

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سعيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux Électriques

Par :

ZIANI Abdelmalek

LADMEK Ismail

Sujet

**Transition énergétique basée sur l'éclairage extérieur
renouvelable au niveau universitaire**

Soutenue publiquement en 26/06/2024 devant le jury composé de :

Mme. KENNICHE Fatiha	Pr	Univ. Saida	Président
Mr. HAFFAF Aziz	MCB	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. MANKOUR Mohamed	Pr	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Résumé

L'intégration des énergies renouvelables (ER), l'amélioration de l'efficacité énergétique et la transition vers un système énergétique propre sont des solutions aux défis des émissions de gaz à effet de serre et du changement climatique. Notre étude s'inscrit dans ce contexte et se concentre sur l'analyse de la faisabilité techno-enviro-économique d'un système énergétique hybride PV/éolienne/stockage destiné à assurer l'autoconsommation énergétique de l'éclairage extérieur, en prenant l'université de Saida comme exemple d'étude. L'analyse comparative entre l'éclairage à base de lampes SHP et LED est également abordée afin de nous permettre d'évaluer l'impact des nouvelles technologies sur le dimensionnement, le coût et la performance du système. Les résultats obtenus montrent que l'intégration des ER et de la technologie LED est une solution pour la transition énergétique, avec des avantages techniques, économiques et environnementaux, permettant de réduire significativement la consommation, la taille des différents composants et le coût de la facture d'électricité d'environ 60%.

Mots clés: Transition énergétique, l'éclairage extérieur, énergie renouvelable, PV, éolienne, autoconsommation, faisabilité.

Abstract

The integration of renewable energies (RE), the improvement of energy efficiency, and the transition to a clean energy system are solutions to the challenges of greenhouse gas emissions and climate change. Our study is framed within this context and focuses on the techno-enviro-economic analysis of a hybrid PV/wind/storage energy system designed to ensure self-consumption of outdoor lighting, using the university of Saida as a case study. A comparative analysis between SHP and LED lamp-based lighting is also addressed to evaluate the impact of new technologies on system sizing, cost, and performance. The results obtained show that the integration of RE and LED technology is a solution for energy transition, with technical, economic, and environmental benefits, significantly reducing energy consumption, component size, and electricity bill costs by approximately 60%.

Keywords: Energy transition, outdoor lighting, renewable energy, PV, wind turbine, self-consumption, feasibility.

ملخص

ادراج الطاقات المتجددة (RE)، تحسين كفاءة الطاقة، والانتقال إلى نظام طاقة نظيف هي حلول لتحديات انبعاثات غازات الاحتباس الحراري والتغير المناخي. تتمحور دراستنا ضمن هذا السياق وتركز على التحليل التقني البيئي الاقتصادي لنظام طاقة هجين يتألف من الخلايا الشمسية/الطاقة الريحية/التخزين المصمم لضمان الاستهلاك الذاتي للإضاءة الخارجية، باستخدام جامعة سعيدة كدراسة حالة. كما يتم التطرق أيضاً إلى التحليل المقارن بين الإضاءة المعتمدة على مصابيح SHP والمصابيح LED لتقييم تأثير التكنولوجيات الجديدة على تحجيم النظام والتكلفة والأداء. تظهر النتائج المحصلة أن ