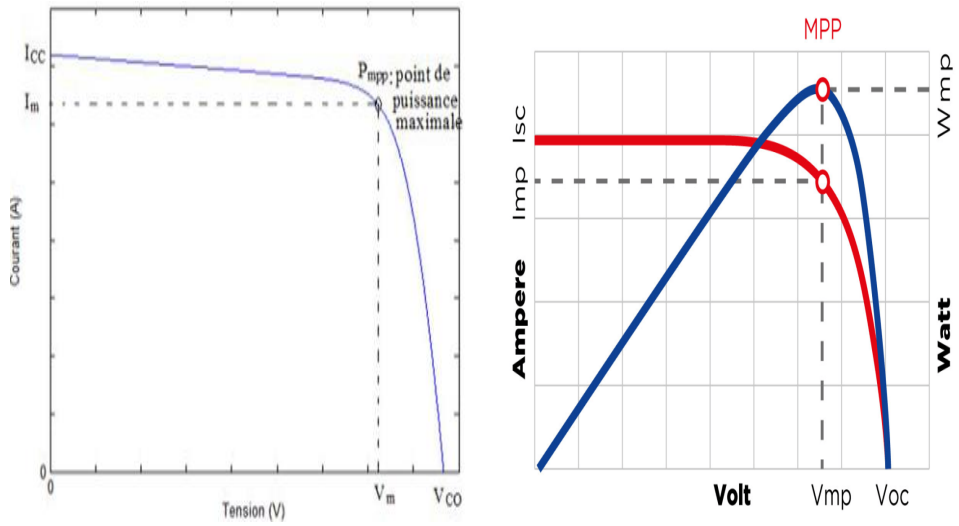


Figure I.9 : Caractéristiques de la cellule photovoltaïques.

I.1.7. Paramètres affectant sur le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.1.7.1. Influence de température

Les cellules solaires, qui sont directement exposées aux radiations solaires, voient leur fonctionnement influencé par la température de manière significative [7].

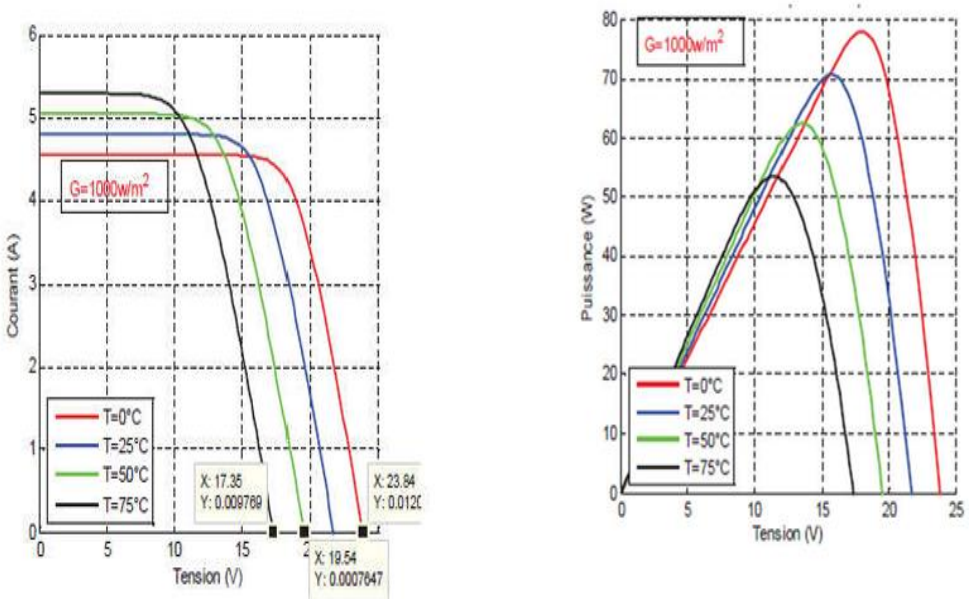


Figure I.10 : Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V [8].

D'après la figure I.10, L'augmentation de la température provoque une hausse du courant de court-circuit, mais elle a un effet négatif sur la tension en circuit ouvert, qui diminue. Par conséquent, la puissance maximale délivrée par la cellule décroît lorsque la température s'élève [9].

I.1.7.2. Influence de L'éclairement

L'éclairement influence la cellule photovoltaïque en modifiant sa courbe courant-tension : plus l'éclairement augmente, plus le courant de court-circuit (Isc) croît, tandis que la tension en circuit ouvert (Voc) reste presque constante [10].

Nous avons la figure I.11 qui montre les courbes suivantes :

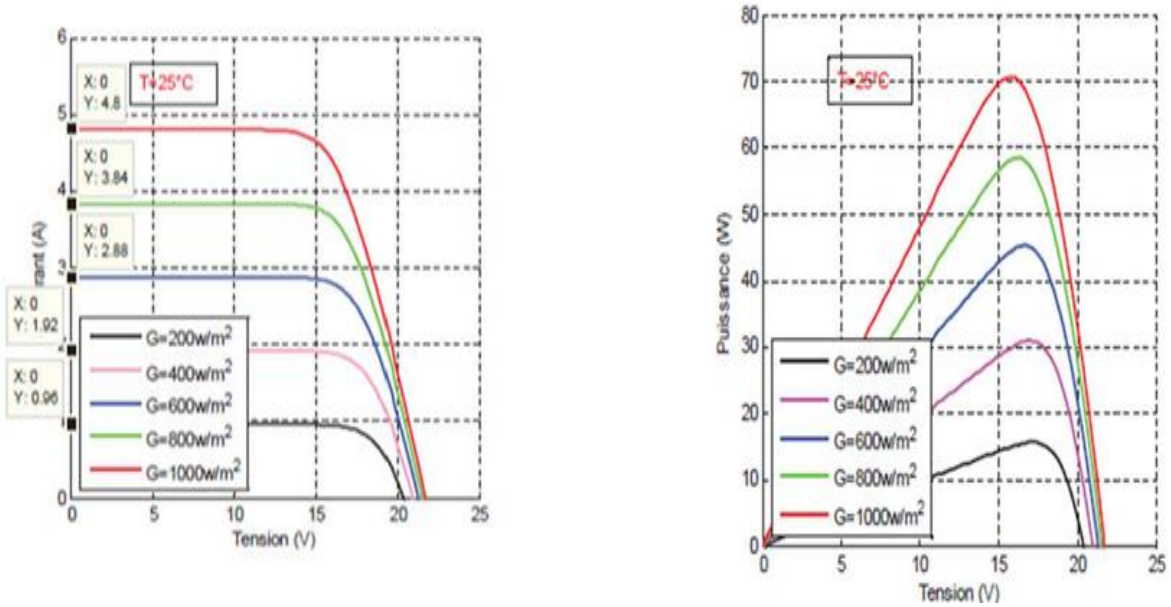


Figure I.11 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V [8].

I.1.8. Facteur de forme (FF)

Le coefficient de remplissage (FF) représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer une cellule (Pmax) qui égale à et la puissance théorique donnée par le produit du courant de court-circuit (Icc) par la tension en circuit ouvert (Uoc). Une valeur élevée de ce coefficient indique une plus grande puissance exploitable. Les cellules les plus performantes résultent de compromis technologiques visant à se rapprocher des caractéristiques idéales [1].

Le facteur de forme est défini par la relation suivant [11] :

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} \times I_{cc}} \qquad \text{(I.1)}$$

Avec :

$$P_{max} = U_{max} \times I_{max} \qquad \text{(I.2)}$$

I.1.9. Le rendement

Le rendement d'un module photovoltaïque correspond à sa performance mesurée dans la condition standard de test, c'est-à-dire sous un éclairement de 1000 W/m² et une température de cellule de 25°C.

Il est défini par la relation suivant [12]:

$$\eta = \frac{P_{cu}}{E_{nom} \times S_m} \quad \text{(I.3)}$$

Avec :

η : Rendement de la cellule.

P_{cu} : La puissance crête unitaire d'un module photovoltaïque en Watt

S_m : La surface de module photovoltaïque en m^2

E_{nom} : L'éclairement nominal standard égal à 1000W/m2

I.1.10. Technologie des cellules à pérovskite

I.1.10.1. Structure d'une cellule photovoltaïque à pérovskite

Dans une cellule solaire basée sur la pérovskite, la couche active est primordiale puisqu'elle capte la lumière et produit des charges. Cette couche, intrinsèquement caractérisée, est positionnée entre deux couches fonctionnelles garantissant le déplacement sélectif des porteurs : l'une consacrée aux électrons (ETL(Electron Transport Layer)) et l'autre aux trous (HTL(Hole Transport Layer)). Suite à l'absorption de lumière, des électrons et des trous sont générés puis orientés vers leurs couches spécifiques [13].

On identifie deux types d'architectures en fonction de la disposition des couches de transport autour de la pérovskite [14] : configuration normale (n-i-p), et configuration inversée (p-i-n).

- **Configuration normale (n-i-p)**

En mode normal, la couche de transport d'électrons (ETL) est directement connectée à l'oxyde conducteur transparent (TCO) placé en avant, comme le FTO ou l'ITO. On place ensuite la couche de pérovskite entre l'ETL et la couche de transport des trous (HTL), cette dernière étant connectée à une électrode métallique supérieure, souvent en argent ou en or. Dans ce dispositif, la lumière passe initialement par l'ETL avant de toucher la pérovskite, nécessitant ainsi l'emploi d'un matériau transparent de type n tel que le SnO_2 ou le TiO_2.

On parle de configuration planaire lorsque celle-ci est la plus simple. Une autre version, connue sous le nom de mésoscopique, s'inspire des cellules sensibles au colorant (DSSC) et intègre un

niveau additionnel de nanoparticules (comme le TiO_2) déposé sur l'ETL, ce qui améliore la collecte des électrons et réduit l'effet d'hystérésis [13].

- **Configuration inversée (p-i-n)**

La structure inversée fait référence à un arrangement contraire à la configuration habituelle. Dans cette configuration, la HTL est positionnée du côté de l'électrode transparente, alors que l'ETL se trouve du côté de l'électrode métallique. Cette structure exige l'emploi de matériaux transparents de classe p afin d'assurer une transmission lumineuse vers la couche de pérovskite sans pertes significatives. Donc, la lumière passe d'abord par la HTL avant de toucher la pérovskite. On mentionne souvent le NiOx, le PTAA et le PEDOT:PSS parmi les matériaux couramment employés pour cette couche [13]. La figure (I.11) illustre les différentes configurations ainsi que leurs différences :

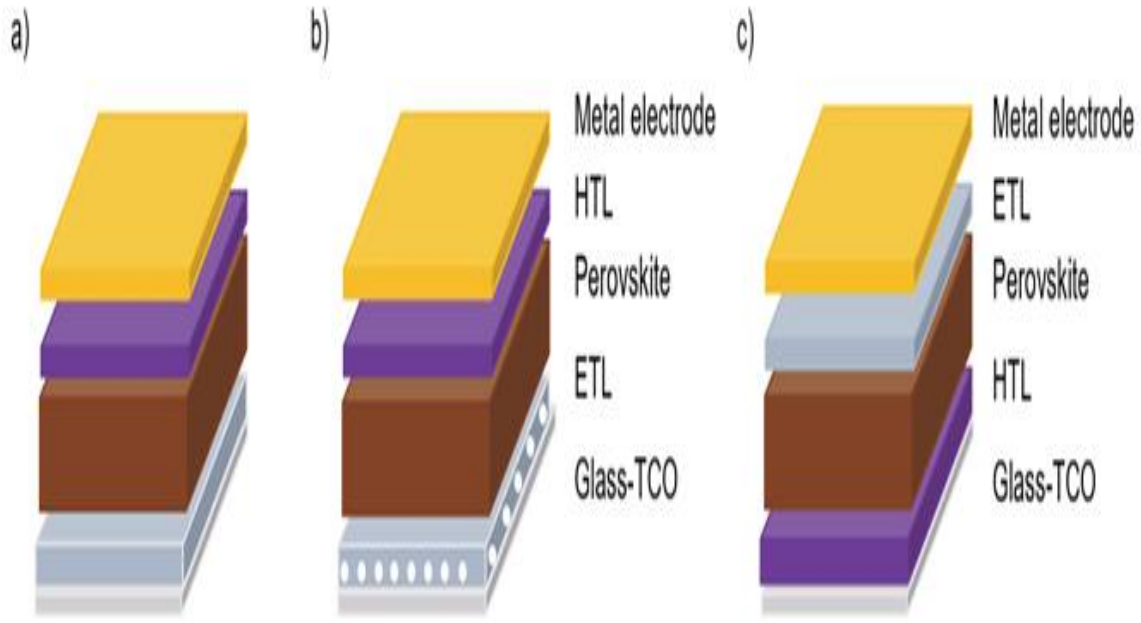


Figure I.12 : Représentation des différentes configurations : a) architecture planaire classique (n-i-p) b) architecture mésoscopique classique (n-i-p) c) architecture planaire inversée (p-i-n) [13].

I.1.10.2. Principe de fonctionnement d'une cellule solaire à pérovskite

Dans une cellule solaire à pérovskite, la HTL possède des bandes de valence et de conduction supérieures à celles de la pérovskite, tandis que celles de l'ETL sont inférieures. Lorsque la lumière crée des paires électron-trou, les trous migrent vers la HTL et les électrons vers l'ETL, chaque couche bloquant le passage des charges opposées [13].

Les électrodes connectent ces couches à un circuit externe, avec des TCO à l'avant pour laisser passer la lumière et un métal conducteur à l'arrière pour collecter les charges [13].

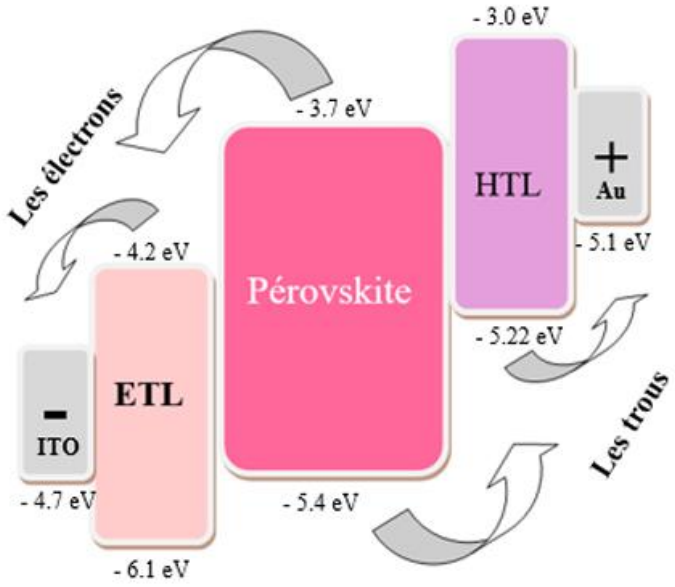


Figure I.13 : Une cellule à pérovskite : HTL pour les trous, ETL pour les électrons, couche active pour la lumière [13].

I.1.10.3. Caractérisation et performance des cellules solaires à pérovskite

Les cellules solaires à pérovskite sont évaluées sous lumière simulant le spectre solaire AM 1,5 (1000 W/m² à 25 °C) [15]. Le graphique J-V fournit la densité de courant à court-circuit (J_{sc}), la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le facteur de forme (FF) et l'efficacité de conversion (PCE) [13].

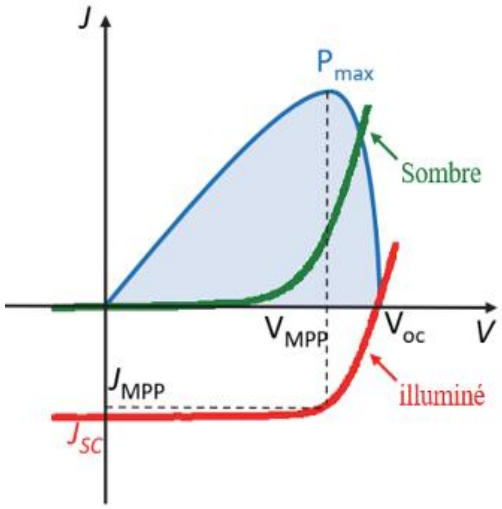


Figure I.14 : Mesure des caractéristiques J-V des cellules solaires en lumière et obscurité [13].

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) dépend de la densité de courant de saturation (J_0) et de la densité de courant photogénéré (J_{ph}). La J_0 est influencée par les phénomènes de recombinaison et peut varier en amplitude, tandis que le J_{ph} reste généralement stable.

La tension en circuit ouvert (V_{oc}) peut s'exprimer de la manière suivante [13] :

$$V_{oc} = \frac{K_B T}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{J_0}\right) \quad \text{(I.4)}$$

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} J_{sc}} = \frac{V_{MPP} J_{MPP}}{V_{oc} J_{sc}} \quad \text{(I.5)}$$

Le rendement de conversion de puissance (PCE) correspond au rapport entre la puissance maximale (P_{max}) fournie par la cellule solaire et la puissance incidente (P_{in}), représentée par la lumière reçue avec le spectre AM 1,5, indiquée par l'équation suivant :

$$PCE = \frac{P_{max}}{I_{in}} = \frac{V_{oc} J_{sc} FF}{I_{in}} \quad \text{(I.6)}$$

L'EQE représente le taux de photons entrants transformés en charges recueillies aux électrodes. On évalue celle-ci en exposant la cellule à une lumière monochromatique d'une longueur d'onde spécifique et en consignant le photocourant généré en relation avec cette longueur d'onde.

L'EQE est également défini par [13] :

$$EQE(\lambda) = \frac{I_{ph}(\lambda)}{q \psi_{ph,\lambda}} \quad \text{(I.7)}$$

Analyse du spectre d'efficacité quantique externe (EQE) constitue un outil essentiel pour évaluer la capacité d'une cellule solaire à convertir les photons incidents en charges électriques effectivement collectées. Cette analyse repose sur l'étude précise de chaque longueur d'onde de la lumière reçue par la cellule, en utilisant la charge élémentaire (q) et le flux spectral de photons (Ψph) correspondant à chaque longueur d'onde λ, déterminés à l'aide d'une diode calibrée. Grâce à ces données, il est possible de quantifier et de localiser les pertes au sein de la cellule, qu'elles soient d'origine optique, comme l'absorption inutile de photons, ou d'origine électrique, telles que la recombinaison des charges avant qu'elles ne soient collectées. Ces informations sont ensuite utilisées pour calculer la densité de courant à court-circuit (Jsc), représentant une mesure directe de la capacité de la cellule à générer du courant sous illumination. L'analyse du spectre EQE fournit ainsi une quantification précise de la performance globale de la cellule solaire et offre une base fiable pour comparer différents dispositifs ou optimiser leur conception afin d'améliorer leur efficacité [13].

I.2. Les systèmes photovoltaïques autonomes

Un système photovoltaïque autonome est destiné à fournir de l'électricité à un endroit éloigné et intègre une capacité de stockage d'énergie sans besoin d'intégration à autre source d'énergie [16].

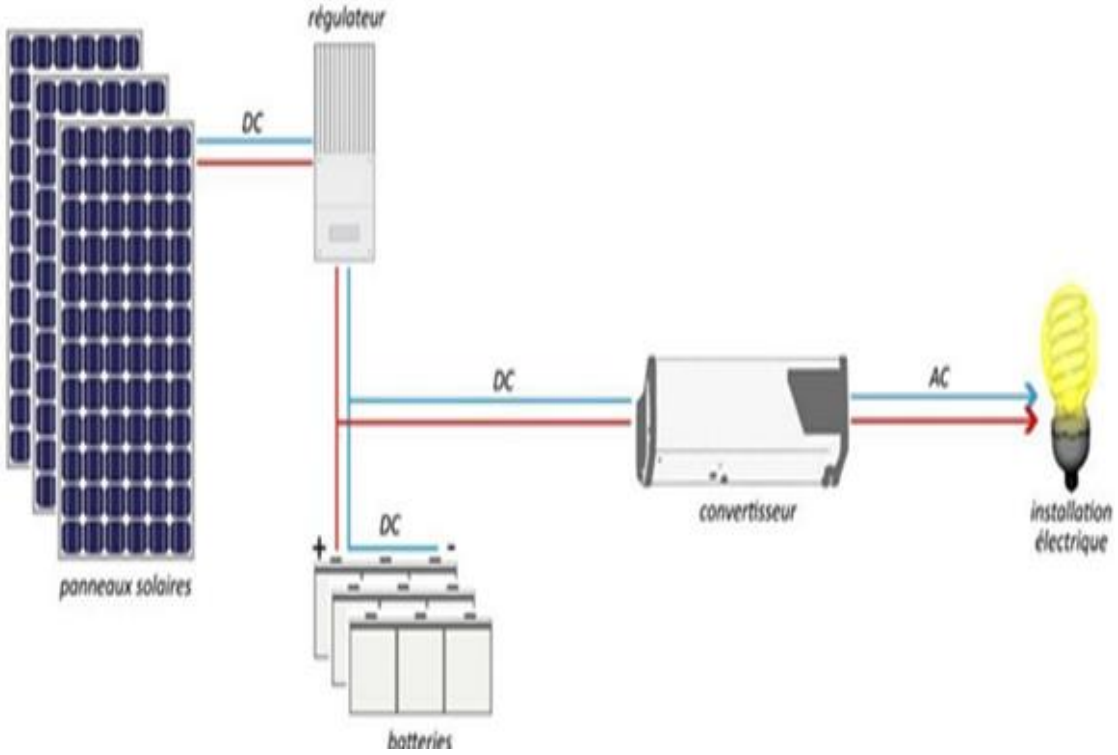


Figure I.15 : Configuration d'un système photovoltaïque autonome [16].

Les panneaux solaires génèrent de l'électricité en courant continu, qui doit être transformée en courant alternatif pour pouvoir alimenter la majorité des équipements. La batterie est alimentée par l'énergie solaire collectée durant la journée, et un dispositif de gestion de charge régule cette batterie afin d'éviter une surcharge. Par la suite, un onduleur convertit le courant continu emmagasiné en courant alternatif destiné aux appareils.

L'énergie produite par les panneaux solaires peut être utilisée de manière optimale grâce à une gestion efficace de la consommation. Les appareils alimentés par cette électricité peuvent fonctionner de manière stable même lorsque la production solaire varie au cours de la journée. Le stockage dans la batterie permet de conserver l'énergie excédentaire pour les périodes où l'ensoleillement est faible ou absent, assurant ainsi une disponibilité continue. Cette coordination entre production, stockage et utilisation assure un système autonome, fiable et économe en énergie, tout en maximisant l'efficacité globale de l'installation. De plus, une telle approche contribue à réduire la dépendance aux réseaux électriques traditionnels et favorise un fonctionnement plus respectueux de l'environnement.

I.3. Avantages et désavantages des systèmes photovoltaïques

Avantages	Désavantage
• **Adaptabilité** : Les panneaux peuvent être combinés pour répondre facilement à différents besoins en énergie. • **Scalabilité** : Les systèmes s'étendent de petites installations domestiques à de grands projets industriels. • **Entretien minimal** : Aucun carburant ni personnel spécialisé n'est requis, ce qui réduit les coûts de fonctionnement. • **Fiabilité élevée** : L'absence de pièces mécaniques mobiles assure une longue durée de vie et un fonctionnement stable. • **Respect de l'environnement** : L'énergie produite est propre, silencieuse et n'affecte pas significativement l'écosystème local.	• **Coût élevé de fabrication** : La conception et la réalisation des modules photovoltaïques exigent des technologies pointues et des investissements financiers importants. • **Rendement de conversion limité** : Les modules convertissent seulement une partie de l'énergie solaire en électricité, avec un plafond théorique d'environ 28 % pour le silicium cristallin. • **Pertes d'énergie avec l'onduleur** : Une fraction de l'électricité générée se perd lors de la transformation du courant continu en courant alternatif. • **Coûts supplémentaires pour le stockage** : L'installation de batteries pour conserver l'énergie augmente le coût global, bien que la performance du système reste optimale si les composants sont correctement choisis.

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de système photovoltaïque [16].

I.4. L'éclairage : principes et caractéristiques fondamentales

L'éclairage désigne toutes les techniques qui permettent à l'individu d'adapter les conditions de lumière dans son environnement selon ses besoins pour ses activités ou son plaisir.

I.4.1. Définitions du flux lumineux et de l'éclairement

I.4.1.1. Flux lumineux

Le flux lumineux (F) représente la quantité intégrale de lumière diffusée par une source dans toutes les orientations, On l'évalue en lumens [17].

Le flux lumineux, qui représente la puissance lumineuse émise par une source, constitue un paramètre essentiel pour comparer les différentes sources d'éclairage. En effet, il permet d'évaluer la quantité totale de lumière produite. Ainsi, en théorie, deux sources ayant le même flux lumineux sont censées fournir une quantité de lumière équivalente dans un même espace, bien que la répartition de cette lumière puisse varier selon les conditions d'utilisation [18].



Figure I.16 : Flux lumineux [19].

I.4.1.2. L'éclairement

L'éclairement lumineux correspond à la mesure de la lumière telle qu'elle est perçue par l'œil humain. Un objet non lumineux devient plus visible lorsque l'intensité de la lumière qui l'atteint augmente. Cette grandeur se calcule à partir de l'intensité des sources lumineuses, de leur distance et de leur orientation. Contrairement à l'éclairement énergétique, elle est pondérée selon la sensibilité de la vision humaine. La Commission internationale de l'éclairage a établi des tables d'efficacité lumineuse spectrale pour représenter cette sensibilité, auxquelles les instruments de mesure doivent se conformer [19].

L'éclairement mesure le flux lumineux reçu par une surface donnée. L'unité de mesure est le lux (lx), défini comme 1 lumen réparti sur 1 mètre carré. Dans un espace, l'éclairement diminue avec le temps en raison de l'encrassement et du vieillissement des luminaires, de l'usure des lampes et de l'altération des surfaces du local [19].

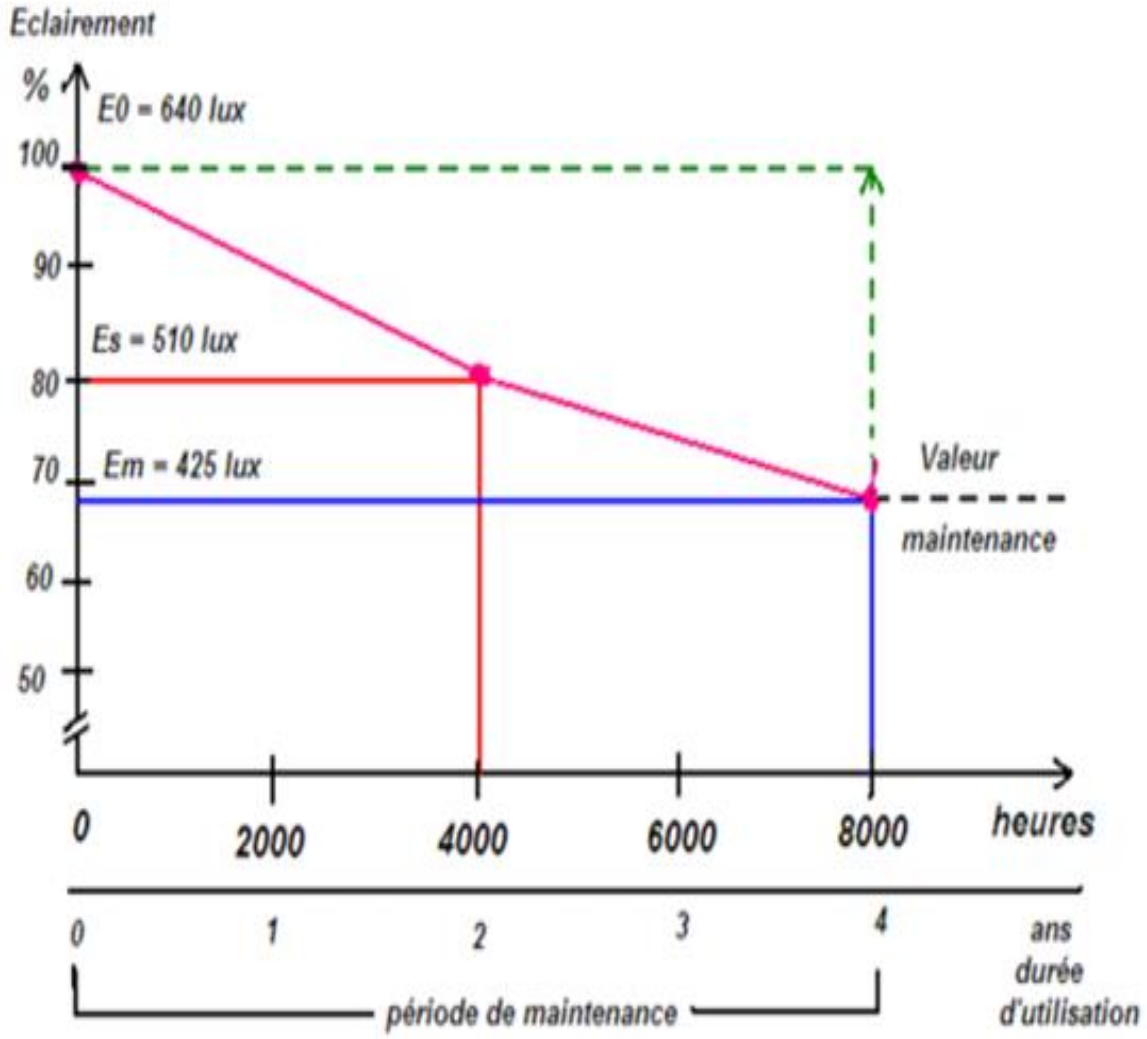


Figure I.17 : Le changement du niveau moyen de luminosité [19].

D'après la figure (I.17), On considère généralement trois sortes d'éclairement [19]:

- **Eclairement moyen initial (E_0) :** valeur déterminée lors de l'installation après stabilisation des lampes, utilisée comme critère de référence pour la conception.
- **Valeur d'éclairement moyen en service (E_s) :** valeur déterminée lors de l'utilisation habituelle, généralement au centre de la durée de maintenance.
- **Éclairement moyen maintenu (E_m)** : éclairement mesuré peu avant les travaux de maintenance, qui permet de rétablir l'éclairement d'origine post-entretien.

I.4.2. Différents types d'éclairage existant

On peut identifier différents types d'éclairage mentionné ci-après [19]:

I.4.2.1. Eclairage direct

Le rayonnement lumineux est directement dirigé vers la zone à illuminer, ce qui le rend particulièrement économique, bien qu'il puisse causer des risques d'éblouissement.

I.4.2.2. Eclairage indirect

Tout le flux lumineux est dirigé vers le haut, ce qui supprime l'éblouissement, mais diminue les ombres et les textures. Toutefois, son principal défaut est sa faible efficacité.

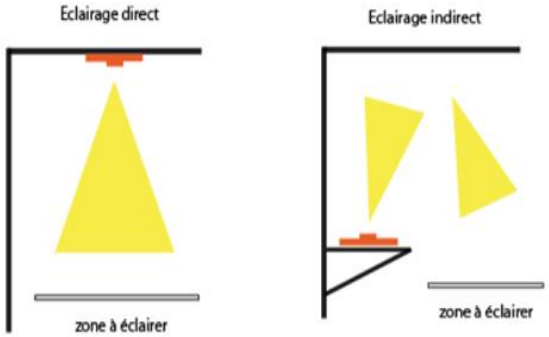


Figure I.18 : Eclairage direct et indirect [19].

L'éclairage peut ainsi être envisagé selon une approche combinant les avantages des deux méthodes. Tandis que le rayonnement dirigé maximise l'efficacité en concentrant la lumière sur la zone utile, l'éclairage orienté vers le haut réduit l'inconfort visuel et les éblouissements. En pratique, il est possible d'adopter un compromis, modulant la répartition du flux lumineux pour équilibrer rendement et confort visuel.

I.4.2.3. Eclairage mixte

C'est une solution intermédiaire entre l'éclairage direct et indirect, alliant à la fois les points forts et les points faibles de ces deux approches.

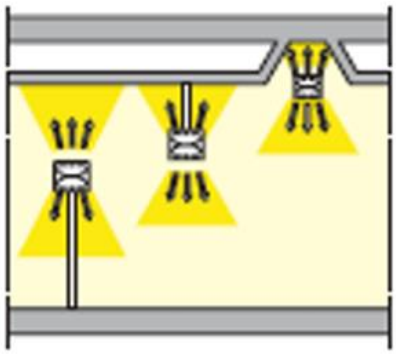


Figure I.19 : Eclairage mixte [19].

I.4.3. Luminaires

Les luminaires sont des systèmes d'éclairage comprenant à la fois la source de lumière et ses accessoires associés [20]. Ils ont trois rôles majeurs : diriger la lumière vers la zone à illuminer grâce à un système optique, défendre la lampe et ses éléments contre des agressions externes telles que les impacts, l'eau ou la poussière, et accomplir une mission esthétique, surtout dans les lieux résidentiels, par leur design, leurs couleurs et les matériaux employés.



Figure I.20 : Luminaire.

En plus de ces fonctions, les luminaires présentent un intérêt particulier dans le domaine agricole, où ils contribuent à améliorer les conditions d'éclairage dans les serres, les bâtiments d'élevage et les zones de production. Un éclairage adapté permet d'optimiser la croissance des plantes, d'assurer le bien-être des animaux et de faciliter les activités agricoles, tout en garantissant une bonne résistance aux conditions environnementales souvent exigeantes.

I.4.4. Technologies des sources lumineuses et adoption des LED

On peut recourir à quelque divers types d'éclairage qui sont plus utilisable dans le secteur agricole :

I.4.4.1. Lampes à incandescence

Ces lampes fonctionnent grâce à l'échauffement d'un filament en tungstène parcouru par un courant électrique, ce qui provoque l'émission de lumière. Le filament est enfermé dans une ampoule contenant un gaz inerte ou du vide afin de limiter son oxydation. Avec le temps, une partie du matériau du filament s'évapore et se dépose sur les parois internes de l'ampoule, ce qui diminue l'efficacité lumineuse. Parallèlement, le filament devient de plus en plus fin jusqu'à se casser, entraînant la fin de vie de la lampe [19].

On peut trouver :

- **Lampes à incandescence standard :**

La lampe à incandescence est constituée d'un filament de tungstène enfermé dans une ampoule en verre contenant du vide ou un gaz neutre. Lorsqu'un courant électrique le traverse, le filament s'échauffe et émet une lumière à dominante rouge, avec une température de couleur d'environ 2700 K. Ces lampes sont largement utilisées, notamment dans le domaine résidentiel, et existent en différentes puissances, formes et types de culots [19].

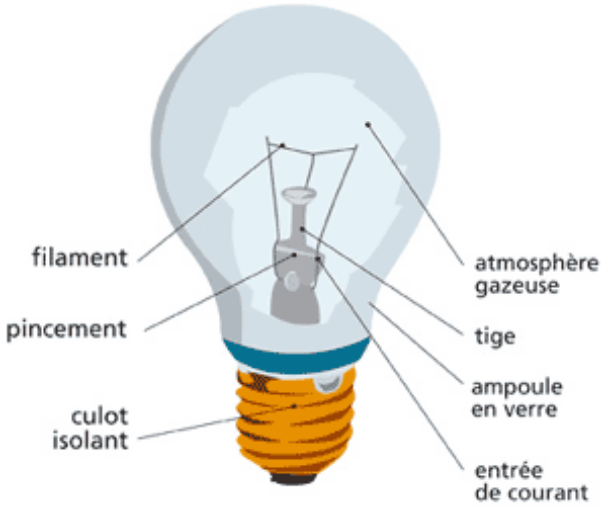


Figure I.21 : Lampe Lampes à incandescence standard.

Malgré les améliorations apportées au fil du temps, leur rendement lumineux reste limité, car l'augmentation de la température du filament réduit sa durée de vie. L'introduction du cycle halogène a permis d'améliorer à la fois les performances lumineuses et la durée de vie.

Ce type de lampe admet des inconvénients tel que [19]:

- ✓ Coût d'achat faible.
- ✓ Faible rendement : environ 92 à 95 % de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur, et seulement 5 à 8 % est convertie en lumière, et Forte émission de chaleur.
- ✓ Diminution de l'intensité lumineuse au fil du temps.
- ✓ Durée de vie limitée, ne dépassant généralement pas 1000 heures.

- **Lampes tungstène-halogènes**

Les lampes halogènes à tungstène sont des lampes à incandescence qui permettent au filament de fonctionner à des températures élevées en raison de l'introduction de composés halogènes, lesquels régénèrent le filament en permanence. Ces lampes, initialement proposées en deux formats distincts — les lampes « crayons » de haute puissance et basse tension pour l'éclairage

modulable, ainsi que les lampes de très basse tension pour l'éclairage d'accentuation — exigeaient des dispositifs d'éclairage spécifiques. Actuellement, plusieurs lampes halogènes à double enveloppe dotées de culots standards peuvent substituer les ampoules traditionnelles à incandescence. Des études sont aussi en cours pour créer des lampes halogènes présentant une amélioration de l'efficacité d'environ 30% et une longévité de 3000 heures [19].



Figure I.22 : Lampes tungstène-halogène.

Ces caractéristiques montrent que les lampes halogènes représentent une évolution des lampes à incandescence, en améliorant leurs performances tout en conservant le même principe de fonctionnement. Elles constituent ainsi une solution intermédiaire avant l'adoption de technologies d'éclairage plus avancées.

Ce type de lampe admet quelques avantages et inconvénients indiqué dans le tableau suivant :

Avantages	Inconvénients
✓ L'éclairage est environ deux fois plus performantes comparées aux lampes à incandescence traditionnelles. ✓ La longévité est multipliée par deux, atteignant environ 2000 heures. ✓ Avec des dimensions réduites, permettant l'emploi de dispositifs d'éclairage plus petits.	✓ Les rayons ultraviolets passent à travers le quartz de l'ampoule et peuvent être nuisibles en cas d'exposition prolongée ; une paroi en verre les arrête efficacement. ✓ Il est préférable de ne pas toucher le quartz directement, car il est fragile. ✓ Coût supérieur aux lampes incandescentes traditionnelles.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de lampe tungstène-halogène [19].

I.4.4.2. Lampes fluorescentes

On peut distinguer quelques types [19]:

- **Tubes fluorescentes**

Les lampes fluorescentes génèrent de la lumière par le biais d'une décharge électrique dans du mercure. Ce dernier émet des rayons ultraviolets qui sont convertis en lumière visible grâce à un revêtement phosphorescent situé à l'intérieur du tube. Pour un fonctionnement adéquat, elles ont besoin d'un démarreur et d'un ballast. Ces lampes présentent une grande efficacité lumineuse et une longévité étendue. Le type de phosphore employé influence la couleur et la qualité de la lumière, ce qui permet d'identifier des tubes qui offrent une excellente reproduction des couleurs ou un rendement lumineux prioritaire.



Figure I.23 : Tube fluorescente.

Ce genre de luminaire présente certains avantages et inconvénients, comme l'indique le tableau ci-dessous :

Avantages	Inconvénients
✓ Prix relativement bas à l'achat. ✓ **Bon rendement énergétique :** environ 30 % de l'électricité est transformée en lumière. ✓ **Durée de vie :** élevée 6 à 8 fois plus longue qu'une lampe classique, soit 6000 à 8000 heures.	✓ Taille encombrante. ✓ Lumière de teinte plutôt froide.

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients de tube fluorescent.

- **Lampes fluorescentes compactes**

La lampe fluorescente compacte (LFC) opère selon le même mécanisme que les tubes fluorescents, fournissant une efficacité lumineuse de 40 à 60 lm/W et approximativement 8 000 heures de longévité. Deux catégories sont identifiées : les lampes de substitution, qui prennent le relais des ampoules à incandescence et disposent d'un culot standard comportant un système d'allumage intégré, et les lampes d'intégration, principalement utilisées dans le secteur tertiaire, où le ballast est intégré au dispositif d'éclairage.



Figure I.24 : Lampes fluorescentes compacts.

Depuis leur apparition dans les années 1980, les LFC ont bénéficié d'améliorations : elles sont devenues moins volumineuses, plus légères, s'allument plus vite et éliminent les scintillements grâce aux ballasts électroniques.

Cette lampe présente également plusieurs avantages et inconvénients, tels que :

Avantages	Inconvénients
✓ Coût initial important, mais compensé par des économies sur le long terme. ✓ Longue durée de vie, entre 6000 et 8000 heures. ✓ Conformité aux supports de fixation standard.	✓ Taille encombrante. ✓ Lumière de teinte plutôt froide.

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de lampes fluorescentes compacts.

I.4.4.3. Lampes à LED

Les lampes à LED, utilisées notamment pour les lampes témoins, lampes de poche ou pour des applications décoratives, offrent un éclairage ponctuel efficace. Elles reposent sur un dispositif semi-conducteur qui, traversé par un faible courant et une basse tension (à partir de 3,5 V), émet une lumière intense. Le diode émettrice est intégrée dans une lentille qui diffuse la lumière sur un angle d'environ 120 degrés [19].



Figure I.25 : Lampe à LED.

Cette lampe comporte également divers points forts et limites, notamment :

Avantages	Inconvénients
✓ Consommation électrique très faible. Durée de vie exceptionnelle, environ 50 000 heures. ✓ Format compact, offrant de nombreuses possibilités de design.	✓ Encore coûteuses à l'achat ✓ Pour un groupe de LED donnant la même lumière 10 fois plus chères qu'une lampe économique.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de lampes à LED [19].

I.4.4.4. Autres types de lampes

- **Lampes à décharge :** Ces lampes se divisent en deux familles, basse pression (lampes fluorescentes) et haute pression (HID). Les lampes à haute pression émettent principalement dans le visible sans besoin de poudres luminescentes et offrent une efficacité lumineuse élevée (80–100 lm/W). Elles sont surtout utilisées pour de fortes puissances, avec des contraintes spécifiques d'alimentation et de sécurité, mais de nouvelles versions à plus faible puissance apparaissent pour des applications résidentielles et tertiaires [19].
- **Lampes à vapeur de mercure :** Fonctionnent comme les tubes fluorescents mais avec une pression de mercure élevée. Leur efficacité est limitée (40–60 lm/W) et elles sont principalement destinées à l'éclairage public extérieur. Leur usage décline face aux autres lampes à décharge [19].

- **Lampes aux halogénures métalliques :** Similaires aux lampes à mercure, elles intègrent des iodures métalliques qui régénèrent le cycle lumineux. Leur efficacité atteint 80–100 lm/W pour des puissances de 35 à 1000 W. Les versions de faible puissance conviennent à l'éclairage d'accentuation et pourraient se développer dans le tertiaire et le résidentiel [19].
- **Lampes au sodium haute pression :** Très efficaces, jusqu'à 200 lm/W pour le sodium basse pression. À haute pression, elles offrent un meilleur rendu des couleurs mais une efficacité réduite (100–120 lm/W pour IRC ~20). Les lampes blanches récentes ont un IRC >70 mais une efficacité <60 lm/W. Disponibles en faibles puissances, elles restent pour l'instant réservées à un usage professionnel [19].

I.4.5. Choix de la technologie LED pour l'éclairage

Les lampes à LED ont été choisies comme technologie d'éclairage privilégiée en raison de leur excellent compromis entre performance, fiabilité et facilité d'usage. Comparées aux autres sources lumineuses, leurs inconvénients sont minimes, ce qui les rend adaptées à de nombreux contextes. Sur le plan économique, elles sont particulièrement avantageuses à long terme grâce à leur faible consommation d'énergie et leur longue durée de vie, réduisant ainsi les coûts d'exploitation et de maintenance. Leur lumière est également plus homogène et de meilleure qualité, améliorant le confort visuel. De plus, elles présentent un impact environnemental réduit, contribuant à des solutions d'éclairage plus durables et respectueuses de l'environnement.

I.5. Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis d'établir les concepts fondamentaux régissant l'énergie solaire photovoltaïque et les techniques d'éclairage artificiel. L'étude de l'effet photovoltaïque et de la structure des semi-conducteurs a mis en évidence le potentiel remarquable de la technologie à pérovskite, qui se distingue par son efficacité de conversion et son adaptabilité. Parallèlement, l'analyse comparative des différentes sources lumineuses a démontré la supériorité indiscutable de la technologie LED pour les systèmes hors réseau. Sa très faible consommation électrique, associée à une grande robustesse et une longue durée de vie, en fait le choix idéal pour minimiser la demande énergétique de la ferme étudiée. Après la phase théorique, le chapitre suivant est consacré à l'étude et au dimensionnement du système d'éclairage solaire, en s'appuyant sur l'évaluation du potentiel solaire de Tlemcen et l'analyse du profil de charge.

Chapitre II

Etude et dimensionnement du système d'éclairage solaire

II. Introduction

Après avoir présenté dans le chapitre précédent les principes fondamentaux de l'énergie photovoltaïque, des systèmes autonomes et de l'éclairage LED, ce chapitre est consacré à l'étude du site agricole et au dimensionnement du système d'éclairage solaire. L'analyse commence par l'étude des conditions climatiques de la ferme de Chiali, notamment l'irradiation solaire et la température, afin d'évaluer le potentiel énergétique du site. Ensuite, les besoins d'éclairage des différentes zones de l'exploitation sont déterminés à partir de leurs caractéristiques et de leurs niveaux d'éclairement requis. Le profil de consommation est alors établi selon plusieurs scénarios saisonniers, avec retenue du scénario hiver maximal comme condition la plus contraignante. Enfin, le dimensionnement du système photovoltaïque, du stockage, du régulateur, des câbles et des équipements d'éclairage est réalisé, suivi d'une étude économique permettant d'évaluer l'intérêt de la technologie tandem par rapport au silicium classique.

II.1. Analyse du site agricole

II.1.1. Localisation de la ferme agricole

Cette étude a choisi la ferme de Chiali comme emplacement pour sa mise en œuvre. Elle est constituée de plusieurs terrains qui appartiennent à divers propriétaires. Une parcelle de 219 111 m² a été choisie parmi toutes celles proposées, en raison de sa facilité d'accès et de ses opportunités d'exploitation. Cette parcelle, localisée à une latitude de 34,87886° (ou 34° 52′ 44″ N) et à une longitude de -1,5276° (ou 1° 31′ 39″ O), offre des conditions propices pour l'implémentation d'un système photovoltaïque visant à satisfaire les besoins énergétiques de l'exploitation agricole.



Figure II.1 : Représentation satellitaire de ferme de chiali.

II.1.2. Étude du climat de l'exploitation agricole

II.1.2.1. Évolution mensuelle de l'irradiation solaire globale du site

Les informations obtenues via PVGIS ont été utilisées pour analyser l'irradiation solaire mensuelle du site. Cela permet d'avoir une idée claire du potentiel solaire et de vérifier la faisabilité d'une installation photovoltaïque adaptée à la ferme.

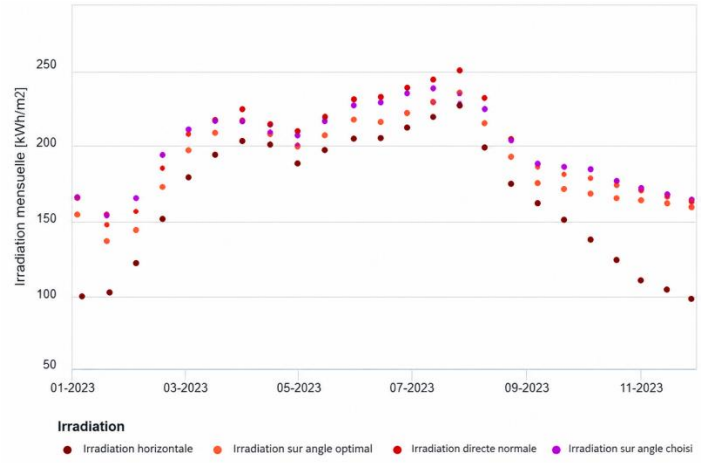


Figure II.2 : Irradiation mensuelle de la ferme de l'année 2023.

Plusieurs types d'irradiation solaire peuvent être pris en considération lors de l'étude et du dimensionnement d'un système photovoltaïque, chacun apportant une vision complémentaire du potentiel énergétique disponible. Parmi ces types, on distingue notamment l'irradiation globale sur un plan horizontal, qui correspond à l'énergie totale reçue par une surface plane exposée horizontalement, incluant le rayonnement direct et diffus. On considère également l'irradiation directe normale, qui représente la composante du rayonnement solaire reçue perpendiculairement aux rayons du soleil, ainsi que l'irradiation sur un plan incliné optimal, qui dépend à la fois de l'orientation et de l'angle d'inclinaison de la surface réceptrice. Enfin, l'irradiation associée à un angle spécifique permet d'évaluer de manière plus réaliste les performances d'un système dans des conditions proches de son installation réelle.

Dans le cadre de cette étude, le choix s'est porté sur une inclinaison de 35°, considérée comme particulièrement adaptée pour améliorer la captation du rayonnement solaire sur l'ensemble de l'année. En effet, cet angle représente un compromis judicieux entre les différentes positions du soleil au cours des saisons, permettant d'obtenir une production énergétique équilibrée entre les périodes estivales et hivernales. Cette inclinaison favorise une meilleure réception du rayonnement lorsque le soleil est bas en hiver, tout en conservant des performances satisfaisantes durant l'été.

Ce choix d'inclinaison contribue ainsi à obtenir des résultats plus représentatifs des conditions réelles du site étudié, ce qui est essentiel pour garantir la fiabilité de l'analyse et la pertinence du dimensionnement du système photovoltaïque. Par ailleurs, les données d'irradiation correspondant à cette configuration sont présentées dans le tableau ci-après, permettant une analyse détaillée de la variation mensuelle du potentiel solaire. Cette approche facilite la compréhension des fluctuations saisonnières et permet d'affiner les calculs énergétiques en vue d'optimiser les performances globales de l'installation.

Mois	**Irradiation (W/m^2)**
Janvier	163.5
Février	139.94
Mars	210.75
Avril	220.27
Mai	196
Juin	204.29
Juillet	219.97
Août	234.75
Septembre	186
Octobre	182.3
Novembre	170.04
Décembre	161.45

Tableau II.1 : Evolution mensuelle du rayonnement solaire global du site agricole

Les résultats montrent que l'irradiation solaire varie selon les saisons lorsque l'on considère l'angle optimal. Les mois d'été, comme juillet et août, enregistrent les niveaux les plus élevés grâce à un ensoleillement important et prolongé. À l'inverse, les mois d'hiver présentent des valeurs plus faibles, notamment en décembre et janvier, à cause de la réduction de la durée du jour. Entre ces deux extrêmes, le printemps et l'automne offrent des niveaux intermédiaires, permettant de maintenir une production solaire relativement régulière.

II.1.2.2. Évolution quotidienne de l'irradiation solaire globale du site

On constate que la variation journalière de l'irradiation suit le même schéma sur toute l'année, même si son intensité change d'une saison à l'autre. Le mois d'août enregistre les valeurs les plus élevées.

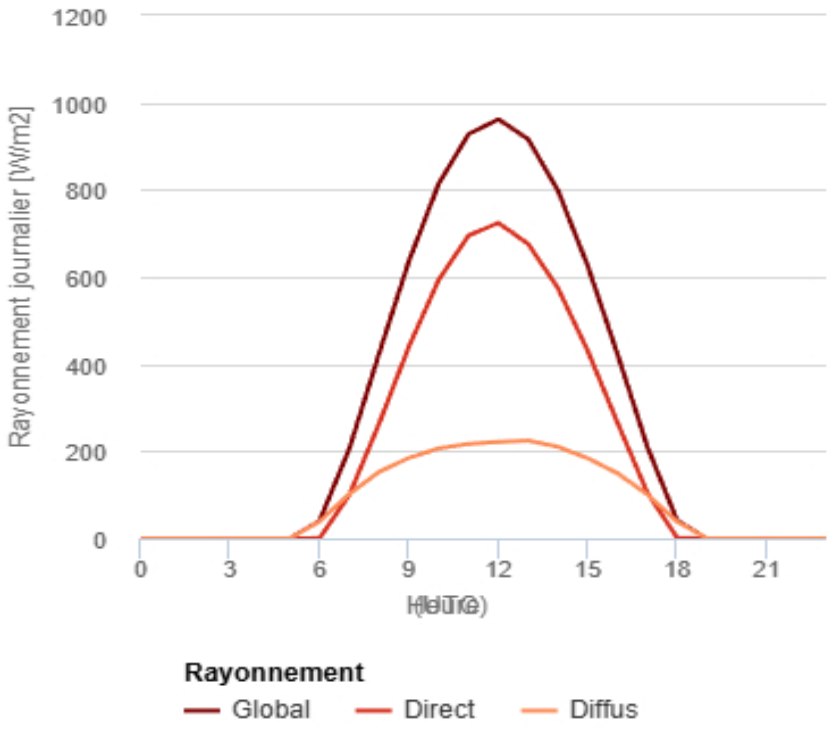


Figure II.3 : Irradiation journalier de la ferme.

Le tableau suivant présente les valeurs détaillées de l'irradiation journalière correspondant à l'angle d'inclinaison optimal retenu. Ces données permettent d'effectuer une analyse précise et approfondie du potentiel solaire de la ferme tout au long de la journée, en tenant compte des variations de l'intensité du rayonnement solaire selon les différentes heures, ainsi que de leur évolution progressive entre le lever et le coucher du soleil. Cette représentation facilite une meilleure lecture des données et une interprétation plus claire du comportement du rayonnement solaire au cours de la journée.

Heure	Irradiation (W/m^2)
00:45	0
01:45	0
02:45	0
03:45	0
04:45	0
05:45	0
06:45	40
07:45	206
08:45	425
09:45	637
10:45	814
11:45	928
12:45	962
13:45	916
14:45	798
15:45	625
16:45	422
17:45	210
18:45	40
19:45	0
20:45	0
21:45	0
22:45	0
23 :45	0

Tableau II.2 : Différentes valeurs journaliers d'irradiation globale de la ferme.

Les données montrent que l'irradiation solaire varie naturellement au cours de la journée. Elle est inexistante la nuit, augmente progressivement le matin, atteint son maximum vers le milieu de la journée, puis diminue jusqu'à disparaître le soir. Ce cycle est lié directement au mouvement du soleil. Les résultats indiquent que la ferme dispose d'un bon potentiel solaire, surtout en été, ce qui rend l'installation d'un système photovoltaïque bien orienté particulièrement intéressante.

II.1.2.3. Données mensuelles de température du site étudié

L'analyse des données mensuelles de température a été réalisée afin de compléter l'étude du potentiel énergétique du site. Ces informations permettent d'apprécier l'influence des conditions thermiques sur les performances des panneaux photovoltaïques ainsi que sur le fonctionnement global du système.

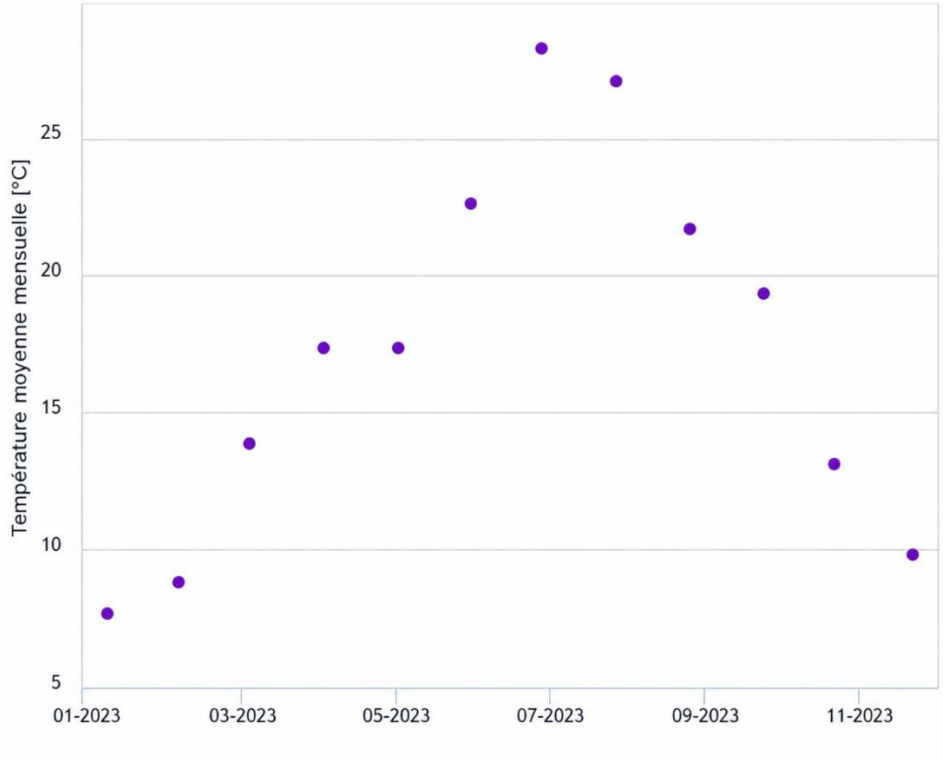


Figure II.4 : Température mensuelle de la ferme

L'analyse des températures mensuelles met en évidence un cycle saisonnier cohérent avec le climat local. Les valeurs maximales sont enregistrées en été, en particulier en juillet et août, tandis que les minimales apparaissent en hiver, notamment en janvier et décembre. Les saisons de transition présentent des niveaux modérés favorables à la stabilité du système photovoltaïque. Dans l'ensemble, le site présent des conditions thermiques adaptées à une exploitation solaire durable, sans dépassement critique pour les équipements.

II.2. Analyse des besoins lumineux de l'exploitation

II.2.1. Définition des zones de travail et objectifs d'éclairement

Afin de réaliser un dimensionnement précis et fiable du générateur photovoltaïque, une configuration de référence a été établie pour la ferme agricole étudiée. Cette étape permet de définir des conditions de base représentatives de l'environnement réel d'exploitation. Dans ce cadre, nous avons également pris en compte les différentes zones de travail existantes au sein de la ferme, afin d'adapter au mieux l'étude aux besoins fonctionnels du site.

Les niveaux d'éclairement lumineux exprimés en lux ont été choisis en se basant sur des valeurs de référence issues de normes et standards internationaux appliqués aux zones rurales et agricoles tel que : EN 12464-1 [21]. Ce choix vise à assurer un compromis entre la qualité de l'éclairage nécessaire aux activités agricoles et la réduction de la consommation énergétique globale. Ainsi, cette démarche permet de garantir des conditions lumineuses adaptées aux différentes zones de travail tout en optimisant la conception du système photovoltaïque, en améliorant son efficacité et en limitant les pertes énergétiques.

Nous présentons dans le tableau suivant la répartition des différentes zones de travail de la ferme, en précisant leur type d'activité, leur surface ainsi que le niveau d'éclairement visé pour chacune d'elles :

Zone de travail	**Type d'activité**	**Surface définie (m2)**	**Éclairement visé (Lux)**
Zone 1 : Hangar	Stockage et circulation	240	100
Zone 2 : Étable	Élevage et soins	150	200
Zone 3 : Serre	Travail de précision	96	300

Tableau II.3 : Zones de travail de la ferme.

Les paramètres de chaque zone peuvent être représentés sous forme de diagrammes rectangulaires afin de faciliter leur visualisation et d'améliorer l'interprétation des résultats obtenus. Cette représentation graphique permet de comparer plus clairement les différentes valeurs et de mieux observer les écarts entre les zones étudiées.

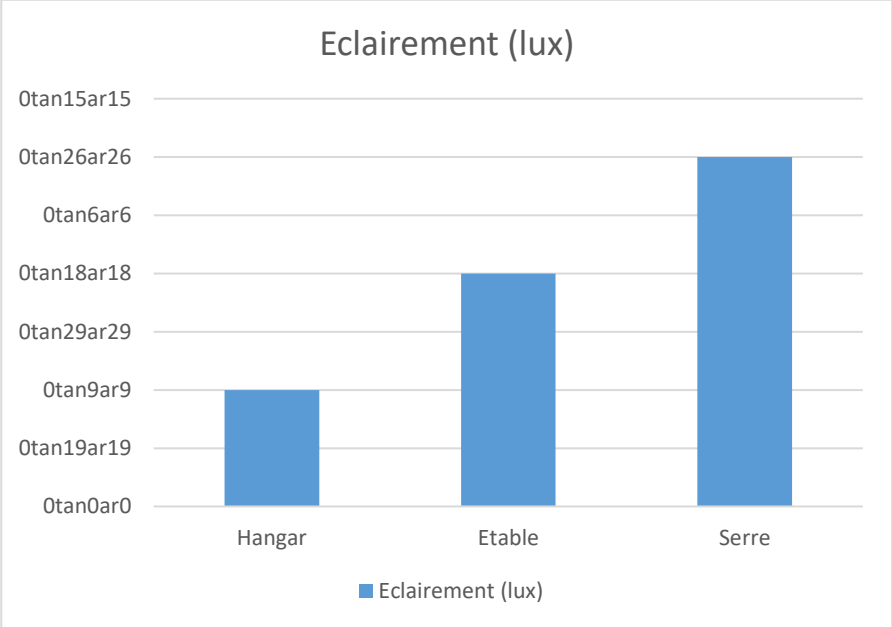


Figure II.5 : Diagramme de l'éclairement pour chaque zone de la ferme.

II.2.1.1. Le Hangar de stockage (Matériel et récolte)

Le hangar de stockage constitue un pivot logistique essentiel de l'exploitation, dont la fonction principale est d'assurer la protection et la conservation du matériel motorisé, des intrants agricoles et des produits issus des récoltes. Sa configuration architecturale impose une diffusion lumineuse parfaitement homogène pour faciliter les manœuvres délicates de manutention et permettre une gestion des stocks efficace durant les périodes de forte activité. Dans cette optique, l'environnement lumineux a été conçu pour offrir une acuité visuelle optimale, garantissant ainsi la sécurité des opérateurs et la précision des tâches effectuées lors des interventions nocturnes ou par faible luminosité.

Pour cette zone couvrant une surface de **240 m²**, le choix technique s'est porté sur un niveau d'éclairement cible de **100 lux**. Cette valeur permet de répondre aux exigences de visibilité nécessaires pour l'identification du matériel et la circulation fluide dans les allées, tout en maintenant une consommation électrique modérée. Ce réglage est stratégique pour l'équilibre du système photovoltaïque, car il permet de concilier une luminosité confortable avec une gestion sobre de l'énergie stockée dans les batteries, assurant ainsi une plus grande stabilité de l'alimentation autonome sur le long terme.

II.2.1.2. L'étable (Zone d'élevage)

L'étable constitue l'espace de vie du cheptel et représente une zone critique où la gestion de la lumière influence directement la santé animale ainsi que l'efficacité des interventions humaines. Contrairement aux zones de stockage, cet environnement nécessite une luminosité plus soutenue pour permettre une surveillance constante, faciliter les opérations de traite, l'alimentation et les soins vétérinaires. Une distribution lumineuse de qualité y est indispensable pour identifier rapidement tout signe de détresse ou de maladie chez les animaux, tout en offrant un cadre de travail sécurisé aux exploitants lors des rondes nocturnes.

Pour cet espace d'une surface de **150 m²**, le choix technique s'est porté sur un niveau d'éclairement cible de **200 lux**. Cette intensité lumineuse a été déterminée pour garantir une visibilité optimale sur le bétail et les zones de circulation, permettant une exécution précise des tâches techniques sans fatigue visuelle. Ce niveau de luminosité, plus élevé que celui du hangar, reflète la priorité accordée à la sécurité et à l'hygiène au sein de la zone d'élevage, tout en restant dans une plage de consommation électrique qui préserve l'équilibre énergétique du système photovoltaïque global.

II.2.1.3. La serre agricole (zone de culture et de précision)

La serre occupe une place particulière au sein de l'exploitation agricole, car elle constitue un espace de production sensible où les cultures exigent une attention constante.

Les activités qui y sont réalisées nécessitent des conditions de visibilité adaptées, notamment pour assurer la précision des interventions agricoles telles que la manipulation des plants, les opérations de greffage ou encore le contrôle de l'état sanitaire des végétaux.

Dans cette zone, l'éclairage joue un rôle fonctionnel essentiel et doit être conçu de manière à répondre aux exigences du travail de précision. Pour une surface de **96 m²**, un niveau d'éclairement de **300 lux** a été retenu afin de garantir une bonne lisibilité des tâches tout en maintenant des conditions de confort visuel satisfaisantes.

Ce choix permet également de respecter les contraintes énergétiques liées à l'alimentation par système photovoltaïque.

II.2.2. Méthodologie de dimensionnement de l'éclairage intérieur

Le calcul de l'éclairement intérieur repose sur la méthode du flux total, qui permet de déterminer la quantité de lumière nécessaire pour assurer une visibilité optimale selon l'activité exercée. Pour ce projet, nous privilégions un système d'éclairage direct avec LED.

II.2.2.1. Calcul de l'indice du local K et du facteur de suspension J

Selon la norme NF EN 12464-1, trois zones d'étude ont été définies et sont présentées dans la figure suivante, avec leurs dimensions, notamment les hauteurs et les largeurs, utilisées dans les différents calculs. Cette répartition permet de structurer l'analyse de manière claire et adaptée aux caractéristiques de chaque zone.

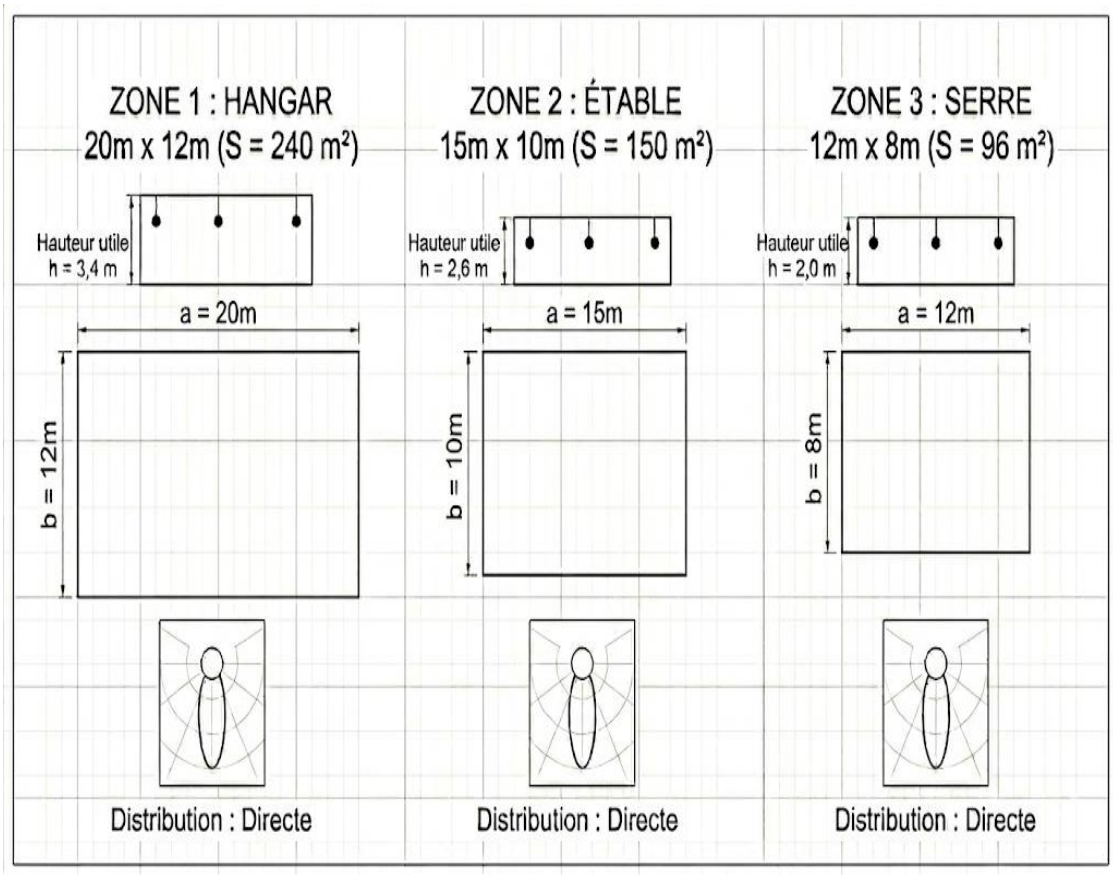


Figure II.6 : Différents zone de la ferme agricole.

- **l'indice du local K :**

Il est calculé par la relation suivante [19]:

$$k = \frac{a.b}{(a+b).h} \qquad \text{(II .1)}$$

Avec :

a: Longueur du local en (m).

b: Largeur du local (m).

h : Hauteur utile entre le luminaire et le plan de travail (m).

Il est nécessaire d'arrondir l'indice du local K aux valeurs normalisées suivantes : 0,6 ; 0,8 ; 1 ; 1,25 ; 1,5 ; 2 ; 2,5 ; 3 ; 4 ; 5.

- **L'indice de suspension J :**

Il est déterminant pour le calcul de l'utilance, car il influence la réflexion du flux sur le plafond. Il est défini par [19] :

$$J = \frac{h_1}{h_1 + h} \quad \text{(II.2)}$$

Où :

h_1 : Hauteur de suspension (distance entre le plafond et le luminaire) (m).

h: Hauteur utile (m).

l'indice de suspension est généralement compris entre 0 et 1/3 [19], on prend la valeur de 1/3 qui nous aide de choisir la valeur d'utiliance basé sur cette valeur.

II.2.2.2. Facteur de réflexion FR

Les facteurs de réflexion du plafond, des murs et du plan utile sont exprimés en pourcentage. Pour simplifier les tableaux, on utilise seulement le chiffre des dizaines de ces valeurs [19]. Le tableau suivant donne le coefficient correspondant :

	Très clair	**Clair**	**Moyen**	**Sombre**	**Nul**
Plafond	8	7	5	3	0
Murs	7	5	3	1	0
Plan utile	3	3	1	1	0

Tableau II.4 : Chiffres de facteur de réflexion [19].

Par exemple, lorsque le plafond, les murs et le plan utile présentent des caractéristiques sombres, la combinaison est notée FR=311. Chaque chiffre correspond respectivement au plafond, aux murs et au plan utile, et représente le chiffre des dizaines de leur facteur de réflexion.

II.2.2.3. Facteur de dépréciation d

L'intensité lumineuse des lampes se réduit au fil du temps pour diverses raisons : accumulation de poussière sur les luminaires, diminution de la réflectance des surfaces proches, et usure naturelle des sources de lumière. Dans cette fluctuation, la stratégie de maintenance mise en œuvre, y compris le remplacement périodique des lampes, contribue aussi [19].

Le tableau suivant montre les différentes valeurs de facteur de dépréciation d :

Niveau D'empoussièrage	Facteur D'empoussièrage	Facteur lampe	Facteur maintenance	Compensateur de dépréciation
Faible	0,9	0,9	0,8	1,25
Moyen	0,8	0,9	0,7	1,4
Elevé	0,7	0,9	0,7	1,6

Tableau II.5 : Différents valeurs des certains facteurs [19].

II.2.2.4. Facteur d'utilance u

Selon les normes NF C 71-120 et 71-121, le tableau ci-dessous est basé sur un facteur J de 1/3. Il utilise aussi les facteurs FR et K pour trouver le facteur d'utilance U.

FR	311	331	511	531	551	711	731	751	753	771	773	871	873
k	**u**												
0.60	45	49	45	49	54	55	49	54	56	63	67	63	68
0.80	55	58	53	58	63	55	59	64	67	72	78	73	79
1.00	61	65	61	65	70	62	65	71	74	78	85	79	86
1.25	68	71	68	72	76	68	72	77	82	84	92	85	93
1.50	72	75	72	76	80	72	76	81	86	87	96	88	98
2.00	78	81	78	81	85	79	82	86	94	92	102	93	105
2.50	82	84	83	85	88	83	86	90	98	95	106	96	108
3.00	85	87	85	88	91	86	89	92	102	97	109	98	112
4.00	88	90	89	91	94	90	93	96	107	99	113	100	116
5.00	91	92	92	94	96	93	95	98	110	100	115	102	119

Tableau II.6 : Valeurs de facteur d'utilance u [19].

II.2.2.5. Flux total à fournir F et la puissance totale

La relation de flux total F est : [19].

$$F = \frac{E.S.d}{\eta.u} \qquad \text{(II.3)}$$

Avec :

E : l'éclairement en (lux).

S : la surface en (m^2).

d : coefficient dépréciation.

η : Le rendement du luminaire. u : facteur d'utilance..

Le nombre total de luminaires peut être calculé en appliquant la relation suivante :

$$N = \frac{F}{F_u} \quad \text{(II.4)}$$

Où F_u représente le flux lumineux unitaire d'un luminaire LED.

La puissance totale P s'exprimer comme le produit du nombre de lumineux N et de la puissance unitaire P_u d'un luminaire LED tel que :

$$P = N \times P_u \quad \text{(II.5)}$$

II.2.2.6. Placement des LEDs

La qualité de l'éclairage dans un espace ne dépend pas uniquement de la puissance des lampes installées, mais surtout de la manière dont la lumière est répartie dans le local. Les surfaces environnantes, comme les murs et le plafond, jouent un rôle important en réfléchissant la lumière et en contribuant à sa diffusion. Par ailleurs, le choix du type de luminaire influence directement cette répartition. Ainsi, pour garantir un éclairage homogène, il est nécessaire d'adapter l'espacement entre les luminaires en fonction de leur hauteur d'installation par rapport au plan de travail, selon les caractéristiques photométriques propres à chaque équipement [19].

Classe des luminaires	Distance maximale entre deux luminaires
A	DM ≤ 1,0.h
B	DM ≤ 1,1.h
C	DM ≤ 1,3.h
D	DM ≤ 1,6.h
E	DM ≤ 1,9.h
F	DM ≤ 2.h
G	DM ≤ 2,0.h
H	DM ≤ 1,9.h
I	DM ≤ 2,0.h
J	DM ≤ 2,3.h

Tableau II.7 : Les distances maximales entre le luminaire [19].

II.2.3. Application pratique à la ferme étudiée

Pour garantir une compatibilité avec un système photovoltaïque, nous avons sélectionné des luminaires offrant le meilleur rapport Puissance / Consommation.

II.2.3.1. Sélection des sources lumineuses et luminaires :

Afin d'assurer la fiabilité, la performance ainsi que la disponibilité du système d'éclairage, le choix s'est porté sur la marque Philips, largement reconnue pour la qualité et l'efficacité de ses solutions d'éclairage. Dans ce contexte, trois modèles de luminaires ont été retenus, lesquels sont présentés de manière détaillée dans le tableau (II.8).

Ce choix permet ainsi de répondre aux exigences techniques et d'assurer un fonctionnement optimal de l'installation.

Caractéristique	**Hangar**	**Étable**	**Serre**
Type de luminaire	Tube LED DC T8	Projecteur LED DC High Bay	Projecteur LED DC High Bay
Référence proposée	Tube LED T8 DC 48V	High Bay LED DC 48V	High Bay LED DC 48V
Tension d'alimentation	48V DC	48V DC	48V DC
Flux lumineux unitaire (lm)	3 200 – 3 600	9 000 – 11 000	14 000 – 16 000
Puissance unitaire (W)	24 W	100 W	150 W
Efficacité lumineuse (lm/W)	≈ 135	≈ 100	≈ 100
Température de couleur (K)	4 000 (blanc neutre)	6 500 (blanc froid)	4 000 (blanc neutre)

Tableau II.8 : Caractéristiques techniques des luminaires sélectionnés pour les différentes zones de la ferme.

Le choix des luminaires a été adapté aux spécificités de chaque zone de la ferme afin d'assurer un éclairage efficace et économique. Pour le hangar, des tubes LED T8 de 25,9 W délivrant 3 500 lm ont été retenus, avec un rendement de 135 lm/W et une durée de vie de 35 000 heures, tout en garantissant un éclairage homogène de 100 lux.

Au niveau de l'étable, le projecteur BY178P de 100 W et 10 000 lm, doté d'un indice de protection IP43, a été sélectionné pour sa résistance aux conditions d'humidité et de poussière, permettant d'atteindre 200 lux tout en limitant le nombre d'appareils installés. Enfin, pour la serre, le projecteur BY235P de 150 W fournissant 15 000 lm et présentant un indice de protection IP65 répond aux exigences d'un éclairage de précision de 300 lux, tout en réduisant le nombre de luminaires nécessaires et en optimisant l'espace disponible au plafond.

II.2.3.2. Calculs détaillés par zone

Pour l'ensemble des zones étudiées, certains paramètres ont été uniformisés afin de simplifier le dimensionnement. Les facteurs de réflexion sont fixés à 311, correspondant à des surfaces sombres typiques des bâtiments agricoles. Le facteur de dépréciation est pris égal à 1,4, en tenant compte des conditions climatiques de Tlemcen et de la poussière, avec un entretien annuel. Le rendement des luminaires est estimé à 0,9, assurant un dimensionnement fiable avec les équipements LED utilisés. La classe C est retenue pour garantir une bonne uniformité d'éclairage avec des luminaires à large diffusion. Enfin, les calculs sont réalisés zone par zone, en prenant le hangar (a = 20 m, b = 12 m) comme exemple pour déterminer l'indice de local k, puis la même méthode est appliquée aux autres zones.

$$k = \frac{20 \times 12}{(20+12)\times 3,4} = 2,206 \approx 2$$

Nous avons choisi k = 2, car cette valeur est la plus proche de celle calculée, ce qui permet de déterminer le facteur d'utilance. D'après le tableau (II.6), on trouve à partir de FR et k que facteur d'utilance : u = 0,78

Étant donné que toutes les données nécessaires sont désormais disponibles et clairement définies, on peut passer à la détermination du flux lumineux total. Ce calcul s'appuie sur les paramètres déjà établis et s'exprime par la relation suivante :

$$F = \frac{100 \times 240 \times 1,4}{0,9 \times 0,78} = 47863\ lm$$

On peut ainsi déterminer le nombre de luminaires nécessaires, qui peut être exprimé comme suit :

$$N = \frac{47863}{3500} = 13,6 \approx 14\ Tube\ de\ LED$$

Et la puissance totale de cette zone est donnée par :

$P_T = 14 \times 25{,}9 = 362{,}6\ W$

La distance maximale entre luminaires (DM) est :

$DM \leq 1{,}3 \times 3{,}4 = 4{,}42\ m$, On peut résumer ces résultats dans le tableau suivant :

Paramètre	**Hangar**	**Etable**	**Serre**	**Total**
Surface (m²)	240	150	96	486
Éclairement E (lux)	100	200	300	–
Hauteur utile h (m)	3,4	2,6	2,0	–
Indice du local K	2,0	2,5	2,5	–
Facteur d'utilance u	0,78	0,82	0,82	–
Rendement luminaire η	0,9	0,9	0,9	–
Flux total nécessaire (lm)	47 863	56 911	54 634	–
Flux unitaire (lm)	3 500	10 000	15 000	–
Nombre de luminaires	14	6	4	24
Distance maximale	4,42	3,38	2,60	
Puissance unitaire P_u(W)	25,9	100	150	–
Puissance totale P_T (W)	362,6	600	600	1 562,6

Tableau II.9 : Synthèse des paramètres de dimensionnement d'éclairage LED par zone.

On peut également tirer des conclusions pertinentes à partir de la courbe rectangulaire présentée ci-après, laquelle permet de visualiser de manière claire et synthétique le nombre de luminaires requis ainsi que la puissance totale correspondante pour chacune des zones agricoles étudiées. Cette représentation graphique facilite ainsi l'analyse comparative entre les différentes zones et met en évidence les besoins énergétiques associés à chaque cas..

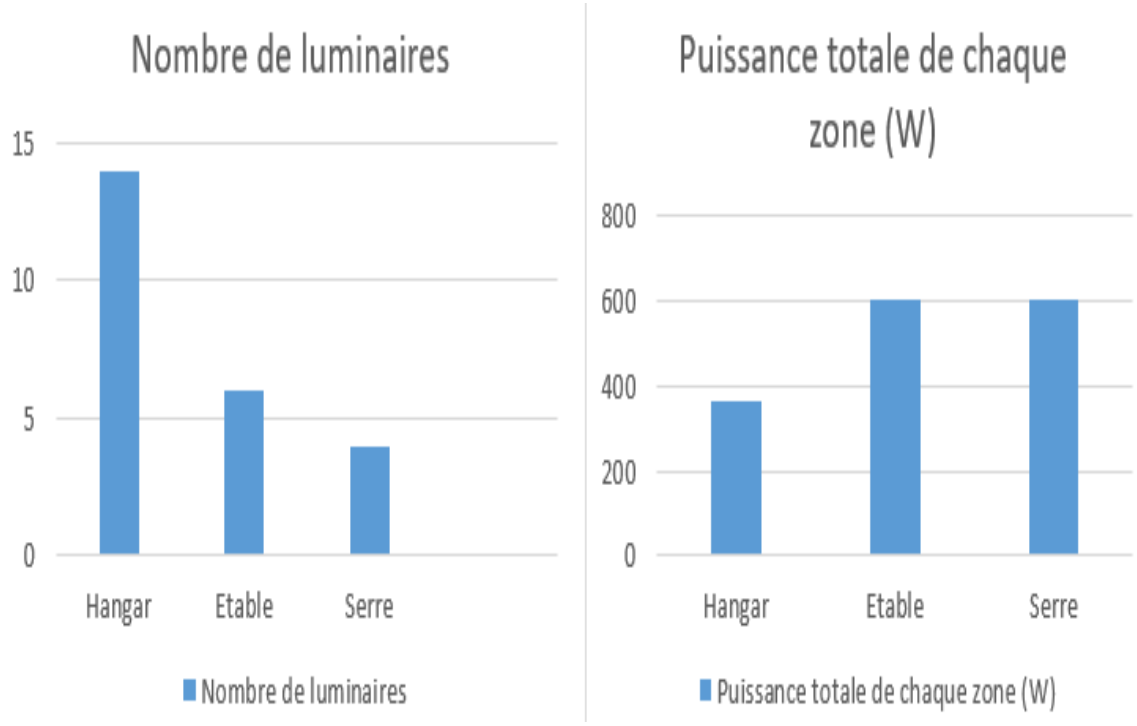


Figure II.7 : Puissance LED vs nombre de luminaires.

II.2.3.3. Répartition des luminaires pour chaque zone

Concernant la zone « Hangar », la répartition des luminaires est constituée de 14 tubes LED disposés en 2 rangées de 7 tubes chacune. L'espacement entre les rangées est de 6 m, une valeur légèrement supérieure à 4,42 m, mais elle reste acceptable compte tenu du faisceau large des tubes LED, garantissant une bonne uniformité d'éclairage.

Pour la zone « Étable », la répartition comprend 6 projecteurs organisés en 2 rangées de 3 projecteurs chacune. L'espacement entre les rangées est de 5 m, tout comme l'espacement entre les projecteurs. Ce léger dépassement reste acceptable dans un contexte agricole où les exigences d'uniformité sont relativement flexibles.

Pour la serre, la répartition est composée de 4 projecteurs disposés en 2 rangées de 2 projecteurs chacune. L'espacement entre les rangées est de 4 m, tandis que l'espacement entre les projecteurs est de 6 m. Ce dépassement reste acceptable, car les projecteurs à large faisceau permettent d'assurer une couverture homogène de la surface éclairée.

Par ailleurs, l'analyse globale de la répartition des luminaires met en évidence que les choix effectués permettent d'assurer un compromis satisfaisant entre les exigences théoriques de calcul et les contraintes réelles d'installation sur le terrain. En effet, les légers écarts observés au niveau des espacements restent maîtrisés et n'affectent pas de manière significative la qualité de l'éclairage. Ainsi, l'ensemble du système retenu garantit une couverture lumineuse homogène et adaptée aux besoins spécifiques de chaque zone étudiée.

II.3. Profil de charge pour l'éclairage agricole

II.3.1. Profil de charge journalière

Pour caractériser les besoins énergétiques de l'éclairage de la ferme, nous avons défini quatre scénarios d'utilisation de l'éclairage en fonction des saisons et de l'intensité des travaux agricoles. Les durées d'éclairage (heures par jour) pour chaque zone sont résumées dans le tableau suivant :

Saison	Hangar (h)	Etable (h)	Serre (h)
Été max	6	8	10
Été partiel	4	6	8
Hiver max	8	10	12
Hiver partiel	6	8	10

Tableau II.10 : Durées d'éclairage (h/j) selon la saison et le niveau d'utilisation.

Les durées d'éclairage ont été choisies selon la durée de la nuit, qui est d'environ 10 heures en été avec un coucher du soleil vers 20h30 et un lever vers 6h30, et 14 heures en hiver avec un coucher vers 18h00 et un lever vers 8h00, ainsi que selon les besoins de chaque zone.

Pour le hangar, l'éclairage est utilisé surtout le matin et le soir pour les activités de chargement et de déchargement. En été, il est limité à 6 heures, réparties entre 4h30–6h30 avant le lever du soleil et 20h30–0h30 après le coucher. En hiver, il peut atteindre 8 heures, avec une utilisation de 4h–8h avant le lever et 18h–22h après le coucher. En mode partiel, certaines heures de nuit sont supprimées pour réduire la consommation.

Dans l'étable, l'éclairage est nécessaire pour les soins des animaux. En été, il couvre le matin de 4h à 6h30 avant le lever du soleil et la soirée de 20h30 à 2h après le coucher, avec une légère surveillance nocturne. En hiver, la durée est plus longue, jusqu'à 10 heures, de 3h30 à 8h avant

le lever et de 18h à 23h30 après le coucher. En mode partiel, seule la partie essentielle est gardée, sans surveillance nocturne.

Dans la serre, l'éclairage est utilisé pour le travail et la croissance des plantes, de 20h30 à 6h30 en été et de 18h à 6h en hiver. En mode partiel, il est limité aux heures de travail.En mode partiel, la durée d'éclairage est réduite uniquement aux heures de travail.On sait que l'énergie journalière consommée E_j est le produit de la puissance totale de chaque zone P_T par le nombre d'heures de fonctionnement dans la journée t, telle que :

$$E_j = P_T \times t \quad \text{(II.6)}$$

Donc, on peut présenter les résultats de chaque zone dans le tableau suivant :

Zone agricole	Eté max	Eté partiel	Hiver max	Hiver partiel
Hangar (Wh/j)	2 175,6	1 450,4	2 900,8	2 175,6
Etable (Wh/j)	4 800	3 600	6 000	4 800
Serre (Wh/j)	6 000	4 800	7 200	6 000
Énergie journalière totale (kWh/j)	12,98	9,85	16,10	12,98

Tableau II.11 : Energie journalière consommée (Wh/j)

À partir des résultats obtenus dans le tableau II.11, nous pouvons tracer la courbe de la puissance consommée par l'éclairage en fonction des heures de la journée, pour le scénario hiver maximal (le plus contraignant). Cette courbe, appelée profil journalier de charge, permet de visualiser l'évolution de la puissance électrique sollicitée par les trois zones (hangar, étable, serre) sur une journée de 24 heures.

Les données horaires sont présentées dans le tableau ci-dessous, et le graphique correspondant est donné par la figure suivant :

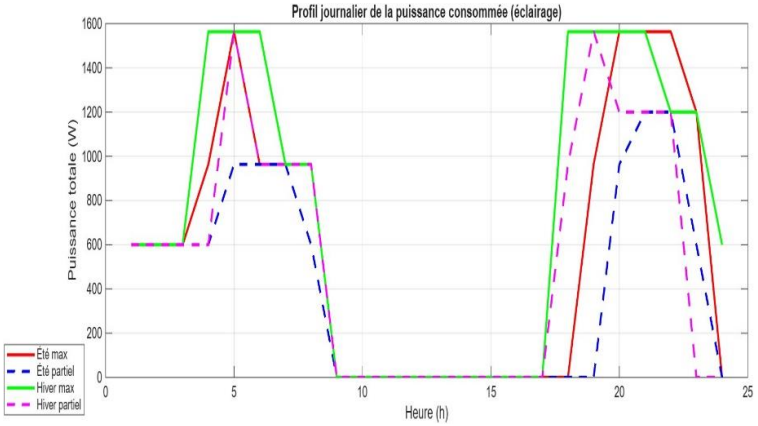


Figure II.8 : Profils journaliers de la puissance consommée pour les quatre scénarios d'éclairage.

Nous pouvons également représenter les résultats sous forme de diagramme comparant l'énergie journalière consommée par l'éclairage pour les quatre scénarios, à savoir été maximal, été partiel, hiver maximal et hiver partiel. Ce graphique, intitulé « énergie consommée en fonction des saisons », permet de visualiser clairement l'influence des saisons et du niveau d'utilisation sur les besoins énergétiques quotidiens.

Les valeurs, exprimées en kilowattheures par jour, sont tirées du tableau II.11, et le graphique correspondant est présenté dans la figure suivante :

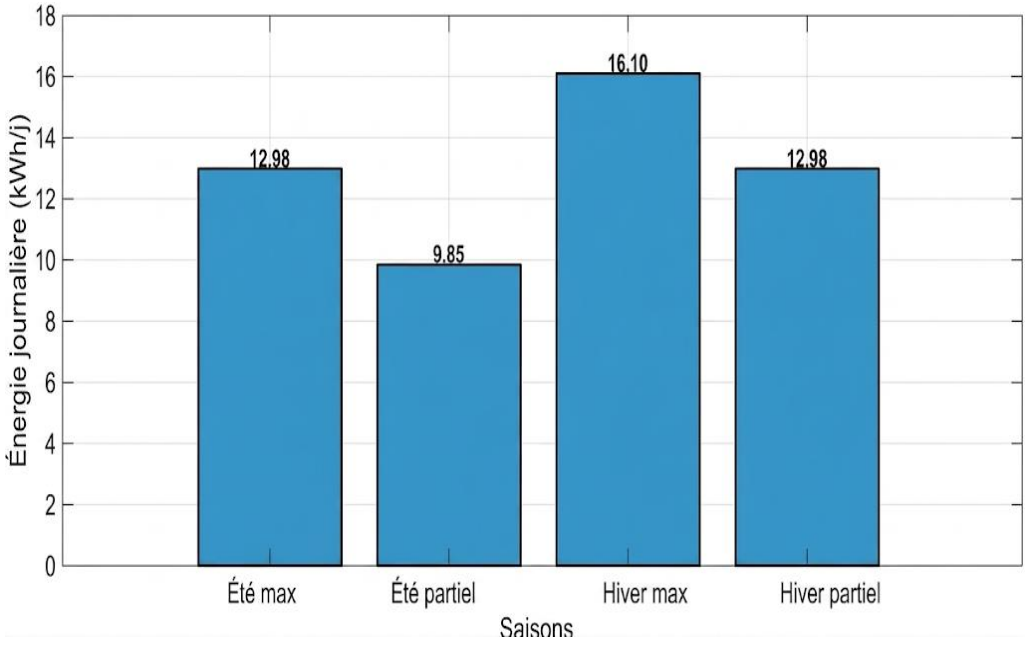


Figure II.9 : Energie journalière totale en fonction de chaque saison.

II.3.2. Profile de charge annuelle

À partir des énergies journalières calculées dans le tableau II.11, nous pouvons estimer la consommation électrique annuelle de l'éclairage pour chaque scénario. En considérant une année de 365 jours, l'énergie annuelle (kWh/an) est obtenue en multipliant l'énergie journalière par 365. Le tableau ci-dessous récapitule ces valeurs pour les quatre scénarios.

Scénario	Energie annuelle (kWh/an)
Été max	4 737,7
Été partiel	3 595,3
Hiver max	5 876,5
Hiver partiel	4 737,7

Tableau II.12 : Energie annuelle totale pour chaque scénario.

La consommation annuelle d'éclairage varie selon les scénarios. L'hiver maximal est le plus élevé avec 5876,5 kWh par an, tandis que l'été partiel est le plus faible avec 3595,3 kWh par an. Les scénarios été maximal et hiver partiel ont la même valeur de 4 737,7 kWh par an. Pour le dimensionnement du système photovoltaïque, le scénario hiver maximal est retenu car il représente le cas le plus contraignant.

Le graphique suivant permet de visualiser l'impact du choix du scénario sur la consommation annuelle :

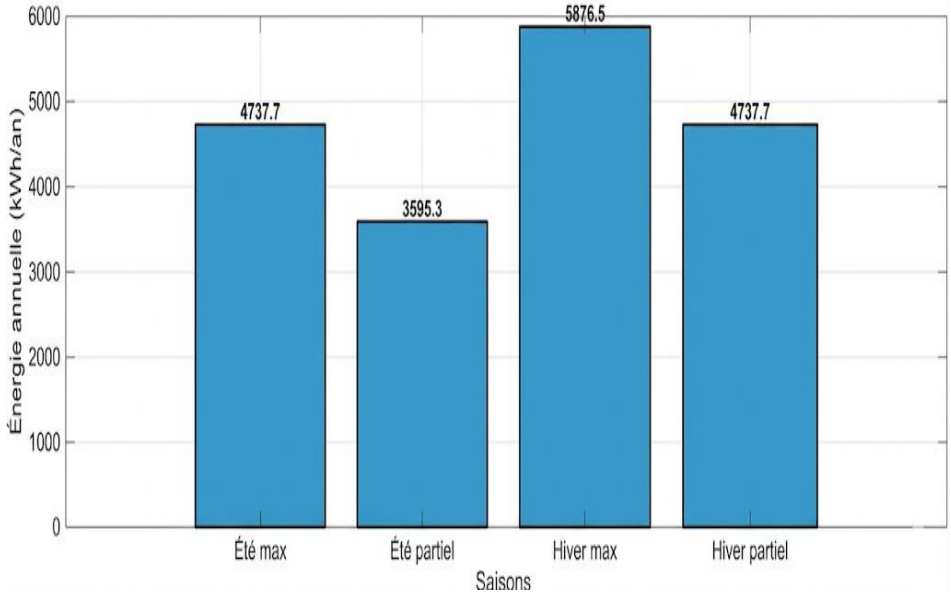


Figure II.10 : Energie annuelle en fonction de chaque saison.

II.4. Dimensionnement du champ photovoltaïque

Le dimensionnement des panneaux photovoltaïques dans la ferme de Chiali consiste à déterminer la puissance et le nombre de panneaux nécessaires pour couvrir les besoins en énergie électrique de l'éclairage des différentes zones. Ce dimensionnement prend en compte la consommation journalière et annuelle ainsi que les conditions d'ensoleillement du site afin d'assurer une production d'énergie suffisante et fiable tout au long de l'année. Il est basé sur le scénario hiver max, qui représente un cas de référence pour l'ensoleillement et permet d'adapter correctement le système aux variations saisonnières tout en garantissant la continuité de l'alimentation énergétique.

II.4.2. Dimensionnement du parc de batteries

II.4.2.1. Choix de la batterie (Lithium- Fer-Phosphate)

La batterie AQ-LITH D48-50 se distingue par ses performances élevées et sa grande fiabilité dans les applications de stockage d'énergie. Grâce à la technologie Lithium Fer Phosphate (LiFePO4), elle offre une durée de vie supérieure à 2000 cycles à 100 % de profondeur de décharge, ce qui garantit une exploitation durable avec une faible dégradation au cours du temps. Cette batterie présente également un poids réduit, estimé entre 40 % et 50 % de celui d'une batterie au plomb équivalente, ce qui facilite son transport et son installation. Elle admet une charge rapide et peut rester longtemps en état de décharge sans subir de détérioration significative. De plus, sa capacité reste pratiquement indépendante du courant de décharge, assurant ainsi des performances stables dans différentes conditions de fonctionnement. Contrairement aux batteries au plomb classiques, elle peut être déchargée jusqu'à 100 % de sa capacité utilisable tout en conservant une bonne durée de vie. Si nous adoptons une profondeur de décharge à 20 %, nous n'utilisons que 80 %pour éviter la décharge profonde.

Paramètre	AQ-LITH D48-50
Tension nominale	48 V
Capacité	50 Ah
Profondeur de décharge	80%
Cycle de vie	+2000

Tableau II.13 : Caractéristiques de batterie AQ-LITH D48-50.



Figure II.11 : Batterie AQ-LITH D48-50.

II.4.2.2. Calcul de nombre de batteries

On peut désormais déterminer le nombre de batteries nécessaire pour assurer l'alimentation de la charge d'éclairage. En effet, la consommation énergétique de cette charge doit être strictement égale à l'énergie stockée et fournie par le banc de batteries, afin de garantir un fonctionnement autonome et continu du système. Ainsi, le dimensionnement du nombre de batteries repose sur l'équilibre énergétique entre l'énergie demandée par la charge et l'énergie disponible dans les batteries, en tenant compte des conditions de fonctionnement et des pertes éventuelles du système.

Nous avons :

$$E_{batterie} = V_{batterie} \times C_{batterie} \quad \text{(II.7)}$$

Donc :

$E_{batterie} = 48 \times 50 = 2400\ Wh$

Donc on peut conclure le nombre de batteries tel que :

$N_{batterie} = \frac{E_{jT}}{E_{batterie}} = \frac{16100}{2400 \times 0.8} = 8.3 \approx 9\ batteries$

Et les batteries serrent répartir en parallèle.

II.4.3. Choix de régulateur de charge

Nous considérons maintenant le régulateur de charge, qui constitue un élément essentiel dans le système photovoltaïque. Son rôle principal est de contrôler et d'adapter la tension ainsi que

le courant provenant des panneaux photovoltaïques afin de garantir une charge correcte et sécurisée des batteries. Ce dispositif permet également d'optimiser le transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque et le banc de batteries tout en protégeant ce dernier contre les conditions de surcharge. Étant donné que notre banc de batteries fonctionne sous une tension nominale de 48 V, il est nécessaire de choisir un régulateur de charge capable de fournir cette tension à sa sortie afin d'assurer une charge efficace des batteries.

Le régulateur doit également être compatible avec les caractéristiques électriques du champ photovoltaïque, notamment la tension et le courant délivrés par les panneaux.

Dans cette étude, le régulateur 120A MPPT Solar Charge Controller 480V PV Input a été retenu comme solution adaptée aux exigences de notre installation

Ce choix est justifié par sa capacité à accepter une tension d'entrée élevée provenant du générateur photovoltaïque tout en délivrant une tension de sortie compatible avec notre banc de batteries de 48 V. Les principales caractéristiques techniques de ce régulateur sont présentées ci-après :

Critère	Valeur
Référence	120A MPPT Solar Charge Controller 480V PV Input
Ideal Voc	480V
Courant maximal	120 A
Tension batterie	24V Jusqu'à 192V

Tableau II.14 : Caractéristiques du régulateur de charge 120A MPPT Solar Charge Controller 480V PV Input.

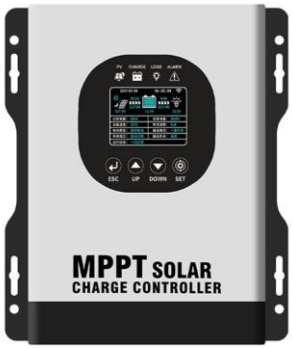


Figure II.12 : Régulateur de charge 120A MPPT Solar Charge Controller 480V PV Input.

II.4.4. Dimensionnement des panneaux photovoltaïques tandem (Pérovskite/Silicium)

II.4.4.1. Choix de panneaux photovoltaïque :

Le modèle de panneau photovoltaïque tandem Pérovskite/Silicium n'existe pas encore commercialement sur le marché. Pour cette raison, nous avons réalisé une simulation sous le logiciel MATLAB Simulink afin de concevoir un panneau solaire tandem basé sur les caractéristiques électriques et physiques des cellules Pérovskite/Silicium. Cette simulation nous a permis d'analyser et d'extraire les paramètres nécessaires du panneau photovoltaïque, indispensables pour les calculs et pour la réalisation de la simulation du champ photovoltaïque présentée dans le chapitre III. Ainsi, nous avons obtenu un modèle de panneau possédant les caractéristiques suivantes selon les conditions standards STC (Standard Test Conditions).

Paramètre	Valeur estimée
Pmax (Wc)	605
Vmpp (V)	57,3
Impp (A)	10.6
Voc (V)	64.1
Isc (A)	10,8
η (%)	28.8
Surface de panneau (mm^2)	1987×1057

Tableau II.15 : Fiche technique d'un panneau tandem pérovskite et silicium.

II.4.4.2. Calcul de nombre de panneaux photovoltaïque :

Notre panneau photovoltaïque présente une puissance maximale (Pmax) dans les conditions hivernales les plus défavorables, en considérant une irradiation solaire réduite à 100 W/m². Dans ces conditions, la puissance délivrée par un seul panneau est estimée à 57W jusqu'à 59W. Par ailleurs, la durée d'ensoleillement pendant la journée la plus courte de l'année est d'environ 8 heures, tandis que le système d'éclairage doit assurer un fonctionnement de 10 heures durant la nuit. Il est donc nécessaire que l'installation photovoltaïque produise suffisamment d'énergie pendant la période d'ensoleillement afin de couvrir les besoins instantanés et de stocker l'énergie excédentaire dans les batteries pour alimenter l'éclairage pendant les heures nocturnes. Cette contrainte doit être prise en compte lors du dimensionnement du générateur

photovoltaïque et du système de stockage afin de garantir la continuité de service même dans les conditions climatiques les plus défavorables,

Donc :

$$Nombre\ de\ panneaux\ total = \frac{1562{,}6\ \times 10}{57 \times 8} = 34{,}26\ \approx 35\ panneaux$$

Le nombre de panneaux photovoltaïques est porté à 35 modules afin d'assurer une répartition adéquate entre les connexions en série et en parallèle. Cette configuration permet d'ajuster correctement la tension et le courant délivrés par le champ photovoltaïque aux besoins de l'installation. Elle garantit également une production énergétique suffisante, même dans les conditions de fonctionnement les plus défavorables, tout en assurant la stabilité et la performance globale du système.

On sait que la plage de tension d'entrée de notre régulateur est comprise entre 300 V et 600 V. Dans ce cadre, nous avons choisi de travailler avec une tension de dimensionnement de 450 V, afin d'assurer un fonctionnement optimal du système dans une zone intermédiaire de la plage admissible. Ce choix permet de garantir une bonne marge de sécurité et de stabilité, même en cas de variations ou de légère diminution de la tension, sans affecter le bon fonctionnement du régulateur.

Le nombre de panneaux en série est déterminé en divisant la tension de dimensionnement de 450 V par la tension en circuit ouvert (Voc) d'un panneau, égale à 64,1 V. Le choix de Voc permet de prendre en compte le cas le plus défavorable d'augmentation de la tension.

Donc le nombre de panneaux en série est :

$$Ns = \frac{450}{64{,}1} = 7\ panneaux$$

On peut conclure le nombre de panneaux en parallèle tel que :

$$Np = \frac{Nombre\ de\ panneaux\ total}{Ns} = \frac{35}{7} = 5\ strings$$

II.4.5. Choix des câbles

Le dimensionnement des câbles est réalisé conformément à une méthodologie, a chute de tension ΔU(V)admissible est fixée à 2 % de la tension nominale du tronçon considéré, et la résistivité du cuivre est prise égale à $\rho = 1{,}7 \times 10^{-8}\ \Omega\cdot m$ [22].

La section minimale théorique S (en mm^2) est calculée par la loi d'Ohm et la formule de la résistance R(Ω) :

$$R = \frac{\Delta U}{I} \quad \text{(II.13)}$$

Et :

$$S = \rho \times \frac{L}{R} \quad \text{(II.14)}$$

Tel que : L est la longueur totale du câble en (m) et I est le courant maximal qui égale à 43,2A, puisque nous avons 4 strings

II.4.5.1. Câbles DC (panneaux → régulateur)

On a :

$\Delta U = 0{,}02 \times Vmpp = 0{,}02 \times 10{,}6 = 0.212\ V$

Ainsi :

$R = \frac{0.212}{43{,}2} = 0{,}0049\ \Omega$

On estime la longueur de câble produite en fonction du nombre de panneaux Np et de la largeur de chaque panneau Lp :

$L = Np \times Lp = 4 \times 1{,}057 = 4{,}228\ m$

Donc la section S est égale à :

$$S = 1{,}7 \times 10^{-8} \times \frac{4{,}228 \times 10^3}{0{,}0049} = 15\ mm^2$$

On présente ci-dessous le tableau regroupant les différents choix des sections de câbles retenues pour l'installation.

Section du câble (mm^2)	0,5	0,75	1	1,5	2,5	4	6	10	16
Intensité maximale (A)	3	6	10	16	25	30	40	60	80

Tableau II.16 : Sections des câbles [22].

Pour des raisons mécaniques et de sécurité, on préfère 16 mm² (câble solaire cuivre, double isolation). La chute de tension réelle avec 16 mm² d'après les équations (II.13) et (II.14) est :

$$\Delta U = \rho \times \frac{L \times I}{S} = 1{,}7 \times 10^{-8} \times \frac{4.228 \times 43{,}2}{16 \times 10^{-6}} = 0{,}19 < 2\%$$

II.4.5.2. Câbles DC (régulateur → batteries)

On sait que Imax de régulateur est 120 A avec une tension de 48V, supposons que la longueur du câble est 5m, c'est une valeur pratique, non basée sur la largeur des panneaux.

Donc :

$$\Delta U = 0{,}02 \times 48 = 0{,}96\, V$$

$$R = \frac{0{,}96}{120} = 0.001\ \Omega$$

Alors la section minimale est :

$$S = 1{,}7 \times 10^{-8} \times \frac{5}{0{,}001} = 10{,}62\, mm^2$$

Section normalisée retenue : 16 mm².

Donc on schématiser notre système PV dans le schéma suivant :

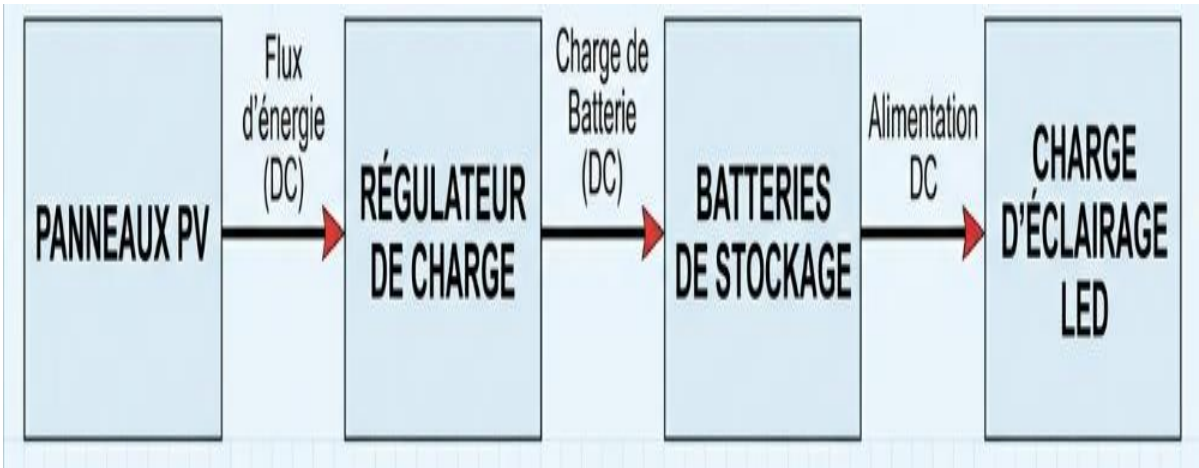


Figure II.13 : Système photovoltaïque autonome avec des batteries.

II.5. Etude économique

Afin d'évaluer l'intérêt économique de la technologie tandem pérovskite/silicium par rapport au silicium classique, une étude comparative est réalisée en considérant le même besoin énergétique.

Nous avons le tableau suivant qui exprime l'étude économique :

Equipement	Prix unitaire (DA)	Nombre	Prix totale (DA)
Tube LED T8 pour hangar	596	14	8344
Projecteur LED 100 W pour étable	5663	6	33978
Projecteur LED 150 W pour serre	7738	4	30952
Régulateur MPPT 120 A / 480 V	44130	1	44130
Batterie	77000	9	693000
Câble solaire DC 16 mm²	822	110 m	90420
Câble AC 3G 2,5 mm²	339	15 m	5085
Installation	180000	/	180000

Tableau II.17 : Prix des équipements d'installation du système d'éclairage alimenté par le champ photovoltaïque.

Le module silicium retenu possède une puissance de 605 Wc et son prix est supposé égal à 30 000 DA par panneau. Pour satisfaire le besoin énergétique de l'installation, le dimensionnement conduit à 41 panneaux en silicium tel que le panneau silicium donne une puissance de 47W pour le pire de cas, contre 35 panneaux tandem grâce au rendement plus élevé de cette dernière technologie.

Le prix réel du panneau tandem n'étant pas encore disponible sur le marché dans le cadre de cette étude, plusieurs hypothèses de prix sont considérées. L'analyse est divisée en deux cas selon la durée de vie supposée du panneau tandem.

II.5.1. Cas 1 : durée de vie du tandem limitée à environ 8 ans

Dans ce premier cas, on considère que la durée de vie du panneau tandem est d'environ 8 ans, tandis que le panneau silicium possède une durée de vie plus longue. L'étude est alors réalisée sur la base de trois situations.

- Si le panneau tandem est plus cher que le silicium, par exemple 40 000 DA contre 30000DA, le coût initial du champ tandem est plus élevé malgré le nombre réduit de panneaux. Le tandem est donc défavorable économiquement.
- Si le prix du tandem est légèrement supérieur ou proche de celui du silicium, par exemple 34 000 DA, le coût initial peut être comparable à celui du silicium. Cependant, la durée de vie limitée du tandem constitue un inconvénient important. Le renouvellement du champ tous les environ huit ans entraîne des dépenses supplémentaires, ce qui rend finalement le silicium plus intéressant économiquement sur une longue période.
- Même si le panneau tandem devient moins cher que le silicium, son remplacement périodique reste nécessaire en raison de sa durée de vie limitée. Ainsi, malgré un investissement initial plus faible, le coût cumulé des renouvellements peut devenir supérieur à celui du système en silicium.

Dans ce premier scénario, le silicium classique reste donc le choix économiquement le plus intéressant, principalement en raison de la durée de vie plus importante prise en compte pour celui-ci.

II.5.2. Cas 2 : durée de vie du tandem comparable à celle du silicium

Dans le deuxième cas, on considère que les progrès technologiques permettent au panneau tandem d'atteindre une durée de vie comparable à celle du silicium classique. Cette hypothèse permet d'évaluer l'intérêt économique du tandem sans pénalisation liée au renouvellement fréquent des panneaux.

- Si le tandem est plus cher que le silicium, par exemple 36 000 DA contre 30 000 DA, son coût d'investissement reste supérieur. Dans ce cas, le silicium demeure économiquement plus avantageux, malgré le meilleur rendement du tandem.
- Si le tandem est légèrement plus cher que le silicium, par exemple 34 000 DA, la différence de coût peut être compensée par le nombre inférieur de panneaux nécessaires

(35 panneaux tandem contre 41 panneaux silicium). Dans cette situation, le coût total du champ tandem peut devenir inférieur à celui du champ silicium. Le tandem constitue alors le choix le plus intéressant, puisqu'il combine un coût global avantageux, un rendement supérieur et une durée de vie comparable.

- Si le tandem est moins cher que le silicium, il devient naturellement plus avantageux économiquement, puisqu'il nécessite moins de panneaux, présente un rendement supérieur et possède une durée de vie comparable.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, l'étude du site agricole a permis de mettre en évidence un potentiel solaire favorable à l'utilisation d'un système photovoltaïque autonome. Les besoins d'éclairage des trois zones étudiées ont été déterminés, conduisant à une puissance totale d'environ **1562,6 W** et à une consommation journalière maximale de **16,10 kWh/j** pour le scénario hiver maximal. Le dimensionnement a ensuite permis de définir les principaux composants de l'installation, notamment les batteries, le régulateur MPPT, les câbles et le champ photovoltaïque tandem. Le panneau tandem étudié, d'une puissance de **605 Wc** et d'un rendement de **28,8 %**, permet de réduire le nombre de modules nécessaires par rapport au silicium classique. Enfin, l'étude économique montre que l'intérêt du tandem dépend principalement de son prix et de sa durée de vie.

Chapitre III

Simulation et interprétations des résultats

III. Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation d'un panneau photovoltaïque tandem Pérovskite/Silicium sous le logiciel Simulink. L'objectif principal de cette étude est d'analyser le comportement électrique et énergétique du module photovoltaïque tandem dans différentes conditions de fonctionnement, ainsi que d'évaluer ses performances par rapport à un panneau photovoltaïque conventionnel à base de silicium monocristallin. La technologie tandem Pérovskite/Silicium représente actuellement l'une des solutions les plus prometteuses dans le domaine photovoltaïque grâce à son rendement élevé et à sa meilleure exploitation du spectre solaire. En combinant une cellule supérieure en pérovskite avec une cellule inférieure en silicium, cette architecture permet de réduire les pertes énergétiques liées aux limitations des cellules photovoltaïques classiques et d'améliorer significativement l'efficacité de conversion.

Dans cette étude, une modélisation électrique du panneau tandem a été développée afin d'extraire ses principales caractéristiques électriques, notamment la puissance maximale Pmax , la tension en circuit ouvert Voc, le courant de court-circuit Isc, la tension au point de puissance maximale Vmpp, le courant au point de puissance maximale Impp ainsi que le rendement énergétique du module. Une attention particulière sera portée à l'influence des paramètres climatiques, en particulier l'irradiation solaire et la température, sur les performances du panneau photovoltaïque. L'étude analysera les variations des courbes caractéristiques I−VI-VI−V et P−VP-VP−V ainsi que l'évolution des paramètres électriques du module sous différentes conditions environnementales.

En plus, une comparaison détaillée entre le panneau tandem Pérovskite/Silicium et un panneau photovoltaïque classique en silicium sera présentée afin de mettre en évidence les avantages et les limites de chaque technologie. Cette comparaison portera principalement sur le rendement énergétique, la stabilité des paramètres électriques, la sensibilité à la température et la capacité de production énergétique sous différentes irradiations solaires.

Enfin après l'étude comparative entre les deux technologies photovoltaïques, ce chapitre présente également une simulation d'un champ photovoltaïque destiné à alimenter les besoins d'éclairage. Cette étape permet de relier les résultats obtenus à une application réelle, en évaluant le comportement global du système photovoltaïque et sa capacité à fournir l'énergie nécessaire à la charge étudiée.

III.I. Le panneau tandem pérovskite/silicium

Les modules photovoltaïques tandem pérovskite–silicium reposent sur une architecture multi-jonction visant à améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie solaire. Contrairement aux cellules photovoltaïques conventionnelles à simple jonction, qui sont limitées dans leur capacité à exploiter l'ensemble du spectre solaire, les cellules tandem utilisent deux matériaux semi-conducteurs ayant des bandes interdites différentes afin d'optimiser l'absorption des photons [23].

Dans cette configuration, la couche supérieure est constituée d'un matériau pérovskite, caractérisé par une bande interdite relativement élevée, généralement comprise entre 1,6 et 1,8 eV. Cette couche est principalement responsable de l'absorption des photons de haute énergie dans la région visible du spectre solaire. La couche inférieure, composée de silicium cristallin, possède une bande interdite d'environ 1,1 eV, ce qui lui permet d'absorber les photons de plus faible énergie transmis par la couche supérieure. Ce principe permet de réduire les pertes énergétiques associées à la thermalisation des photons, qui constitue l'une des principales limitations des cellules à simple jonction. En effet, dans une cellule classique, l'excès d'énergie des photons est dissipé sous forme de chaleur, alors que dans une cellule tandem, cette énergie est mieux exploitée grâce à la présence de plusieurs couches absorbantes. Par ailleurs, le fonctionnement efficace des cellules tandem dépend fortement de la qualité du transport des porteurs de charge. L'intégration de couches de transport sélectives pour les électrons et les trous permet d'améliorer l'extraction des charges et de limiter les recombinaisons non radiatives.L'utilisation de monocouches auto-assemblées comme contacts sélectifs permet d'améliorer significativement les performances et la stabilité des cellules tandem. Enfin, les cellules tandem pérovskite–silicium peuvent être réalisées selon différentes architectures, notamment les configurations à deux terminaux (2T) et à quatre terminaux (4T), qui influencent le mode de connexion électrique et les performances globales du dispositif [24].

Une méthode prometteuse pour dépasser la limite d'efficacité radiative des cellules solaires à simple jonction consiste à coupler plusieurs matériaux absorbants actifs afin de développer des cellules solaires tandem capables d'exploiter pleinement le spectre solaire et de réduire les pertes par thermalisation des photons de haute énergie. Dans les structures tandem multijonctions, les couches absorbantes photoactives présentant différentes bandes interdites captent différentes longueurs d'onde du spectre solaire. Dans une configuration à deux cellules,

la région de haute énergie du spectre est absorbée par la cellule avant, tandis que les photons de basse énergie transmis sont absorbés par la cellule arrière. Selon les différents modes de connexion, on distingue principalement deux types de cellules tandem : les configurations à quatre terminaux (4T) et les configurations monolithiques à deux terminaux (2T). Dans les structures 4T, les deux sous-cellules sont indépendantes et ne sont pas limitées par l'adaptation du courant, ce qui facilite leur fonctionnement. En revanche, dans les structures 2T, les deux sous-cellules sont connectées électriquement en série, ce qui impose une correspondance du courant entre les deux cellules. Malgré cette contrainte, les cellules tandem 2T présentent un potentiel de rendement plus élevé et nécessitent une seule électrode transparente, ce qui réduit les pertes optiques et améliore les performances globales. Les cellules solaires à pérovskite sont particulièrement adaptées comme cellule frontale en tandem avec des cellules en silicium grâce à leur mobilité élevée des porteurs de charge, leur grande longueur de diffusion et leur bande interdite ajustable. Dans une cellule solaire tandem pérovskite/c-Si 2T, la pérovskite à large bande interdite absorbe principalement la partie bleue du spectre solaire, tandis que le silicium absorbe la partie rouge. Cette complémentarité permet une meilleure exploitation du spectre solaire et réduit considérablement les pertes énergétiques. Des études théoriques montrent qu'une combinaison entre le silicium cristallin et une cellule pérovskite présentant une bande interdite comprise entre 1,65 et 1,70 eV pourrait atteindre un rendement théorique proche de 46 %, dépassant largement les limites des cellules photovoltaïques classiques à simple jonction [25].

III.2. Matlab SIMULINK

MATLAB est un environnement de calcul numérique et de programmation développé par la société **MathWorks**, largement utilisé dans les domaines scientifiques et d'ingénierie pour l'analyse mathématique, la modélisation, le traitement des données ainsi que la simulation des systèmes dynamiques. Grâce à ses nombreuses bibliothèques et outils intégrés, MATLAB permet de résoudre des problèmes complexes liés au calcul matriciel, à l'optimisation, au traitement du signal et aux systèmes électriques. Dans le domaine photovoltaïque, MATLAB est particulièrement utilisé pour l'analyse des performances des cellules et modules solaires, l'étude des paramètres électriques ainsi que le développement d'algorithmes de contrôle et d'optimisation.

Simulink est un environnement graphique intégré à MATLAB permettant la modélisation et la simulation de systèmes dynamiques à l'aide de blocs fonctionnels interconnectés. Simulink facilite la représentation visuelle des systèmes électriques, électroniques et énergétiques sans nécessiter une programmation complexe. Il offre plusieurs bibliothèques spécialisées, notamment Simscape Electrical, utilisées pour la modélisation des systèmes photovoltaïques, des convertisseurs de puissance, des batteries et des réseaux électriques. Dans cette étude, MATLAB/Simulink a été utilisé pour modéliser un panneau photovoltaïque tandem Pérovskite/Silicium afin d'analyser ses caractéristiques électriques et d'étudier l'influence de l'irradiation solaire et de la température sur les performances du module photovoltaïque.

III.3. Simulation de panneau tendem

III.3.1. Modelisation de panneau

D'après une étude bibliographique approfondie basée sur plusieurs articles scientifiques récents consacrés aux cellules photovoltaïques tandem Pérovskite/Silicium, les principaux paramètres électriques et physiques retenus dans cette étude ont été extraits à partir de résultats expérimentaux obtenus en laboratoire. Ces résultats représentent les performances de cellules tandem développées et testées dans des conditions contrôlées, notamment sous les conditions standards de test STC. Les paramètres issus de cette recherche bibliographique ont ensuite été utilisés comme données d'entrée pour réaliser la modélisation et la simulation du panneau tandem sous MATLAB/Simulink.

Isc (A)	5.37
Voc (V)	1.78
Irradiance	1000
Facteur de qualité	1.3
Résistance série	0.01
Nombre des cellules en série par string	36
Nombre des cellules en parallèle	2
Energy gap (eV)	1.68
Température (deg C)	25

Tableau III.1 : Paramètres électriques du panneau tandem pérovskite/silicium [26].

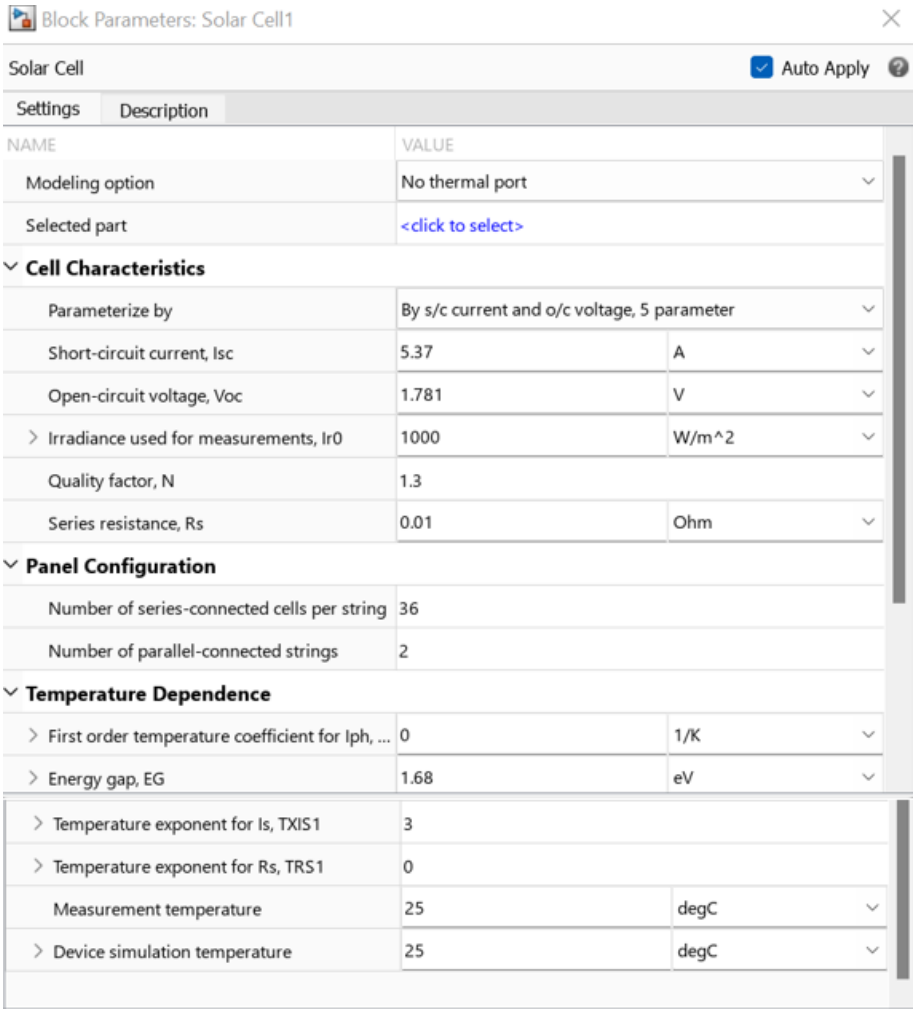


Figure III.1 : Paramétrage du panneau tandem pérovskite/silicium sous Simulink.

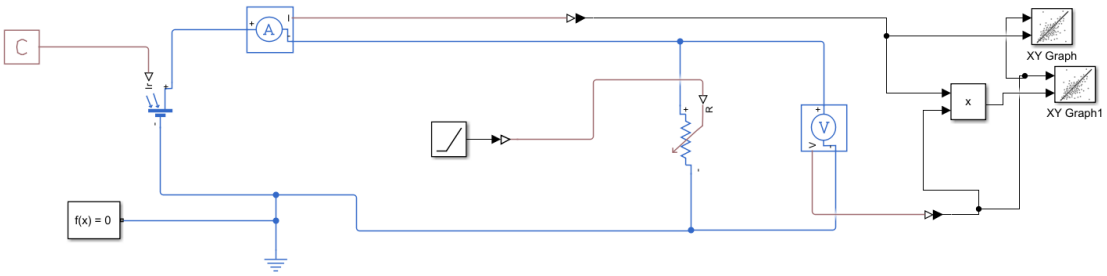


Figure III.2 : Schéma de simulation du panneau tandem pérovskite/silicium sous Simulink.

III.3.2. Résultats de simulation

III.3.2.1.Courbe I-V

La courbe caractéristique courant–tension I−VI-VI−V d'un panneau photovoltaïque représente la variation du courant délivré par le module en fonction de la tension appliquée à ses bornes. Cette courbe constitue l'une des principales caractéristiques électriques permettant d'évaluer les performances du panneau photovoltaïque. Elle met en évidence plusieurs paramètres importants tels que le courant de court-circuit Isc, correspondant au courant maximal obtenu lorsque la tension est nulle, ainsi que la tension en circuit ouvert Voc, correspondant à la tension maximale lorsque le courant est nul. La courbe I−VI-VI−V permet également de déterminer le point de puissance maximale MPP, défini par les paramètres Vmpp et Impp, pour lesquels le panneau fournit sa puissance maximale. La forme de cette courbe dépend fortement des conditions climatiques, notamment de l'irradiation solaire et de la température de fonctionnement du module photovoltaïque.

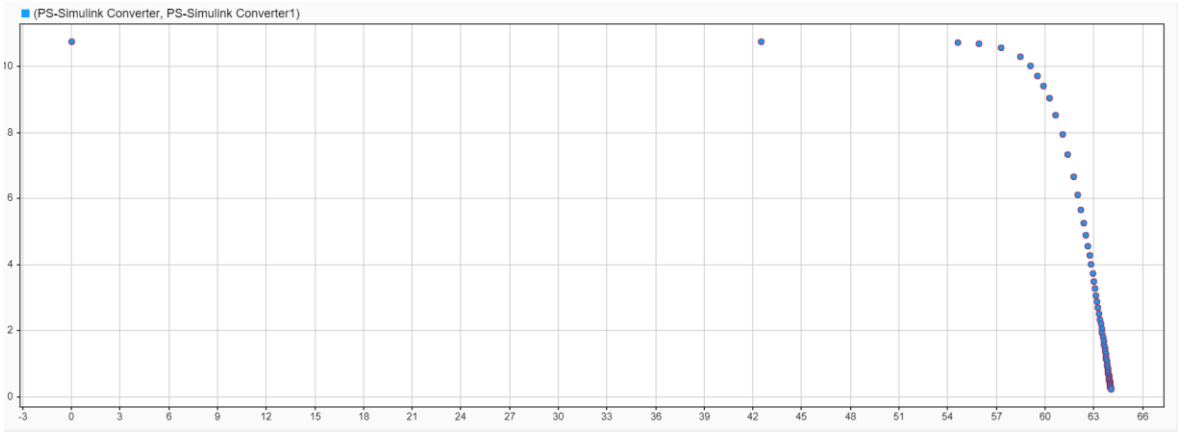


Figure III.3 : Caractéristique I-V du panneau tandem pérovskite/silicium sous les conditions STC.

III.3.2.2. Courbe P-V

La courbe caractéristique puissance–tension P−V d'un panneau photovoltaïque représente la variation de la puissance électrique fournie par le module en fonction de la tension à ses bornes. Cette courbe est obtenue à partir du produit de la tension et du courant du panneau photovoltaïque :

La courbe P−V permet d'identifier le point de puissance maximale MPP du panneau photovoltaïque, correspondant à la valeur maximale de puissance produite dans des conditions de fonctionnement données. Ce point est caractérisé par la tension Vmpp et le courant Impp, pour lesquels la puissance délivrée atteint sa valeur maximale Pmax.

L'analyse de cette courbe est particulièrement importante dans les systèmes photovoltaïques, car elle permet d'optimiser le fonctionnement du générateur solaire à travers les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Comme la courbe I−V, la courbe P−V est fortement influencée par l'irradiation solaire et la température du panneau photovoltaïque.

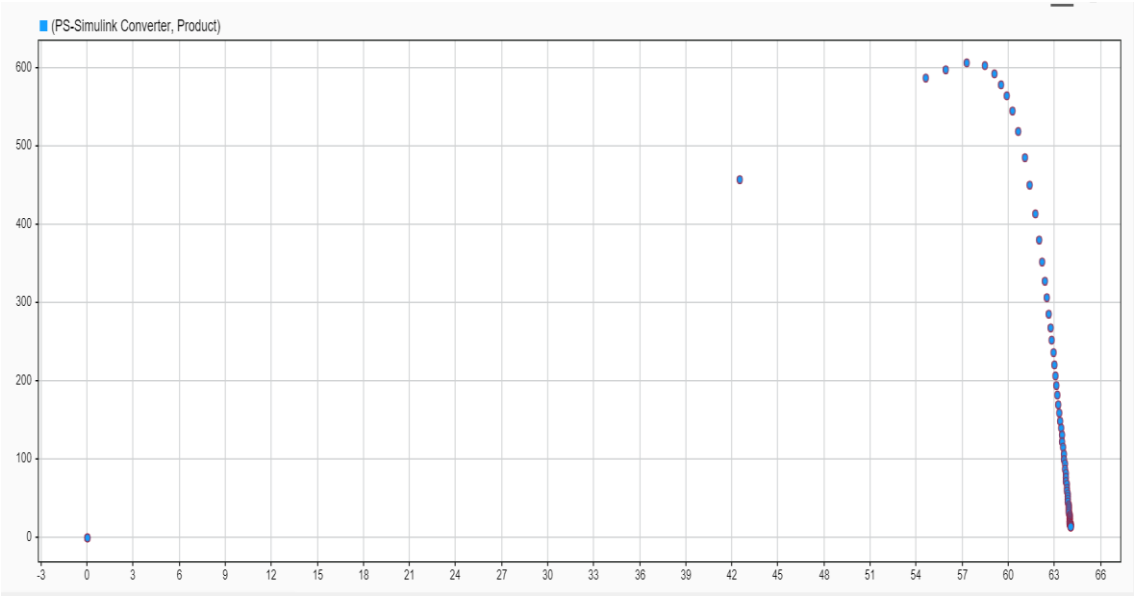


Figure III.4 : Caractéristique P-V du panneau tandem pérovskite/silicium sous les conditions STC.

III.3.2.3. Paramètres électriques obtenus

Le tableau suivant présente les résultats électriques du panneau tandem Pérovskite/Silicium simulé sous STC (1000 W/m², 25 °C).

Paramètre	Valeur estimée
Pmax (Wc)	605
Vmpp (V)	57,3
Impp (A)	10.6
Voc (V)	64.1
Isc (A)	10,8
η (%)	28.8
Surface de panneau (mm^2)	1987×1057

Tableau III.2 : Paramètres électriques obtenus par simulation du panneau tandem pérovskite/silicium sous les conditions STC.

Ces résultats représentent les principaux paramètres électriques du module photovoltaïque, notamment la puissance maximale Pmax, la tension au point de puissance maximale Vmpp, le courant au point de puissance maximale Impp, la tension en circuit ouvert Voc, le courant de court-circuit Isc ainsi que le rendement énergétique du panneau photovoltaïque.

- Calcule de facteur de forme :

$$FF = \frac{Pmax}{Isc \times Voc} \times 100 \quad \% \qquad \text{(III.1)}$$

Application numérique :

$$FF = \frac{605}{10.8 \times 64.1} \times 100\% = 87.39$$

- Calcule de rendement :

$$\eta = \frac{Pmax}{Pin} \qquad \text{(III.2)}$$

Avec : Pin=irradiation*surface =1000*1.987*1.057

$$\eta = \frac{605}{1000 \times 1.987 \times 1.057}$$

Donc :

$$\eta = 28.8\ \%$$

III.3.3. L'effet d'irradiance et température sur Voc , Isc , Pmax et le rendement

III.3.3.1. L'effet d'irradiance

Afin d'étudier l'influence de l'irradiation solaire sur les performances du panneau photovoltaïque tandem Pérovskite/Silicium, plusieurs simulations ont été réalisées sous différentes valeurs d'irradiance, tout en maintenant la température constante à 25∘C. Cette étude permet d'analyser l'évolution des principaux paramètres électriques du module photovoltaïque, notamment le courant de court-circuit Isc, la tension en circuit ouvert Voc, la puissance maximale Pmax ainsi que le rendement énergétique du panneau.

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de l'irradiation solaire entraîne principalement une augmentation importante du courant produit par le panneau photovoltaïque, tandis que la tension varie plus légèrement. Par conséquent, la puissance maximale délivrée par le module augmente avec l'irradiation solaire, ce qui améliore les performances globales du système photovoltaïque.

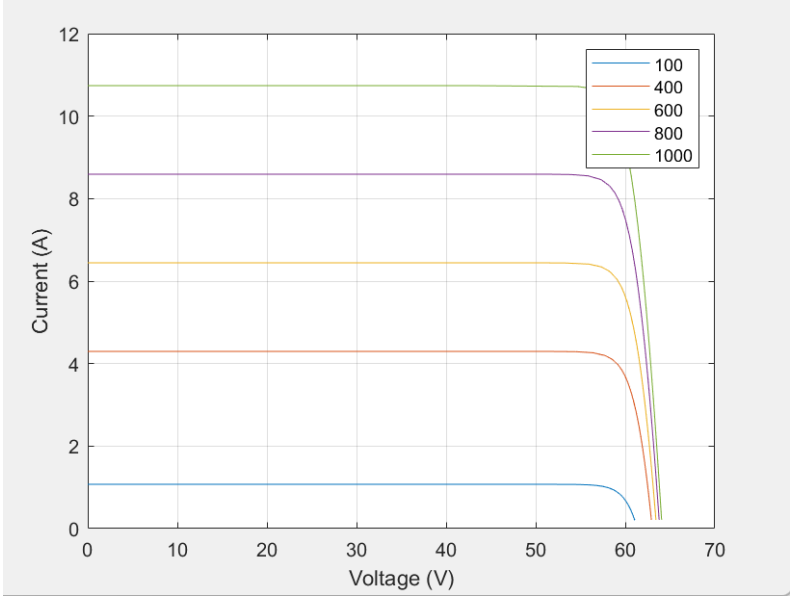


Figure III.5 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique I-V du panneau tandem pérovskite/silicium.

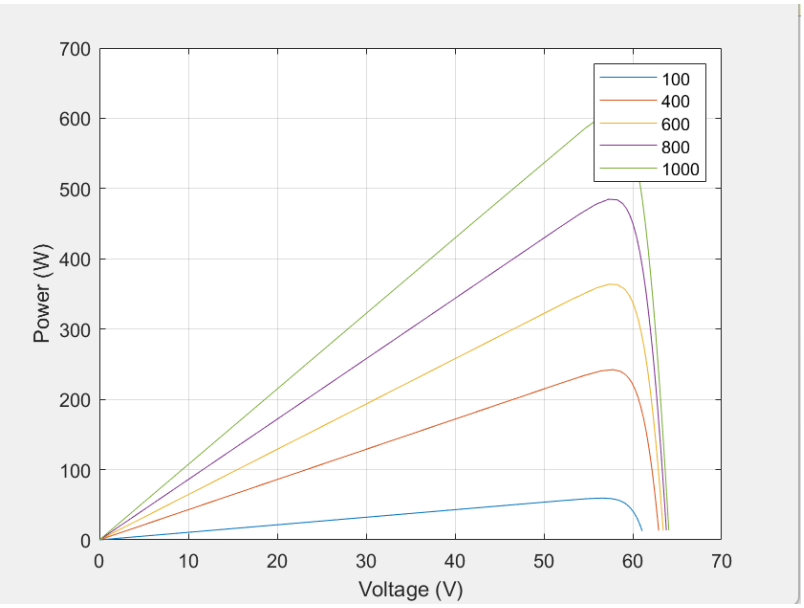


Figure III.6 : Influence de l'irradiance sur la caractéristique P-V du panneau tandem pérovskite/silicium.

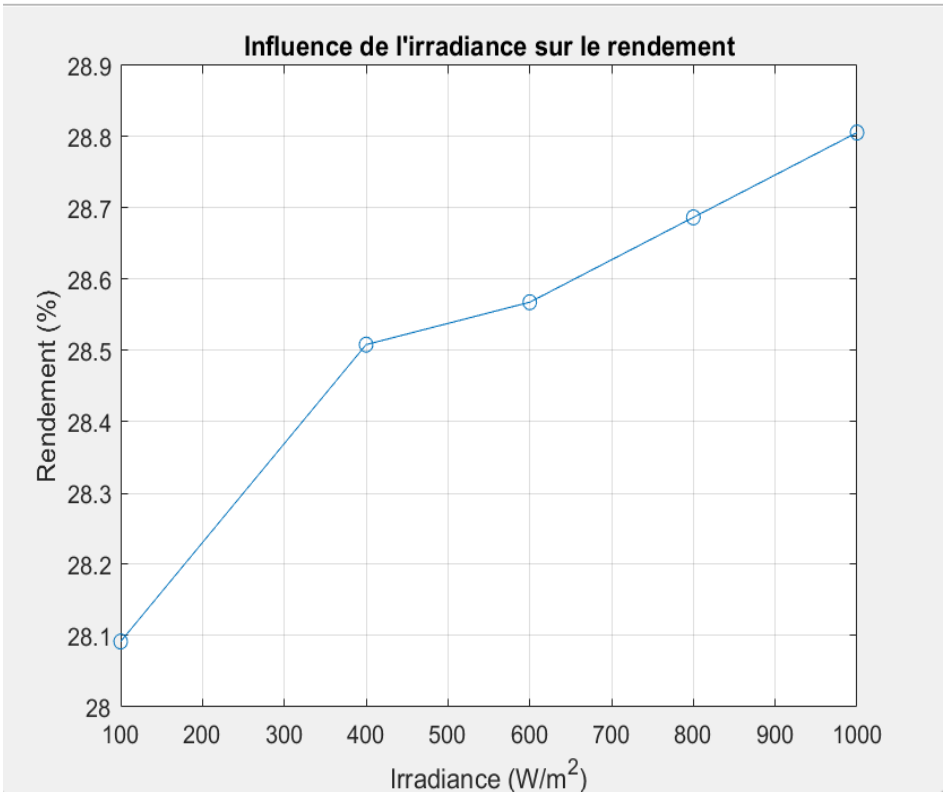


Figure III.7 : Variation du rendement du panneau tandem pérovskite/silicium en fonction de l'irradiance.

- Interprétations des résultats :

  Les courbes I−V et P−V obtenues sous différentes valeurs d'irradiation solaire mettent clairement en évidence l'influence directe de l'irradiance sur les performances électriques du panneau photovoltaïque tandem Pérovskite/Silicium. Les simulations réalisées montrent que l'augmentation de l'irradiation solaire entraîne principalement une augmentation importante du courant généré par le module photovoltaïque, notamment du courant de court-circuit Isc. Ce comportement s'explique par le fait qu'une irradiation plus élevée correspond à un flux de photons plus important incident sur la cellule photovoltaïque, ce qui augmente la génération des porteurs de charge et par conséquent le courant produit.

  Les résultats montrent également que la tension en circuit ouvert Voc varie très légèrement avec l'irradiation solaire. Contrairement au courant, la tension reste relativement stable malgré l'augmentation importante de l'irradiance. Cela confirme que l'irradiation solaire influence principalement le courant photovoltaïque alors que la tension dépend davantage des caractéristiques internes de la cellule et des phénomènes liés à la température.

  Par ailleurs, les courbes P−V montrent une augmentation significative de la puissance maximale Pmax lorsque l'irradiation augmente.

En effet, la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque est directement liée au produit de la tension et du courant :

$$P = V \times I \quad \text{(III.3)}$$

Ainsi, l'augmentation importante du courant sous forte irradiation entraîne une augmentation considérable de la puissance maximale produite par le module photovoltaïque. Les résultats obtenus montrent que le panneau tandem atteint ses meilleures performances électriques sous une irradiation de 1000 W/m², correspondant aux conditions standards de test STC.

Concernant l'influence de l'irradiation solaire sur le rendement du panneau photovoltaïque tandem Pérovskite/Silicium, la figure précédente montre que le rendement du module augmente légèrement avec l'augmentation de l'irradiance solaire. Les résultats obtenus indiquent également que le rendement reste relativement stable pour l'ensemble des valeurs d'irradiation étudiées, avec des variations faibles comprises entre 28.1% en 100 W/m² et 28.8% en 1000 w/m². Ce comportement traduit une bonne stabilité énergétique du panneau photovoltaïque tandem sous différentes conditions d'ensoleillement. L'amélioration progressive du rendement à forte irradiation est principalement liée à l'augmentation du nombre de porteurs de charge générés dans la cellule photovoltaïque, ce qui améliore la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Ces résultats confirment ainsi les performances élevées de la technologie tandem Pérovskite/Silicium ainsi que sa capacité à maintenir un rendement important même sous des irradiations variables.

III.3.3.2. L'effet de la température

Dans cette partie, l'influence de la température sur les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque tandem pérovskite/silicium est étudiée par simulation. L'irradiance est maintenue constante à **1000 W/m²,** tandis que la température du module est variée de **25 °C à 70 °C** afin d'analyser son effet sur les courbes **I-V** et **P-V**. Les coefficients de température utilisés dans cette étude sont basés sur les travaux de **Babics et al. (2023),** publiés dans **ACS Energy Letters**, qui portent sur les cellules solaires tandem pérovskite/silicium. Dans cette référence, les auteurs indiquent un coefficient de température du courant de court-circuit **TCIsc = −0,051 %/°C**, un coefficient de température de la tension en circuit ouvert d'environ **TCVoc = −0,18 %/°C**, ainsi qu'un coefficient de température de la puissance maximale d'environ **TCPmax = −0,21 %/°C**. Ces valeurs permettent de représenter la diminution de la tension et de la puissance maximale lorsque la température du module augmente.

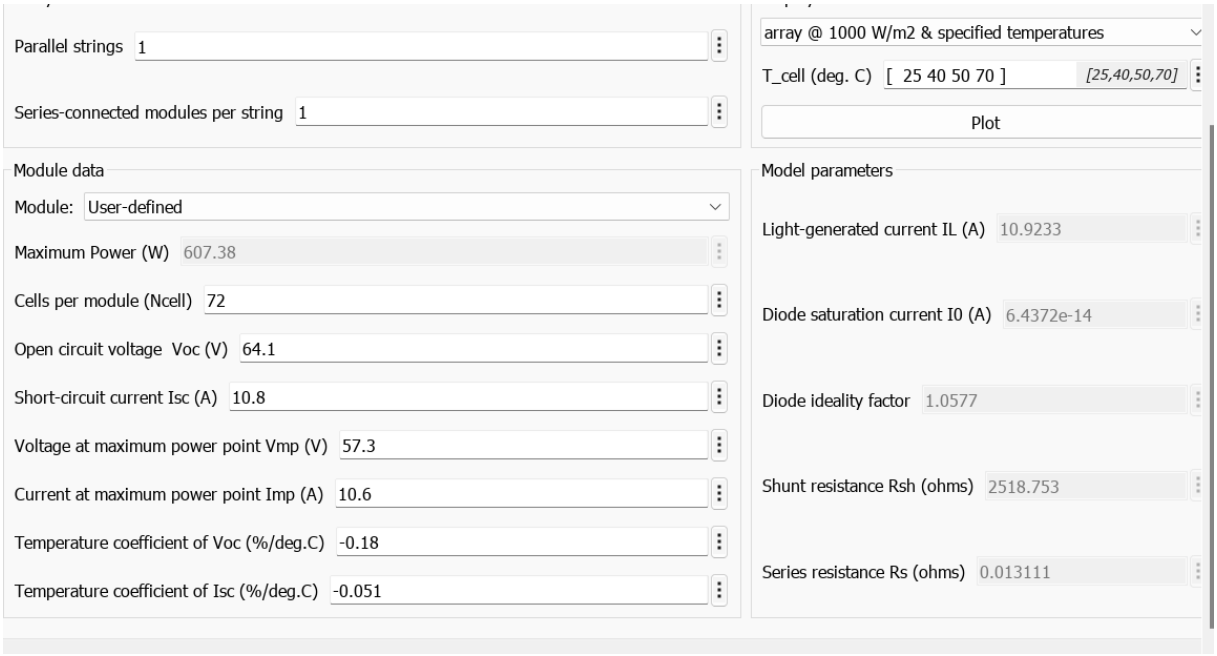


Figure III.8 : Paramétrage du panneau tandem pour l'étude de l'influence de la température.

Apres la simulation on obtient les résultats suivants :

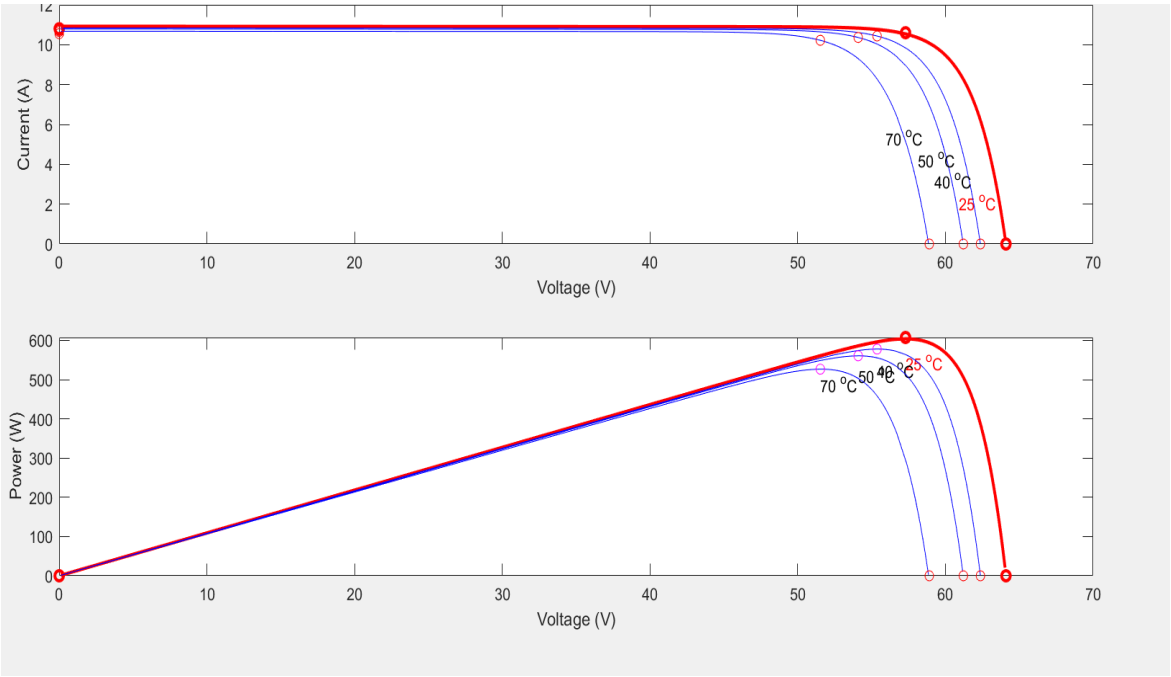


Figure III.9 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V du panneau tandem pérovskite/silicium.

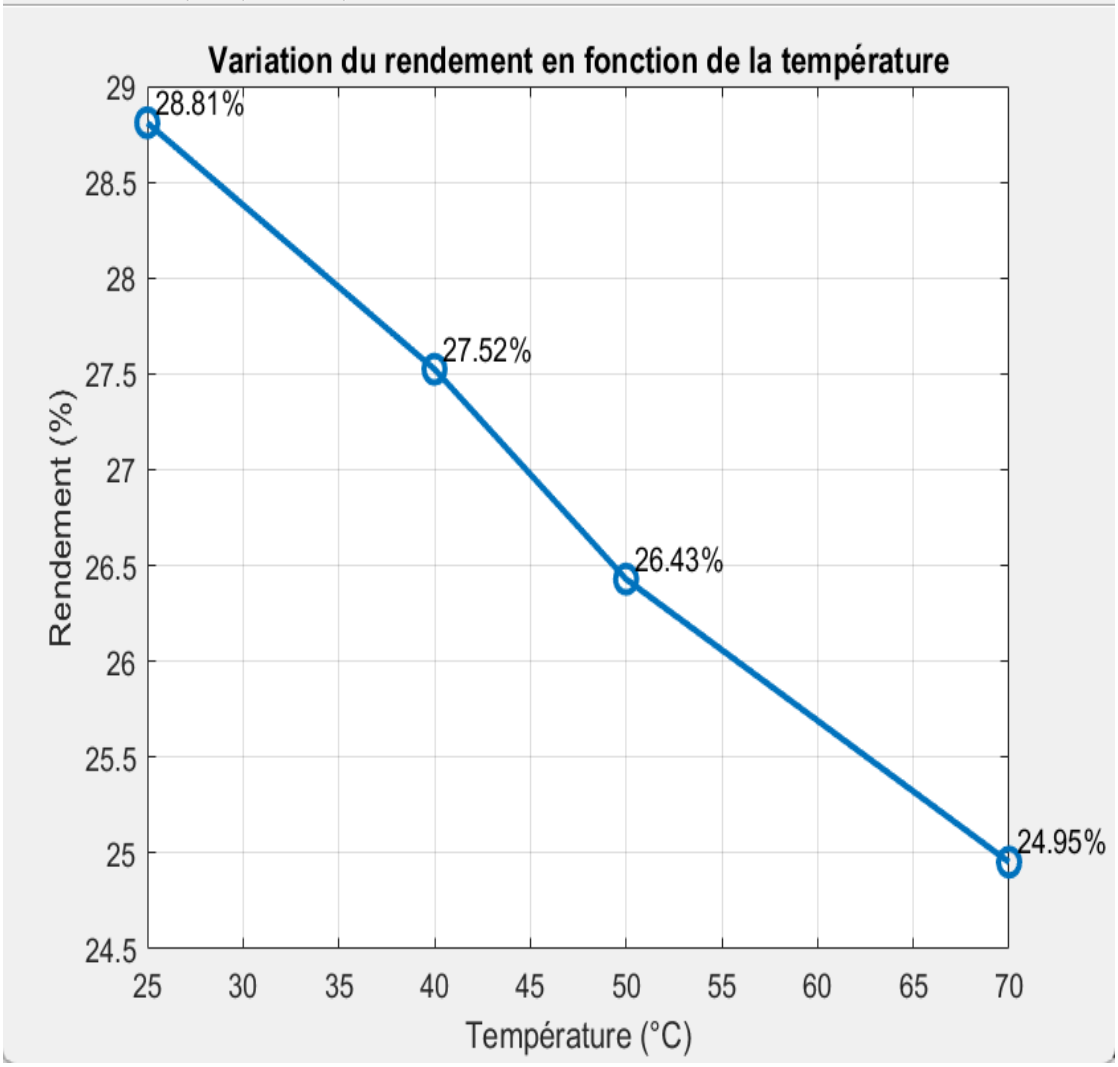


Figure III.10 : Variation du rendement du panneau tandem pérovskite/silicium en fonction de la température.

- **Interprétations des résultats**

La figure présente l'influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V d'un panneau photovoltaïque tandem pérovskite/silicium, pour une irradiance constante. On remarque que lorsque la température augmente de 25 °C à 70 °C, la courbe I-V se déplace progressivement vers la gauche. Cela signifie que la tension en circuit ouvert Voc diminue avec l'augmentation de la température. Cette diminution est clairement visible au niveau de la zone de coude de la courbe, où la chute du courant apparaît à des tensions plus faibles lorsque la température devient plus élevée.

Concernant le courant, la valeur du courant de court-circuit Isc reste presque constante, avec une légère variation. Cela montre que l'effet de la température sur le courant est faible comparé

à son effet sur la tension. Ce comportement est cohérent avec le fonctionnement des cellules photovoltaïques, car l'augmentation de la température influence principalement la tension de sortie du module

La courbe P-V confirme cette observation. Lorsque la température augmente, le point de puissance maximale Pmax diminue et se déplace vers des tensions plus faibles. À 25 °C, le panneau fournit la puissance maximale la plus élevée, 600 W. En revanche, à des températures plus élevées comme 50 °C et 70 °C, la puissance maximale diminue progressivement. Cette réduction est due principalement à la baisse de la tension de fonctionnement optimale du module.

D'un point de vue énergétique, ces résultats montrent que le panneau tandem présente de meilleures performances à basse température. L'augmentation de la température provoque une perte de puissance, même si l'irradiance reste constante. Ainsi, pour une installation photovoltaïque réelle, l'échauffement du module peut réduire le rendement global du système, surtout dans les régions chaudes. Il est donc important de prendre en compte l'effet thermique lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

Mais de façon générale c'est une faible variation des performances électriques avec l'augmentation de la température.

La figure montre que le rendement du panneau tandem diminue progressivement lorsque la température augmente. À **25 °C**, le rendement est maximal avec une valeur d'environ **28,81 %.** Lorsque la température atteint **70 °C**, le rendement baisse jusqu'à **24,95 %.**

Cette diminution de la puissance produite s'explique principalement par l'influence négative de la température sur les performances électriques du panneau photovoltaïque. En effet, lorsque la température des cellules augmente, la tension de sortie du panneau diminue de manière significative, tandis que le courant n'augmente que très légèrement. Cette baisse de tension est généralement plus importante que la faible augmentation du courant, ce qui conduit à une réduction progressive de la puissance maximale délivrée par le module photovoltaïque. Par conséquent, même lorsque l'irradiance solaire reste constante et que le panneau reçoit la même quantité d'énergie solaire, l'élévation de la température provoque une dégradation de son rendement énergétique. Ce phénomène est dû aux propriétés physiques des matériaux semi-conducteurs constituant les cellules photovoltaïques, dont les caractéristiques électriques sont fortement dépendantes de la température. Ainsi, les températures élevées constituent l'un des

principaux facteurs limitant les performances et la production d'énergie des installations photovoltaïques.

III.4. Simulation de panneau silicium

III.4.1. Simulation avec PVarray

Afin d'effectuer une étude comparative avec le panneau tandem pérovskite/silicium, on fait une simulation avec un panneau photovoltaïque au silicium de même puissance maximale, égale à 605 Wc. Un rendement de 22 %

Paramètre	Valeur
Modèle	LONGi LR7-72HTH-605M
Technologie	Monocristallin HPBC
P max	605 Wc
Rendement	22.4 %
Voc	52.27 V
Isc	14.74 A
Vmpp	44.03 V
Impp	13.75 A
Nombre de cellules	144 demi-cellules
Coefficient température Voc	−0.23 %/°C
Coefficient température Pmax	−0.28 %/°C
Coefficient température Isc	0.05 %/°C
Dimensions	2382 × 1134 × 30 mm

Tableau III.3 : Paramètres électriques du module photovoltaïque en silicium monocristallin LONGi LR7-72HTH-605M.

III.4.2. Résultats de simulation avec PVarray

Après la simulation on obtient les résultats suivants :

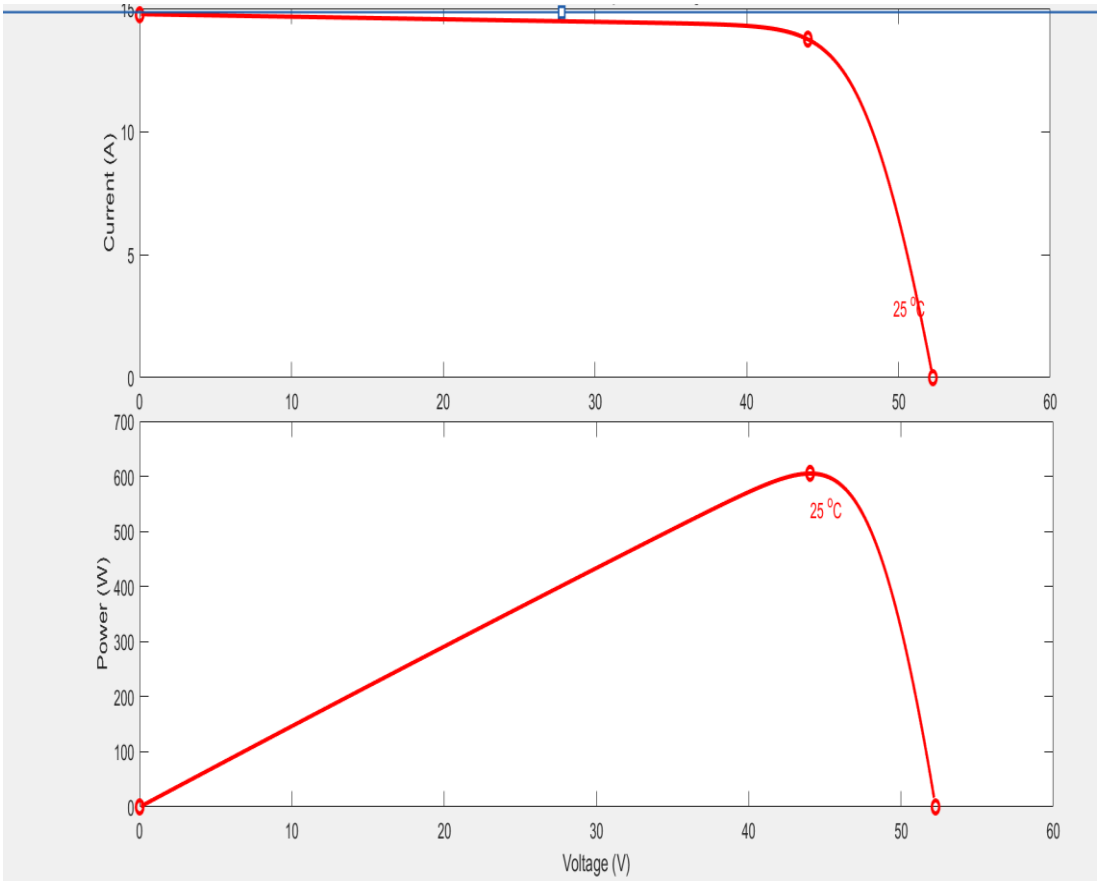


Figure III.111 : Caractéristiques I-V et P-V du module LONGi LR7-72HTH-605M simulées à 25 °C.

La figure présente les caractéristiques **I-V** et **P-V** du module photovoltaïque LONGi LR7-72HTH-605M simulées à la température standard de **25 °C**. La courbe I-V montre que le courant reste presque constant au début, avec une valeur proche du courant de court-circuit de **Isc ≈ 14,74 A**, puis il diminue rapidement lorsque la tension s'approche de la tension en circuit ouvert, tel que :

Voc ≈ 52,27 V.

La courbe P-V montre que la puissance augmente progressivement avec la tension jusqu'à atteindre un maximum d'environ **605 W** au point de puissance maximale, correspondant à **Vmpp ≈ 44,03 V** et **Impp ≈ 13,75 A**. Après ce point, la puissance chute rapidement jusqu'à devenir nulle lorsque la tension atteint Voc. Ces résultats confirment le comportement normal d'un module photovoltaïque sous les conditions standards de test.

III.4.3. L'effet d'irradiance et température sur Voc , Isc , Pmax et le rendement

III.4.3.1. L'effet d'irradiance

L'influence de l'irradiance sur les caractéristiques I-V, P-V et le rendement du module a été étudiée par simulation pour différentes valeurs d'irradiance.

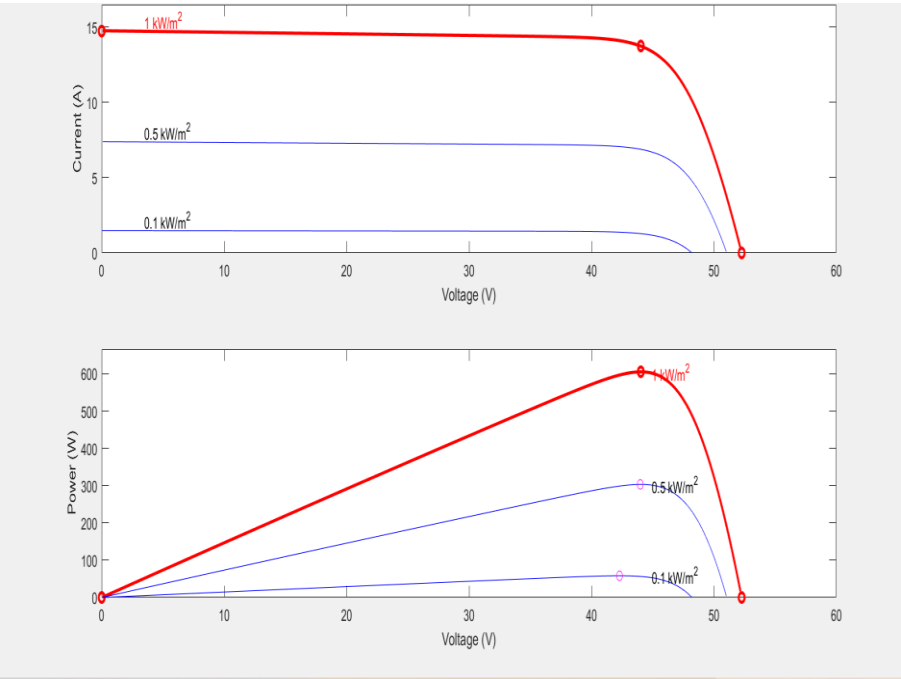


Figure III.112 : Influence de l'irradiance sur les caractéristiques I-V et P-V du module silicium LONGi.

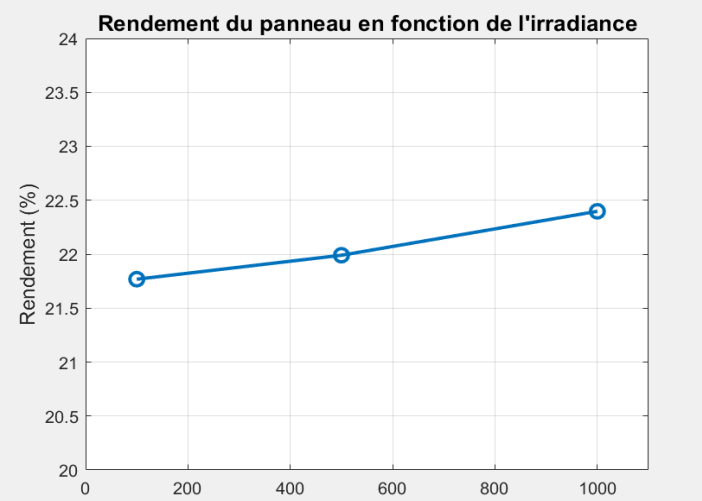


Figure III.113 : Variation du rendement du module silicium LONGi en fonction de l'irradiance.

- **Interprétations des résultats**

Les résultats montrent que l'irradiance a un effet important sur les performances du panneau photovoltaïque. Lorsque l'irradiance diminue de **1000 W/m²** à **500 W/m²**, puis à **100 W/m²**, le courant généré par le panneau diminue fortement. Cette diminution du courant provoque directement une baisse importante de la puissance maximale produite, comme on le remarque sur les courbes I-V et P-V.

À **1000 W/m²**, le panneau atteint une puissance maximale proche de **605 W**, alors qu'à faible irradiance, la puissance devient beaucoup plus faible. Cela montre que la production électrique du panneau dépend fortement de la quantité de lumière reçue.

Concernant le rendement, il varie seulement d'environ **21,8 %** à **22,4 %.** Cette variation reste faible par rapport à la chute de puissance, mais elle montre quand même que la diminution de l'irradiance réduit légèrement l'efficacité du panneau. Donc, l'effet principal de la baisse d'irradiance est surtout la diminution du courant et de la puissance produite.

Ainsi, même si le rendement reste proche de la valeur nominale, la production réelle du panneau devient beaucoup plus faible lorsque l'ensoleillement diminue.

III.4.3.2. L'effet de la température

Après avoir étudié l'effet de l'irradiance solaire sur les performances du panneau photovoltaïque, il est également nécessaire d'analyser l'influence de la température. En effet, la température de fonctionnement du module peut varier fortement selon les conditions climatiques, surtout pendant les périodes de fort ensoleillement. Cette variation peut modifier les caractéristiques électriques du panneau, notamment la tension, le courant et la puissance maximale produite.

Dans cette partie, une simulation est réalisée afin d'observer le comportement du module photovoltaïque pour différentes valeurs de température, tout en gardant l'irradiance constante. Cette étude permet de mieux comprendre l'impact de l'échauffement sur les performances du panneau [27].

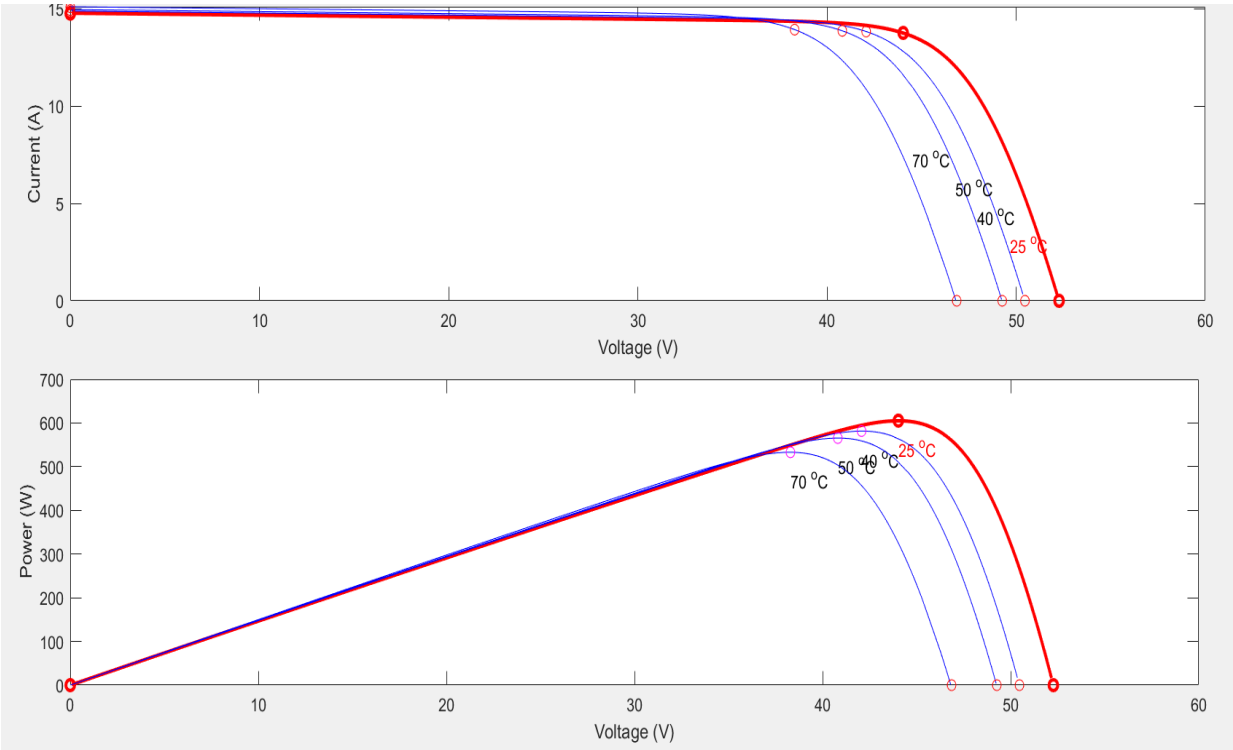


Figure III.114 : Influence de la température sur les caractéristiques I-V et P-V du module silicium LONGi.

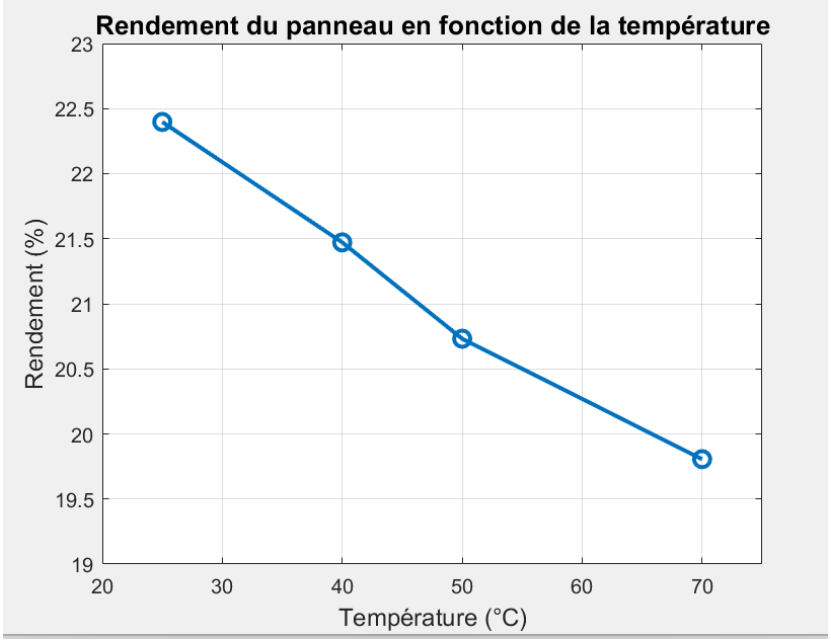


Figure III.115 : Variation du rendement du module silicium LONGi en fonction de la température.

- **Interprétations des résultats**

Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de la température a une influence négative importante sur les performances du panneau photovoltaïque. Lorsque la température passe de **25 °C** à **70 °C**, les courbes I-V se déplacent vers la gauche, ce qui signifie que la tension de sortie du module diminue clairement. Le courant reste presque constant, avec une légère variation, mais la diminution de la tension domine le comportement global du panneau.

Cette baisse de tension se répercute directement sur la courbe P-V. On remarque que le point de puissance maximale diminue lorsque la température augmente. À **25 °C**, le panneau atteint une puissance maximale proche de **605 W**, alors qu'à **70 °C**, cette puissance baisse jusqu'à environ **535 W**. Cela montre que l'échauffement du panneau réduit fortement sa capacité à produire de l'énergie électrique.

Le rendement suit la même tendance. Il diminue d'environ **22,4 %** à **19,8 %** lorsque la température augmente de **25 °C** à **70 °C**. Cette diminution confirme que la température a un effet significatif sur l'efficacité du module. Ainsi, même si le panneau fonctionne toujours à haute température, ses performances deviennent moins bonnes, principalement à cause de la chute de la tension et de la puissance maximale.

III.5. Interprétations des résultats et comparaison entre tandem et silicium

III.5.1. Interprétations des résultats

Après avoir étudié séparément le comportement du panneau tandem pérovskite/silicium et celui du panneau photovoltaïque en silicium monocristallin, il apparaît nécessaire de réaliser une analyse comparative entre ces deux technologies afin d'évaluer leurs performances dans des conditions de fonctionnement identiques. Cette comparaison permet de mettre en évidence les différences de comportement électrique et énergétique de chaque panneau face aux variations des paramètres climatiques. L'étude porte principalement sur l'influence de l'irradiance solaire et de la température, deux facteurs déterminants pour le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. L'objectif est d'examiner l'évolution du rendement énergétique et de la puissance maximale produite par chaque technologie, afin de mieux apprécier leurs performances respectives et d'identifier les avantages que peut offrir le panneau tandem pérovskite/silicium par rapport au panneau en silicium monocristallin.

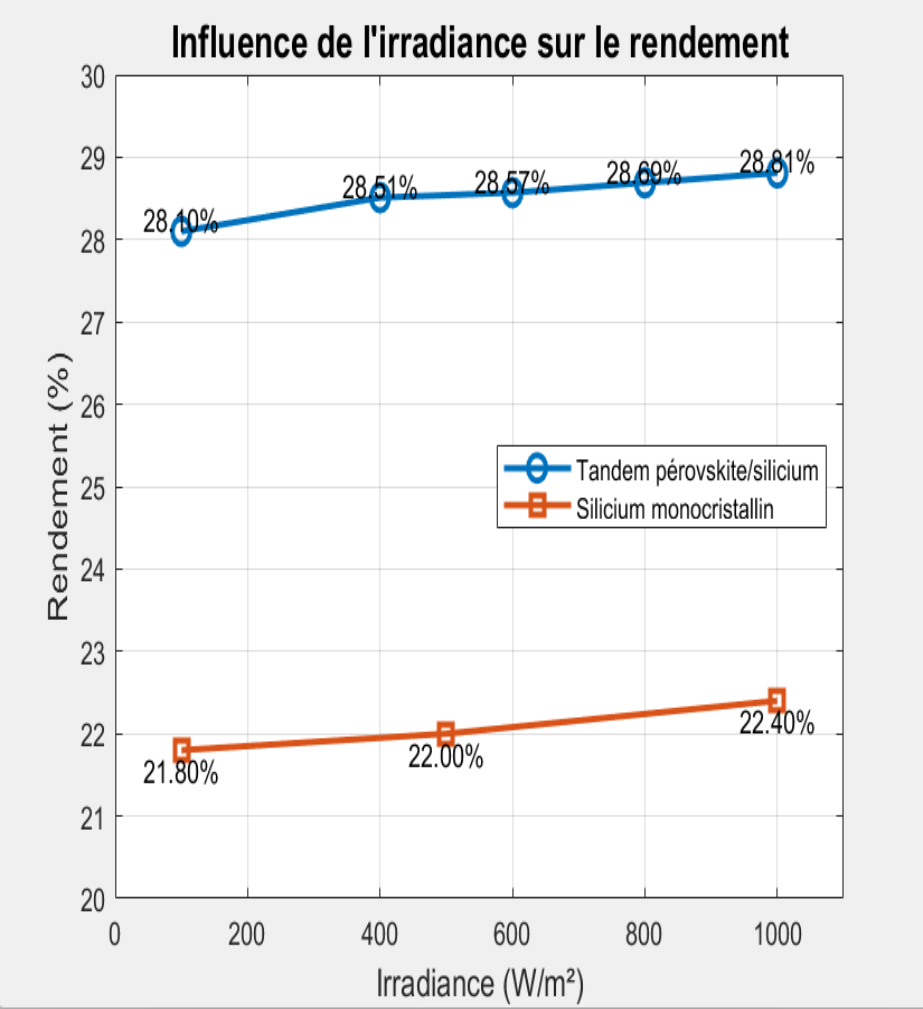


Figure III.16 : Comparaison du rendement des modules tandem pérovskite/silicium et silicium en fonction de l'irradiance.

Les résultats obtenus montrent que le panneau tandem pérovskite/silicium présente un rendement plus élevé que le panneau en silicium monocristallin pour toutes les valeurs d'irradiance étudiées. Le rendement du tandem reste dans une plage élevée, allant d'environ **28,10 %** à **28,81 %,** tandis que celui du silicium varie entre **21,80 %** et **22,40 %.**

Lorsque l'irradiance augmente, les deux panneaux montrent une légère amélioration du rendement. Cependant, le panneau tandem conserve un avantage clair par rapport au silicium, avec un écart d'environ **6 %** à **7 %**. Cette différence peut être expliquée par la structure tandem, qui combine deux matériaux absorbants et permet une meilleure utilisation du spectre solaire.

Ainsi, dans les conditions de simulation étudiées, le panneau tandem offre une meilleure conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Le panneau en silicium reste performant et stable, mais son rendement demeure inférieur à celui du tandem.

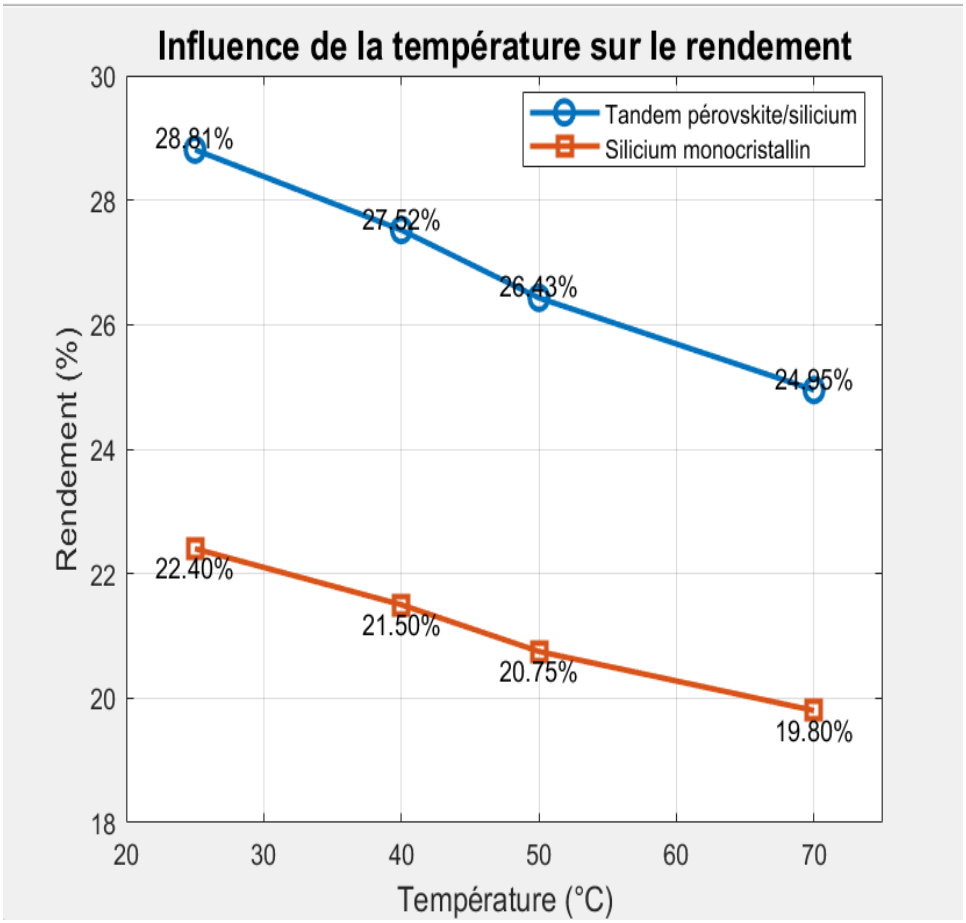


Figure III.17 : Comparaison du rendement des modules tandem pérovskite/silicium et silicium en fonction de température.

En comparant les deux courbes, on remarque que l'augmentation de la température réduit le rendement des deux panneaux. Le panneau tandem passe de **28,81 %** à **24,95 %,** tandis que le panneau en silicium diminue de **22,40 %** à **19,80 %** lorsque la température augmente de **25 °C** à **70 °C**.

La baisse est donc visible dans les deux cas, mais le panneau tandem garde toujours un rendement plus élevé que le silicium. Cela signifie que le tandem produit plus efficacement dans les conditions étudiées, même lorsqu'il est soumis à une température élevée.

III.5.2. Comparaison générale

De façon générale, le panneau tandem pérovskite/silicium présente de meilleures performances que le panneau en silicium monocristallin. Cette différence s'explique par sa structure à deux matériaux absorbants, qui lui permet d'exploiter une plus grande partie du spectre solaire. Grâce à cette architecture, le tandem transforme plus efficacement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Le panneau en silicium monocristallin reste une technologie fiable, stable et très utilisée dans les installations photovoltaïques. Cependant, ses performances sont plus limitées par rapport au tandem, surtout en matière de rendement. Le tandem apparaît donc comme une technologie plus avancée et plus prometteuse pour améliorer la production d'énergie solaire.

Sous l'effet de l'irradiance, les deux panneaux réagissent de manière normale : la production augmente lorsque l'ensoleillement augmente. Toutefois, le panneau tandem garde un meilleur niveau de rendement. Sous l'effet de la température, les deux technologies subissent une baisse de performance, mais le tandem conserve globalement un avantage énergétique.

Ainsi, dans les conditions étudiées, le panneau tandem pérovskite/silicium montre un comportement plus performant que le panneau en silicium monocristallin. Il représente donc une solution intéressante pour les applications photovoltaïques futures, tout en nécessitant encore des améliorations concernant la stabilité, le coût et l'industrialisation.

III.6. Simulation du système photovoltaïque autonome avec batteries pour l'alimentation d'éclairage

La simulation présentée illustre un système photovoltaïque autonome destiné à assurer l'alimentation d'une charge d'éclairage en courant continu. Le modèle est composé d'un champ photovoltaïque, d'un convertisseur DC-DC commandé par une stratégie MPPT, d'une batterie de stockage et d'une charge d'éclairage en courant continu.

Durant la période d'ensoleillement, le champ photovoltaïque produit une énergie électrique continue à partir de l'irradiance solaire et de la température imposée. Cette énergie est ensuite optimisée par la commande MPPT afin d'extraire la puissance maximale disponible et est utilisée principalement pour recharger la batterie de stockage. La batterie constitue ainsi l'élément principal de stockage du système et permet de conserver l'énergie produite pendant la journée.

La batterie alimente la charge d'éclairage durant la nuit grâce à l'énergie photovoltaïque stockée pendant la journée, assurant ainsi une alimentation autonome.

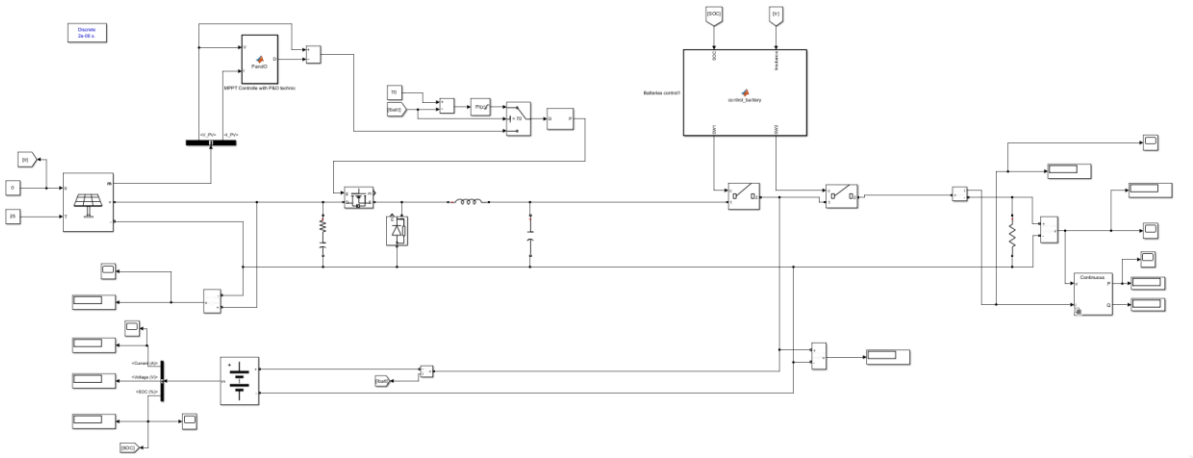


Figure III.18 : Schéma de simulation du système photovoltaïque autonome avec batterie et onduleur pour l'alimentation de charge DC.

III.6.1. Étapes de simulation du champ photovoltaïque autonome

III.6.1.1. Modélisation du champ photovoltaïque

Le champ photovoltaïque constitue la source principale d'énergie du système étudié. Il permet de convertir l'énergie solaire reçue en énergie électrique sous forme continue. Dans cette simulation, le champ PV est soumis principalement aux conditions d'ensoleillement et de température, permettant ainsi de représenter le comportement du système photovoltaïque dans différentes conditions de fonctionnement.

Afin d'adapter la simulation aux conditions du site étudié, les paramètres d'entrée du champ photovoltaïque ont été définis à l'aide de blocs de type « Constant », notamment pour l'irradiance solaire. Cette approche permet de fixer une condition d'ensoleillement représentative et d'analyser le comportement du système dans des conditions correspondant au fonctionnement réel de l'installation.

Dans le cadre de cette étude, une irradiance de **200 W/m²** a été retenue comme condition de référence. Cette valeur correspond à une condition d'ensoleillement pouvant être rencontrée sur le site étudié et permet ainsi d'évaluer le comportement du système photovoltaïque dans une situation de faible ensoleillement. Le choix de cette valeur permet de conserver une condition de fonctionnement représentative de la réalité du site tout en facilitant l'analyse des performances globales du système.

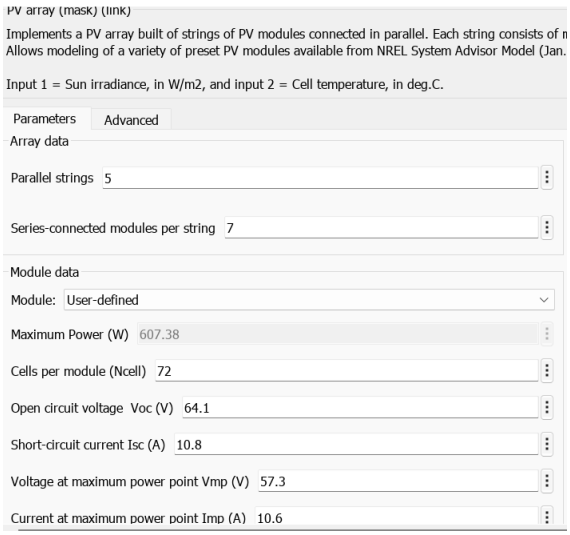


Figure III.19 : Configuration du champ photovoltaïque dans le bloc PV Array.

Les courbes suivantes représentent les caractéristiques **I-V** et **P-V** du champ photovoltaïque complet. Elles permettent de visualiser le comportement électrique du PV Array et de déterminer la puissance maximale fournie par le champ dans les conditions de simulation choisies.

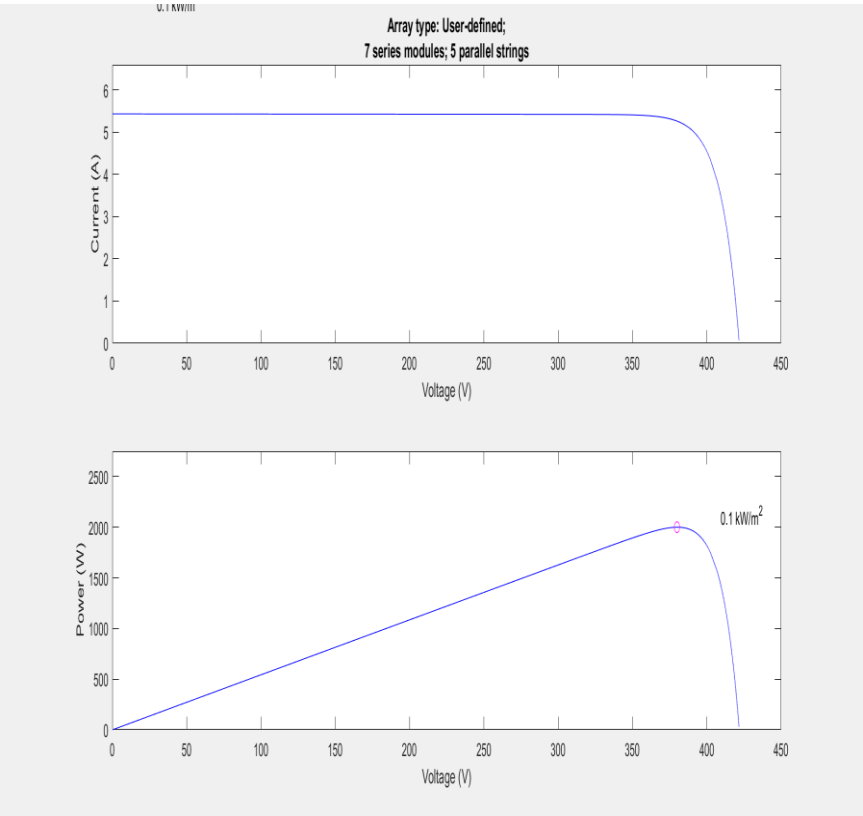


Figure III.20 : Caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque complet.

III.6.1.2. Mesure de la tension et du courant du champ PV

La tension et le courant produits par le champ photovoltaïque sont mesurés à l'aide de capteurs. Ces mesures permettent de calculer la puissance instantanée fournie par le champ PV.

Cette étape est nécessaire, car les grandeurs P-V et I sont utilisées par la commande MPPT afin de déterminer le point de fonctionnement optimal du champ photovoltaïque.

III.6.1.3. Commande MPPT et méthode de « switch »

La commande MPPT, pour **Maximum Power Point Tracking**, permet de rechercher le point de puissance maximale du champ photovoltaïque. En effet, la puissance produite par les panneaux varie en fonction de l'irradiance et de la température.

Dans cette simulation, la commande MPPT agit sur le convertisseur DC-DC afin d'adapter le point de fonctionnement du champ PV. Elle permet donc d'extraire le maximum d'énergie disponible et d'améliorer le rendement global du système.

Les grandeurs principales utilisées sont : la puissance P , le courant I ,la tension V et le rapport cyclique de commande du convertisseur D .

```
function D = PandO(V,I)

%MPPT Contoller based on the Perturb & Observe algorithme
%D output=Reference for DC link voltage (Vdr_ref)
%Enabled input=1 to enable the MPPT controller
%V input= PV array terminal voltage (V)
%I input= PV array current (A)
%Param input :
Dinit=400; %initial value of Vdc_ref
Dmax=430; %Maximum value of Vdc_ref
Dmin=350; %Minimun value of Vdc_ref
deltaD=2; %Incrememnt value used to increase/decrease Vdc_ref

persistent Vold Pold Dold;
dataType='double';
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P=V*I;
dV=V - Vold;
dP=P - Pold;

if dP ~= 0
    if dP<0
        if dV<0
            D=Dold+deltaD;
        else
            D=Dold-deltaD;
        end
    else
        if dV<0
            D=Dold-deltaD;
        else
            D=Dold+deltaD;
        end
    end
    else D=Dold;
end

if D>=Dmax | D<= Dmin
    D=Dold;
end
Dold=D;
Vold=V;
Pold=P;
```

Figure III.21 : Algorithme MPPT basé sur la méthode Perturb and Observe.

Cet algorithme MPPT basé sur la méthode **Perturb and Observe** permet d'optimiser le fonctionnement du champ photovoltaïque. Il mesure la tension et le courant du PV, calcule la puissance, puis compare les valeurs actuelles avec les valeurs précédentes. Selon l'évolution de la puissance, il ajuste la commande du convertisseur DC-DC afin de maintenir le champ PV proche du point de puissance maximale.

Afin de limiter le courant de fonctionnement et de protéger les différents composants du système, une méthode de commutation (Switch) a également été intégrée à la commande. Lorsque le courant du champ PV reste inférieur à 70 A, le système fonctionne en mode MPPT basé sur la méthode P&O, permettant d'extraire la puissance maximale disponible. En revanche, lorsque le courant dépasse la valeur limite de 70 A, notamment dans des conditions de fort ensoleillement, la commande désactive temporairement le MPPT et active un régulateur de courant PI dont la consigne est fixée à 70 A. Le régulateur agit alors sur la commande du convertisseur afin de maintenir le courant autour de cette valeur limite. Dans ce mode, le champ photovoltaïque peut fonctionner en dehors de son point de puissance maximale, car la priorité est donnée à la limitation du courant et à la protection du système.

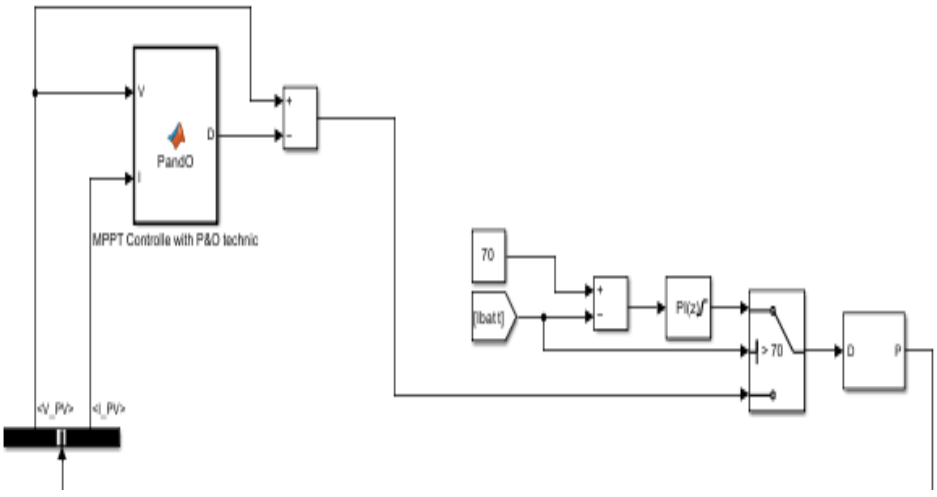


Figure III.22 : Stratégie de commande MPPT avec limitation du courant.

III.6.1.4. Convertisseur DC-DC

Le convertisseur DC-DC assure l'adaptation de la tension continue produite par le champ photovoltaïque. La tension fournie par les panneaux n'est pas toujours directement adaptée au bus continu à la batterie.

Pour cette raison, le convertisseur permet de contrôler le transfert de puissance entre le champ PV, la batterie et le bus DC. Il est commandé par le signal issu de l'algorithme MPPT.

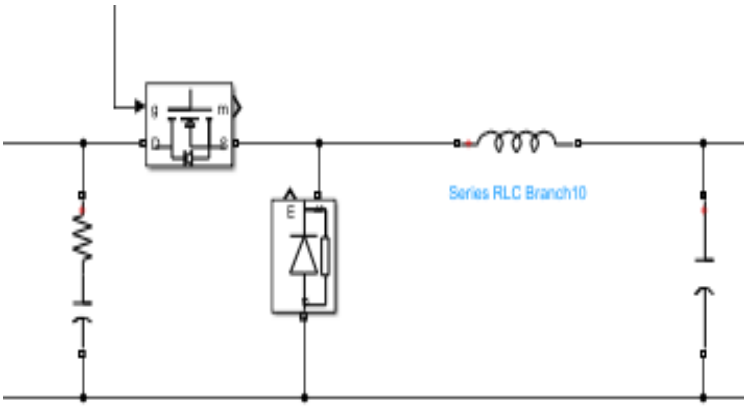


Figure III.23 : Structure du convertisseur DC-DC Buck utilisé dans le système photovoltaïque autonome.

Le convertisseur DC-DC utilisé dans cette simulation est un convertisseur abaisseur de tension de type **Buck**. Il est constitué principalement d'un interrupteur électronique commandé de type **MOSFET**, d'une **diode de roue libre**, d'une **inductance** et d'un **condensateur de sortie**. Le MOSFET assure la commutation, tandis que la diode permet la continuité du courant pendant les phases de blocage. L'inductance et le condensateur forment l'étage de filtrage du convertisseur, permettant d'obtenir une tension continue plus stable à la sortie.

Dans cette simulation, le MOSFET possède une résistance à l'état passant de **0,1 Ω**. La diode de roue libre est caractérisée par une résistance de **0,001 Ω** et une tension directe de **0,8 V**. L'inductance utilisée est de **0,783 mH**, tandis que la capacité de sortie est de **364 µF**. Ces éléments constituent ensemble le convertisseur Buck utilisé pour l'adaptation de la tension continue dans le système photovoltaïque autonome.

III.6.1.5. Batteries de stockage

La batterie Lithium-Ion utilisée dans cette simulation assure le stockage de l'énergie produite par le champ photovoltaïque et l'alimentation de la charge durant la nuit. Elle possède une tension nominale de 48 V, une capacité de 450 Ah et un SOC initial de 20 %. Lors de la phase de charge, le courant total fourni aux batteries est limité à 70 A par la stratégie de commande par commutation présentée précédemment. Ce courant est réparti entre les différentes batteries en parallèle, de sorte que chaque batterie absorbe un courant d'environ 7,77 A. Cette valeur correspond à un courant de charge modéré et raisonnable pour une batterie de cette capacité, permettant de respecter les conditions de charge tout en limitant les contraintes électriques sur les batteries. Ainsi, la limitation à 70 A constitue également une mesure de protection du

système de stockage, en évitant l'application d'un courant de charge excessif. Les effets de la température et du vieillissement ne sont pas pris en compte afin de simplifier l'étude et de se concentrer sur le comportement énergétique du système photovoltaïque autonome.

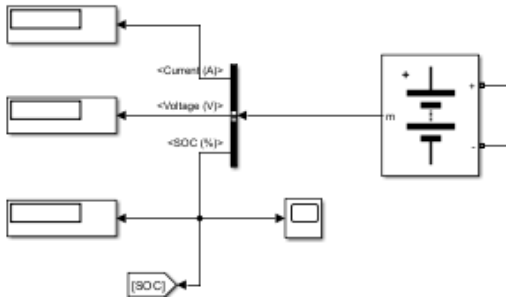


Figure III.24 : Modèle de la batterie de stockage utilisé dans la simulation.

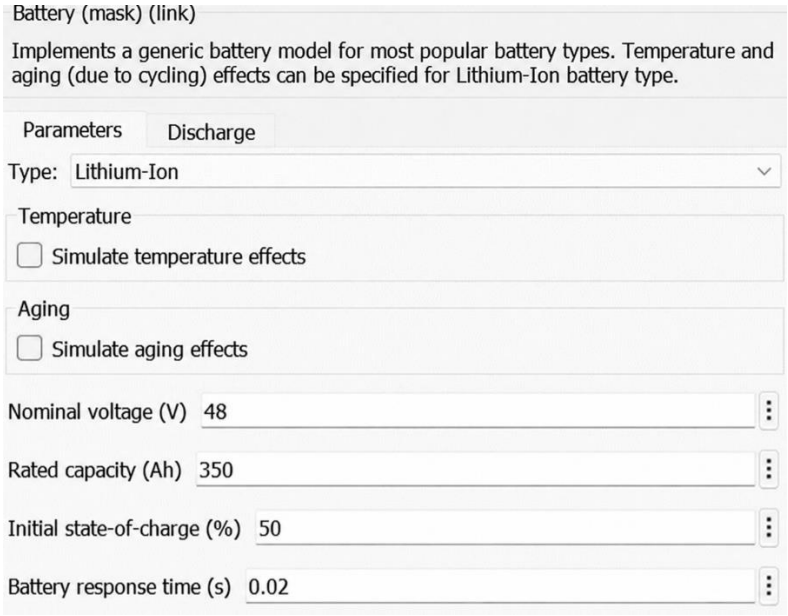


Figure III.25 : Paramètres de la batterie Lithium-Ion utilisée dans la simulation.

III.6.1.6. Bus continu DC

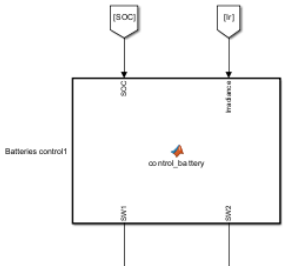
Le bus continu représente le point de liaison entre le champ photovoltaïque, le convertisseur DC-DC,la batterieet la charge DC. Il permet de regrouper l'énergie produite et stockée afin d'alimenter les charge DC dans la nuit

La stabilité de la tension du bus DC est importante pour garantir le bon fonctionnement.

III.6.1.7. Commande de gestion de la batterie

Une fonction MATLAB a été intégrée afin d'assurer la gestion automatique de la batterie en fonction de l'irradiance solaire et de son état de charge (SOC). Lorsque l'irradiance est supérieure à 10 W/m², le système identifie la période diurne et autorise la charge de la batterie,

tant que son SOC reste inférieur à 100 %. Pendant la nuit, lorsque l'irradiance devient inférieure à ce seuil, la charge est déconnectée et la batterie alimente les LED si son SOC est supérieur à 20 %. Cette stratégie permet ainsi d'assurer la gestion de la charge et de la décharge tout en protégeant la batterie contre la surcharge et la décharge excessive.



Figuer III.26 : Commande de gestion de la batterie.

```
function [SW1, SW2] = control_battery(SOC, Irradiance)
    % Entrées :
    % SOC        : État de charge de la batterie (en pourcentage, de 0 à 100)
    % Irradiance : Rayonnement solaire (en W/m2)
    %
    % Sorties :
    % SW1 : Commande de l'interrupteur Panneaux -> Batterie (1 = Fermé, 0 = Ouvert)
    % SW2 : Commande de l'interrupteur Batterie -> LED (1 = Fermé, 0 = Ouvert)

    % --- Paramètres de configuration ---
    SOC_max = 100;     % Arrêt de la charge quand la batterie est pleine (%)
    SOC_min = 20;      % Arrêt de la décharge pour protéger la batterie (%)
    Seuil_Jour = 10;   % Seuil d'irradiance pour détecter le jour (W/m2)

    % --- Initialisation des interrupteurs ---
    SW1 = 0;
    SW2 = 0;

    % --- Logique de Contrôle ---

    if Irradiance > Seuil_Jour
        % CONDITION 1 : C'EST LE JOUR
        SW2 = 0; % On s'assure que les LEDs sont éteintes

        if SOC < SOC_max
            SW1 = 1; % La batterie n'est pas pleine : on ferme SW1 pour charger
        else
            SW1 = 0; % La batterie est à 100% : on ouvre SW1 pour éviter la surchar
        end

    else
        % CONDITION 2 : C'EST LA NUIT
        SW1 = 0; % Pas de soleil : on ouvre SW1 pour déconnecter les panneaux

        if SOC > SOC_min
            SW2 = 1; % Il reste de l'énergie : on ferme SW2 pour allumer les LEDs
        else
            SW2 = 0; % La batterie est trop faible : on ouvre SW2 pour la protéger
        end
    end
end
```

Figure III.27 : Algorithme de gestion de la charge et de la décharge de la batterie.

III.6.1.8. La charge DC (LED)

La charge utilisée dans la simulation représente un ensemble de LED modélisé par une charge résistive, alimentée sous une tension nominale de 48 V et consommant une puissance de 1,6 kW.

Des blocs display et Scope sont également utilisés afin de visualiser les différentes grandeurs électriques du système, notamment la tension, le courant, la puissance et l'état de charge de la batterie, permettant ainsi d'analyser le comportement du système au cours de la simulation.

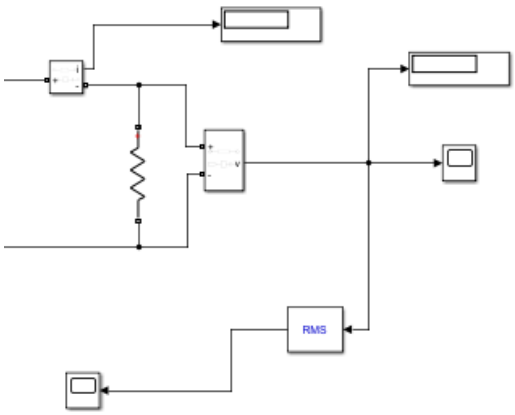


Figure III.28 : La charge DC (charge résistive).

III.6.2. Résultats de simulation

Le fonctionnement du système photovoltaïque autonome peut être étudié selon un cycle journalier composé de deux phases principales. La première phase correspond au fonctionnement pendant la journée, lorsque l'irradiance solaire est disponible. Dans ce cas, le champ photovoltaïque produit de l'énergie électrique, qui est utilisée pour charger la batterie à travers le convertisseur DC-DC commandé par MPPT. La deuxième phase correspond au fonctionnement pendant la nuit, lorsque la production photovoltaïque devient nulle ou très faible. Dans cette situation, la batterie se décharge afin d'alimenter la charge DC.

III.6.2.1. Fonctionnement pendant la journée

III.6.2.1.1. Fonctionnement du MPPT et la méthode Switch

Les résultats montrent que la tension mesurée à l'entrée du convertisseur Buck prend des valeurs différentes pour les différents niveaux d'irradiance étudiés. Cette variation s'explique par le comportement électrique du champ photovoltaïque, dont la tension de fonctionnement dépend à la fois de l'irradiance et du point de fonctionnement imposé par la commande. Lorsque l'irradiance varie, les caractéristiques courant-tension du champ PV se déplacent, ce qui entraîne une modification de la tension correspondant au point de fonctionnement retenu. Ainsi, les différentes valeurs de tension observées avant le Buck sont cohérentes avec les différentes conditions d'irradiance appliquées au champ photovoltaïque. Cette tension constitue ensuite la grandeur d'entrée du convertisseur Buck, qui l'adapte afin d'assurer les conditions nécessaires à la charge des batteries.

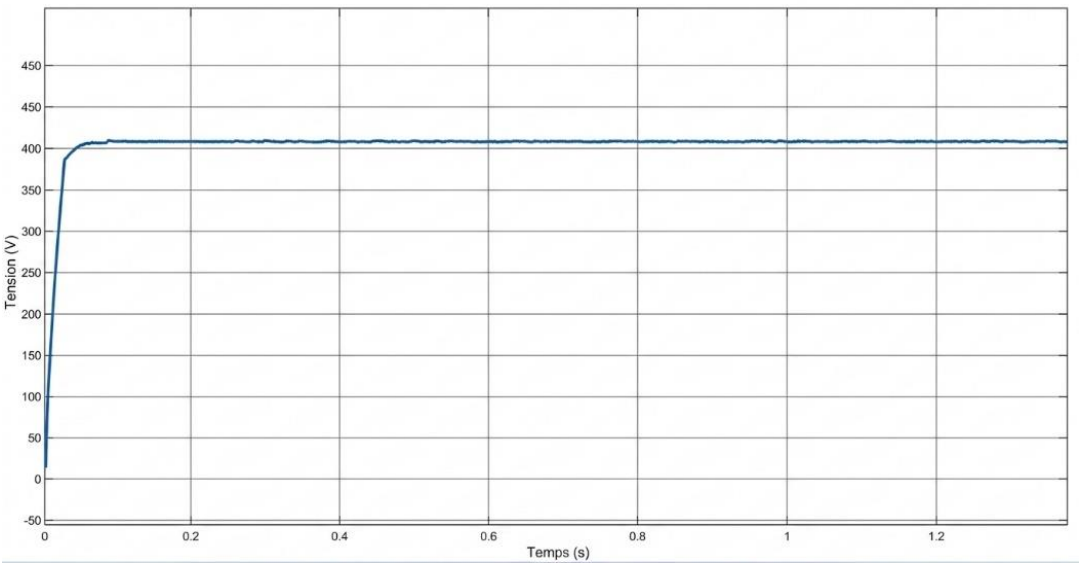


Figure III.29 : Tension du champ photovoltaïque avant le convertisseur Buck pour 200W/m^2.

La courbe suivant présente la tension obtenue à la sortie du convertisseur Buck, c'est-à-dire au niveau du bus continu. On remarque que cette tension est beaucoup plus faible que la tension fournie par le champ photovoltaïque avant le convertisseur. Elle se stabilise autour d'une valeur proche de la tension nominale de la batterie.

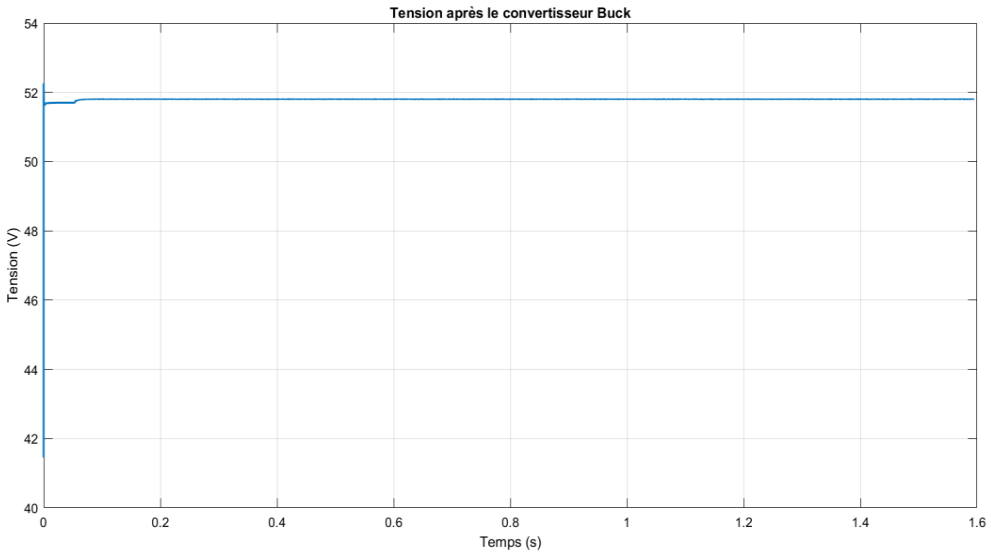


Figure III.30 : Tension après le convertisseur Buck au niveau du bus continu.

La courbe montre que le courant en sortie du Buck est maintenu autour de 70 A lorsque la puissance photovoltaïque disponible est suffisante. Cette régulation permet d'obtenir un courant de charge relativement stable malgré les variations de l'irradiance. Le comportement observé confirme ainsi le bon fonctionnement de la commande du convertisseur.

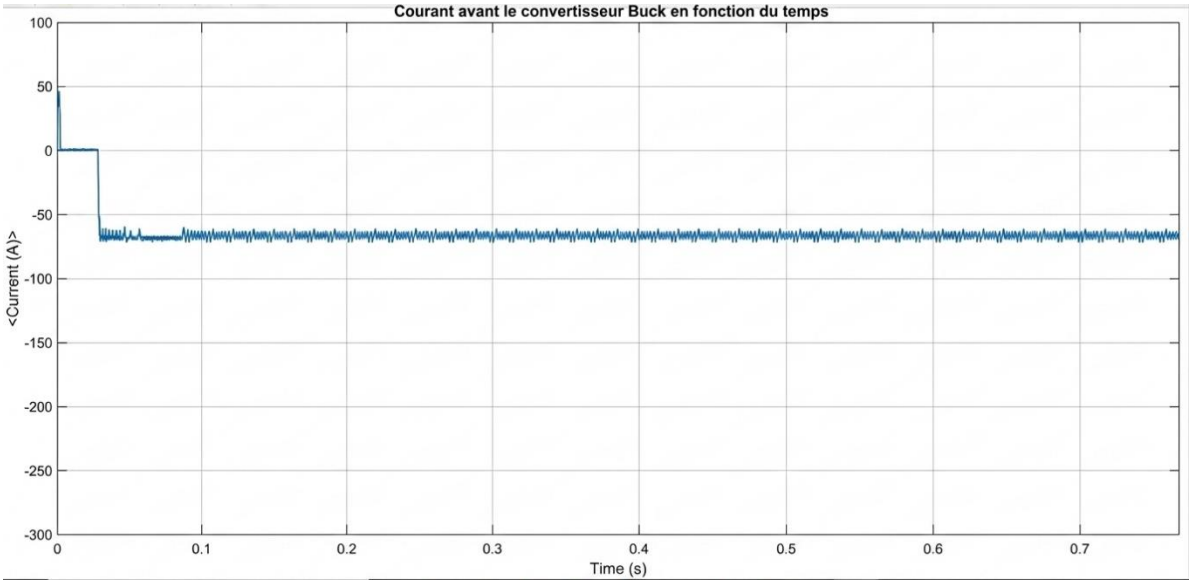


Figure III.31 : Le courant absorbé par les batteries en fonction de temps.

III.6.2.1.2. l'état de chargement de batteries

Lorsque la puissance produite par le champ photovoltaïque est suffisante, la batterie entre en phase de charge. Cette phase est caractérisée par une augmentation progressive de l'état de charge **SOC**. Le rôle de la batterie est donc de stocker l'énergie produite pendant les heures d'ensoleillement afin de la rendre disponible lorsque la production solaire diminue.

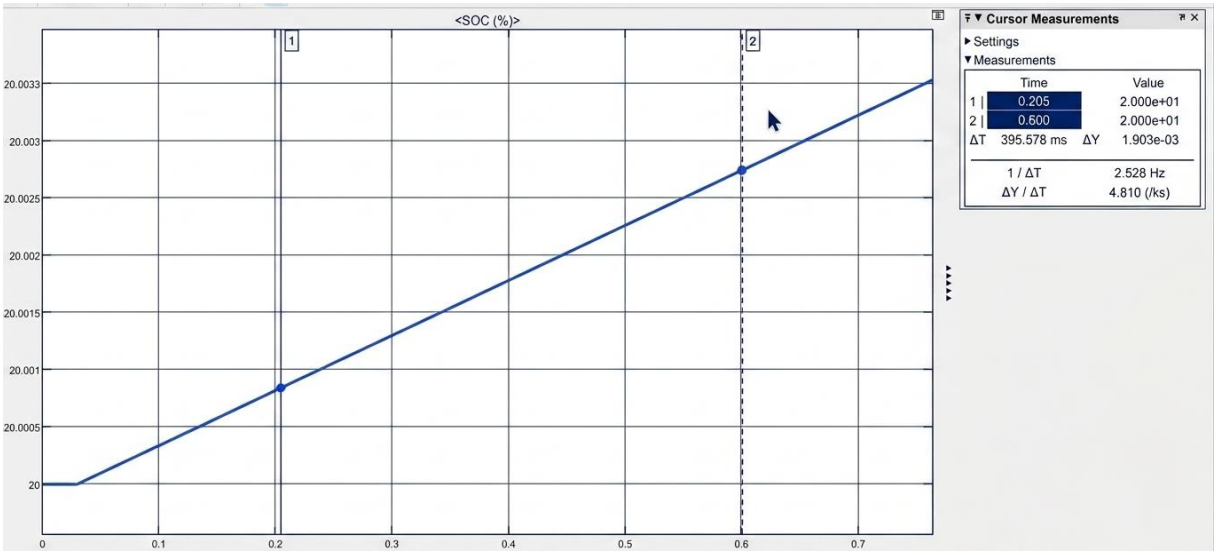


Figure III.32 : Évolution du SOC de la batterie pendant la phase de charge.

L'évolution du SOC montre que les batteries sont en phase de charge. Le SOC augmente progressivement à partir de sa valeur initiale, ce qui indique que l'énergie produite par le champ photovoltaïque est transférée vers les batteries. L'augmentation reste faible pendant la durée de simulation, car la capacité des batteries est élevée et le temps simulé est court.

Cela confirme néanmoins le fonctionnement correct de la phase de charge du système photovoltaïque autonome.

Afin de déterminer le temps nécessaire au chargement de la batterie, l'évolution du **SOC** montre une variation pratiquement linéaire pendant la phase de charge jusqu'à atteindre **100 %**. Cette évolution permet d'établir la relation suivante :

$$SOC(\%) = 4.81 \times 10^{-3} t \qquad \text{(III.4)}$$

D'après cette relation, pour une augmentation du SOC de 20 % à 100 %, le temps de charge obtenu est de 4,62 h, soit environ 4 h 37 min. Ce résultat permet ainsi d'estimer la durée nécessaire pour atteindre la pleine charge de la batterie dans les conditions de simulation.

III.6.2.2. Fonctionnement pendant la nuit

Pendant la nuit, l'irradiance solaire devient nulle ou très faible, ce qui signifie que le champ photovoltaïque ne produit plus d'énergie. Dans cette phase, la batterie devient la source principale du système. L'énergie stockée pendant la journée est fournie au bus continu via la charge DC.

III.6.2.2.1. Décharge de la batterie

La batterie fournit l'énergie stockée vers le bus continu. Cette phase est caractérisée par une diminution progressive de l'état de charge **SOC**, ce qui indique que la batterie est en train de se décharger pour alimenter le système.

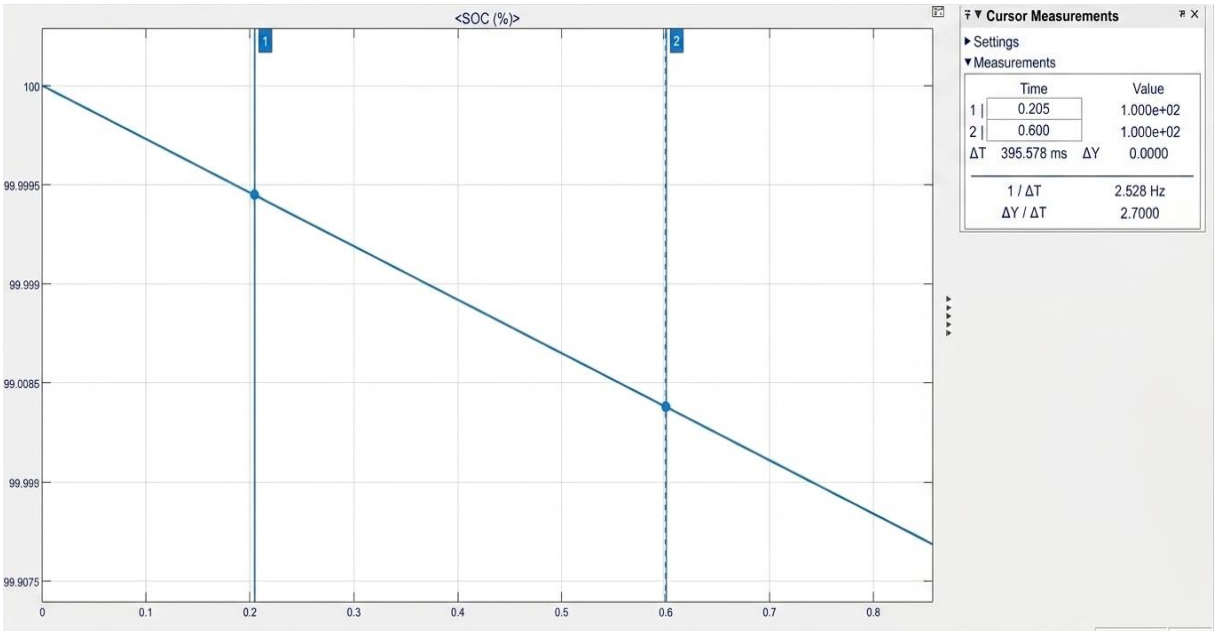


Figure III.33 : Évolution du SOC de la batterie pendant la phase de décharge.

D'après l'équation suivant, l'évolution du SOC permet également de déterminer le temps nécessaire à la décharge de la batterie.

$$SOC(\%) = 2.7 \times 10^{-3} t \qquad \text{(III.5)}$$

Ainsi, pour une diminution du SOC de 100 % à 20 %, le temps de décharge est obtenu directement à partir de cette relation avec une valeur de 8,23h qui est estimé à 8h et 14 min.

III.6.2.2.2. Alimentation de la charge LED

L'énergie fournie par la batterie est sous forme continue DC. La charge d'éclairage étant également alimentée en DC, l'énergie stockée dans la batterie est directement utilisée pour assurer son alimentation, sans nécessiter de conversion vers une autre forme de tension.

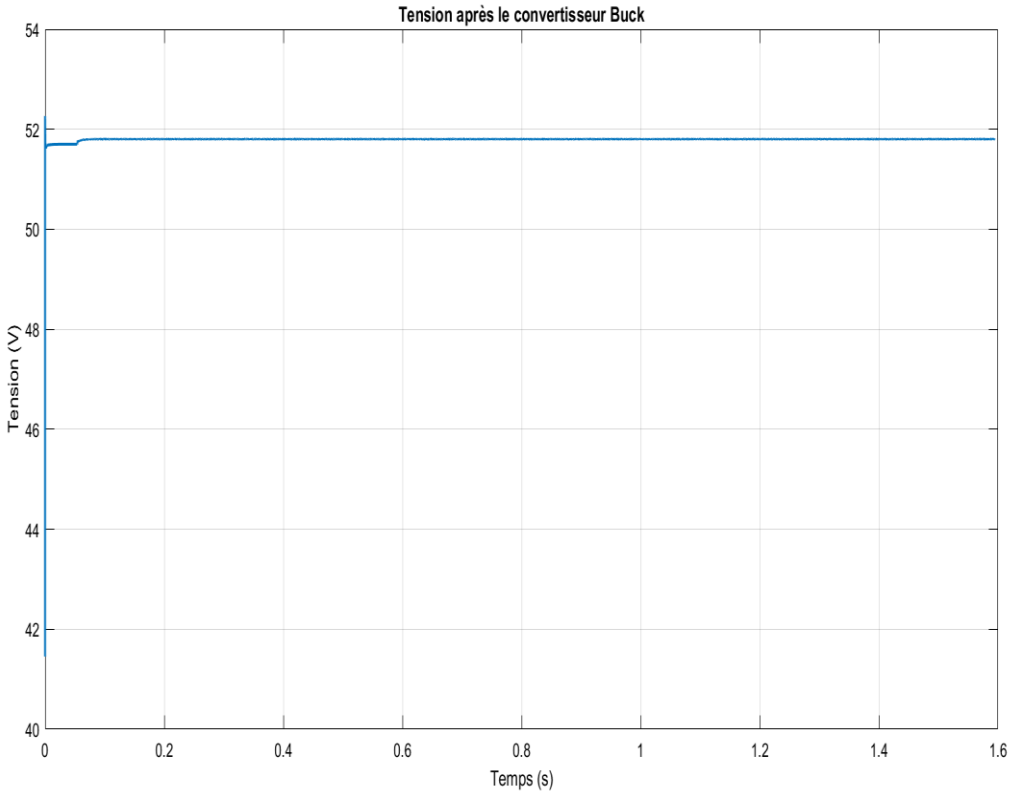


Figure III.34 : Tension continue aux bornes de la batterie et de la charge d'éclairage DC.

La courbe représente la tension continue disponible aux bornes de la batterie et de la charge DC. On remarque que cette tension reste pratiquement stable autour de 52 V, ce qui indique que la batterie fournit une alimentation régulière et stable à la charge d'éclairage.

Le courant absorbé par la charge d'éclairage correspond au courant fourni par les batteries durant la période d'alimentation. D'après les résultats de simulation, ce courant atteint une valeur d'environ **38,89 A** pour l'ensemble de la charge.

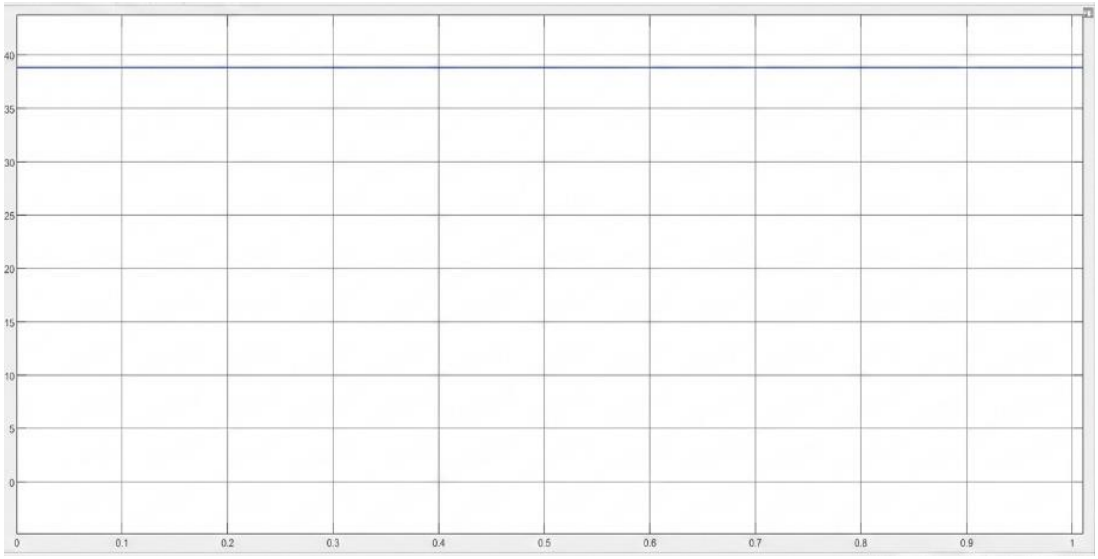


Figure III.35 : Courant absorbé par la charge DC.

La puissance absorbée par la charge est déterminée à partir de la tension et du courant mesurés, avec un courant d'environ 38,89 A et une tension d'environ 56 V, la puissance obtenue en simulation est de l'ordre de 2177 W. Bien sur notre charge est une charge résistive donc nous avons uniquement la puissance active. Cette valeur est supérieure à la puissance nominale de la charge réelle, fixée à 1563 W. Cet écart s'explique principalement par le fait que la charge est modélisée par une résistance idéale dans la simulation, avec une tension effectivement appliquée supérieure à sa tension nominale de 48 V. La puissance simulée dépend donc directement du point de fonctionnement électrique imposé à la charge et ne correspond pas exactement à sa consommation nominale réelle.

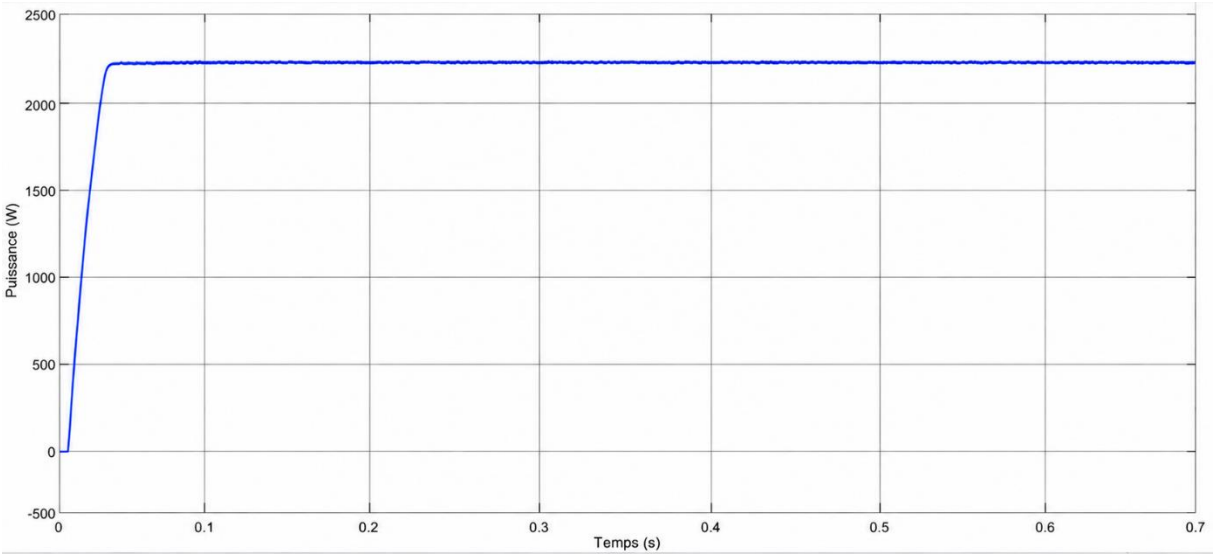


Figure III.36 : Puissance active absorbé par la charge DC.

III.6.3. interprétation des résultats

Les résultats obtenus permettent de confirmer le fonctionnement des différentes parties du système photovoltaïque autonome étudié. Le fonctionnement repose sur deux phases principales : une phase diurne durant laquelle l'énergie produite par le champ photovoltaïque est transférée vers les batteries, et une phase nocturne durant laquelle l'énergie préalablement stockée est utilisée pour alimenter la charge d'éclairage DC. Cette organisation permet d'exploiter l'énergie solaire produite pendant la journée pour assurer l'alimentation de la charge pendant l'absence de rayonnement solaire.

Les résultats montrent que la tension disponible à l'entrée du convertisseur Buck varie selon le niveau d'irradiance appliqué au champ photovoltaïque. Cette variation est liée au déplacement du point de fonctionnement du générateur PV lorsque les conditions d'ensoleillement changent. La commande MPPT agit sur ce point de fonctionnement afin d'exploiter au mieux la puissance disponible dans chaque condition. Ainsi, la tension observée avant le Buck représente directement les conditions électriques imposées par le champ photovoltaïque.

À la sortie du convertisseur Buck, la tension est abaissée par rapport à celle fournie par le champ photovoltaïque. Elle se stabilise autour d'une valeur adaptée au système de stockage, ce qui confirme le rôle du convertisseur dans l'adaptation de la tension continue avant son transfert vers les batteries. Le Buck assure ainsi une interface entre la tension variable du champ PV et les conditions nécessaires au fonctionnement du système de stockage.

Le courant de sortie du convertisseur est maintenu autour de **70 A** lorsque la puissance photovoltaïque disponible est suffisante. Cette limitation résulte de la méthode **Switch**, qui permet de passer du fonctionnement MPPT à une régulation de courant lorsque la limite fixée est atteinte. Les résultats montrent ainsi que les variations de l'irradiance n'entraînent pas une augmentation excessive du courant de charge, ce qui permet de maintenir des conditions de charge contrôlées pour les batteries.

Le courant total de **70 A** est réparti entre les batteries connectées en parallèle. Chaque batterie absorbe ainsi environ **7,77 A**, ce qui permet de réduire la sollicitation individuelle de chaque élément de stockage. Cette répartition contribue à assurer une charge plus progressive et à limiter les contraintes électriques appliquées aux batteries.

L'évolution du SOC montre une augmentation progressive de l'état de charge des batteries pendant la période d'ensoleillement. Cette évolution confirme que l'énergie produite par le champ photovoltaïque est effectivement transférée vers le système de stockage. La faible

variation observée sur certaines périodes s'explique principalement par la capacité importante des batteries par rapport à la durée de simulation.

L'évolution pratiquement linéaire du SOC permet également d'estimer le temps nécessaire pour atteindre la pleine charge. D'après la relation obtenue dans la simulation, le passage de **20 % à 100 %** nécessite environ **4,62 h**, soit **4 h 37 min**. Ce résultat permet d'évaluer la capacité du système à stocker l'énergie disponible pendant la période d'ensoleillement.

Lorsque l'irradiance devient nulle ou très faible, le champ photovoltaïque cesse pratiquement de produire de l'énergie. Le système bascule alors vers la batterie, qui devient la source principale d'alimentation de la charge. Cette transition est assurée automatiquement par la fonction de gestion développée sous MATLAB, en fonction de l'irradiance et du SOC. La charge est ainsi alimentée uniquement à partir de l'énergie stockée pendant la journée.

Pendant la phase nocturne, le SOC diminue progressivement, traduisant la fourniture d'énergie de la batterie vers la charge d'éclairage. La décharge est arrêtée lorsque le SOC atteint **20 %**, conformément à la limite définie dans l'algorithme de gestion. Cette limite permet d'éviter une décharge excessive et contribue ainsi à préserver les conditions de fonctionnement du système de stockage.

Selon l'équation obtenue à partir de la courbe de décharge, une diminution du SOC de **100 % à 20 %** correspond à une durée d'environ **8,23 h**, soit **8 h 14 min**. Ce résultat montre que la batterie dispose d'une autonomie suffisante pour assurer l'alimentation de la charge pendant une grande partie de la période nocturne dans les conditions considérées.

La tension mesurée aux bornes de la batterie et de la charge DC reste pratiquement stable autour de **56 V**. Cette stabilité montre que la batterie fournit une alimentation continue relativement régulière à la charge d'éclairage. Elle confirme également le bon fonctionnement de l'interface électrique entre le système de stockage et la charge.

Le courant absorbé par la charge est d'environ **38,89 A**. Ce courant correspond au courant fourni par les batteries pendant la période nocturne. La valeur obtenue permet de vérifier le niveau de sollicitation du système de stockage lors de l'alimentation des LED et constitue également une grandeur importante pour l'évaluation de la puissance consommée par la charge.

La puissance absorbée par la charge est déterminée à partir du produit de la tension par le courant. Avec une tension d'environ **56 V** et un courant de **38,89 A**, la puissance obtenue en simulation est d'environ **2177 W**. Comme la charge est représentée par une résistance, la puissance obtenue correspond uniquement à une puissance active.

Cette valeur est supérieure à la puissance de référence de la charge réelle, qui est de **1563 W.** Cet écart s'explique principalement par le modèle résistif utilisé dans la simulation et par la tension effectivement appliquée à la charge, qui est supérieure à sa tension nominale de 48 V. En effet, pour une charge résistive, toute augmentation de la tension entraîne une augmentation du courant et donc de la puissance consommée. La valeur de **2177 W** doit ainsi être considérée comme la puissance correspondant au point de fonctionnement du modèle simulé, et non comme la consommation nominale réelle des LED.

III.7. Conclusion

Ce chapitre a permis de modéliser et de simuler le comportement d'un système photovoltaïque basé sur une technologie tandem pérovskite/silicium, ainsi que d'étudier son intégration dans un système photovoltaïque autonome destiné à l'alimentation d'une charge d'éclairage. L'étude du module tandem a montré l'influence importante de l'irradiance et de la température sur ses performances électriques. L'augmentation de l'irradiance entraîne principalement une augmentation du courant et de la puissance maximale, tandis que l'élévation de la température provoque principalement une diminution de la tension, de la puissance maximale et du rendement.

La comparaison avec le module monocristallin LONGi de 605 Wc montre que le panneau tandem présente, dans les conditions étudiées, un rendement supérieur. Le rendement du tandem varie d'environ 28,10 % à 28,81 %, contre 21,80 % à 22,40 % pour le module en silicium en fonction de l'irradiance. De même, lorsque la température augmente de 25 °C à 70 °C, les deux technologies voient leur rendement diminuer, mais le tandem conserve un avantage en matière de conversion énergétique.

La seconde partie du chapitre a permis de valider le fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome avec stockage. Pendant la journée, l'énergie produite par le champ PV est transférée vers les batteries à travers un convertisseur Buck commandé par MPPT. La méthode Switch permet de limiter le courant de charge à 70 A, réparti entre les batteries, avec environ 7,77 A par batterie. Pendant la nuit, la production photovoltaïque étant inexistante, les batteries prennent automatiquement le relais pour alimenter la charge d'éclairage DC.

Les résultats obtenus montrent également que le SOC évolue progressivement pendant les phases de charge et de décharge. Le temps estimé pour passer de 20 % à 100 % est de 4,62 h, tandis que la décharge de 100 % à 20 % est estimée à environ 8,23 h dans les conditions de simulation. La tension disponible aux bornes de la charge reste relativement stable, tandis que

le courant absorbé atteint environ 38,89 A. La puissance calculée à partir des grandeurs électriques simulées atteint environ 2177 W, valeur supérieure à la puissance de référence de 1563 W, principalement en raison du point de fonctionnement de la charge résistive et de la tension appliquée.

Ainsi, la simulation met en évidence la faisabilité d'une architecture photovoltaïque autonome avec stockage, dans laquelle l'énergie solaire produite pendant la journée est stockée puis utilisée durant la nuit. L'association du champ photovoltaïque, du MPPT, du convertisseur Buck, du stockage par batteries et de la commande automatique permet d'assurer une gestion contrôlée de l'énergie.

Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude, le dimensionnement et la simulation d'un système photovoltaïque autonome destiné à l'éclairage d'une exploitation agricole située dans la région de Tlemcen. L'étude a d'abord permis d'analyser les principes de conversion photovoltaïque et les différentes technologies d'éclairage, ce qui a conduit au choix des LED en raison de leur faible consommation et de leurs performances adaptées aux applications autonomes.

L'analyse du site de la ferme de Chiali a ensuite permis d'évaluer les conditions d'irradiation et de température ainsi que les besoins énergétiques des différentes zones d'éclairage. Le dimensionnement a été réalisé à partir du scénario hiver maximal, considéré comme le cas le plus contraignant, avec une consommation maximale de **16,10 kWh/j**. Le système étudié repose sur des luminaires LED alimentés en courant continu, un stockage par batteries et un champ photovoltaïque dimensionné pour assurer la continuité de l'alimentation durant la nuit.

La modélisation du panneau tandem pérovskite/silicium a montré des performances intéressantes, avec une puissance de **605 Wc** et un rendement simulé de **28,8 %**. La comparaison avec le module silicium de même puissance a montré un avantage du tandem en matière de rendement dans les conditions étudiées. La simulation du système autonome a également confirmé la possibilité de stocker l'énergie photovoltaïque pendant la journée puis de l'utiliser durant la nuit pour alimenter directement la charge d'éclairage DC.

Compte tenu de la superficie importante de la ferme, d'environ **21,9 hectares**, le dimensionnement peut être considéré comme une base permettant une évolution future de l'installation. Cette capacité supplémentaire constitue un avantage important, car elle peut permettre :

- **d'ajouter ultérieurement de nouvelles charges électriques** sans devoir redimensionner complètement le champ photovoltaïque ;
- **d'alimenter de nouveaux équipements agricoles**, tels que des pompes, systèmes de ventilation, automatisation, surveillance ou autres équipements électriques ;
- **d'accompagner l'extension de l'exploitation** en conservant une partie importante de l'infrastructure photovoltaïque existante ;
- **d'améliorer la flexibilité énergétique de la ferme**, en permettant d'utiliser l'énergie disponible pour d'autres usages lorsque les besoins d'éclairage sont faibles ;
- **d'envisager à plus long terme une fourniture d'électricité vers des installations voisines**, à condition d'évoluer vers une architecture interconnectée appropriée et de respecter les exigences techniques et réglementaires applicables.

Ainsi, le surdimensionnement ne constitue pas uniquement un coût supplémentaire : il peut représenter une **réserve énergétique pour le développement futur de l'exploitation** et limiter les besoins de nouveaux investissements lors de l'ajout de charges.

Cette étude montre que l'association de la technologie photovoltaïque tandem, du stockage par batteries et de l'éclairage LED constitue une solution techniquement intéressante pour une exploitation agricole. La technologie tandem présente notamment un potentiel important grâce à son rendement élevé, tandis que l'architecture autonome permet une utilisation adaptée aux besoins nocturnes. La poursuite du développement de la technologie tandem, notamment en matière de durée de vie, de coût et de disponibilité commerciale, pourrait renforcer davantage son intérêt économique et favoriser son intégration future dans les grandes exploitations agricoles.

Références Bibliographie

[1] R. NEBBALI et R. BELABED, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque », Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2016.

[2] A. Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », Institut National Des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

[3] C. Lerouge, « Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) États-Unis », Recherche & Industrie Photovoltaïque (PV) États-Unis, 2006.

[4] K. Helali, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative », MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2012.

[5] C. Cornu, « Centrales photovoltaïques (Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs) », Office fédéral des questions conjoncturelles, 1996.

[6] C. Alonso, « Contribution à l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie », Habilitation à diriger des recherches (HDR), Université Paul Sabatier Toulouse III, Toulouse, 2003.

[7] M. Djedid, « Etude expérimentale de l'influence de la température et l'éclairement sur le rendement d'une cellule PV », LARBI BEN M'HIDI -OUM EL BOUAGHI-, 2019.

[8] Z. Bendjellouli, « Contribution à la modélisation d'une cellule solaire », Mémoire de magister, Université de Béchar, 2009.

[9] B. Equer, *Énergie solaire photovoltaïque (Volume 1 : Physique et technologie de la conversion photovoltaïque)*, 1ère édition. Paris: 1ère édition, 1993.

[10] « Photo watt PW500 - 12V », Photowatt. [En ligne]. Disponible sur: http://www.photowatt.com/fileadmin/pdf/modules/pw500.pdf.

[11] S. Petibon, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Université de Toulouse, 2009.

[12] O. Chirifi et H. Madache, « Etude technico-économique d'une installation photovoltaïque pour une carrière », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), 2013.

[13] S. K. BENGHERNAOUT et F. Z. KHELIL, « Performance des panneaux solaires photovoltaïques à base de cellules solaires Tandem pérovskite/CIGS », Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem, 2023.

[14] E. Q. Macabebe et E. E. Van Dyk, « Parameter extraction from dark current-voltage characteristics of solar cells », *South Afr. J. Sci.*, vol. 104, n° 9, p. 401-404, 2008.

[15] J.-P. Colinge et C. A. Colinge, *Physics of Semiconductor Devices*. Springer-Verlag New York Inc., 2002.

[16] O. W. Ait Djoudi et S. Zidane, « Etude et analyses des performances d'une installation solaire photovoltaïque autonome », MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2024.

[17] A. Deneyer, P. D'Herdt, et B. Deroisy, *Guide pratique et technique de l'éclairage résidentiel*. JAN Venstermans, 2011.

[18] L. FERRE, « Étude de l'éclairage d'une salle de classe », 2012.

[19] M. ADDOU et A. BEDDIAF, « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour l'alimentation d'une ferme », Abou Bekr Belkaïd– Tlemcen, 2016.

[20] O. Benseddik et F. Djaloud, « Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque », Univ-Ourgla, 2012.

[21] « Règles générales applicables à l'éclairage artificiel intérieur des lieux de travail », CARSAT Bretagne, 2022. [En ligne]. Disponible sur: https://www.carsat-bretagne.fr/files/live/sites/carsat-bretagne/files/pdf/entreprise/EclairageArtificiel.pdf

[22] F. Zedam et Z. Hamdi, « Dimensionnement d'une installation photovoltaïque d'une ferme », Akli Mohand Oulhadj de Bouira, 2021.

[23] M. A. Green *et al.*, « Solar cell efficiency tables (version 62) », *Prog. Photovolt. Res. Appl.*, vol. 31, n° 7, p. 651-663, juill. 2023, doi: 10.1002/pip.3726.

[24] D. S. Philipps, F. Ise, W. Warmuth, et P. P. GmbH, « Photovoltaics Report », 2024.

[25] Y. Wang, Y. Wang, F. Gao, et D. Yang, « Efficient Monolithic Perovskite/Silicon Tandem Photovoltaics », *ENERGY Environ. Mater.*, vol. 7, n° 3, p. e12639, mai 2024, doi: 10.1002/eem2.12639.

[26] Y. Zeng *et al.*, « Efficiency-loss analysis of monolithic perovskite/silicon tandem solar cells by identifying the patterns of a dual two-diode model's current-voltage curves », *J. Semicond.*, vol. 44, n° 8, p. 082702, août 2023, doi: 10.1088/1674-4926/44/8/082702.

[27] M. Babics, H. Bristow, A. R. Pininti, T. G. Allen, et S. De Wolf, « Temperature Coefficients of Perovskite/Silicon Tandem Solar Cells », *ACS Energy Lett.*, vol. 8, n° 7, p. 3013-3015, juill. 2023, doi: 10.1021/acsenergylett.3c00930.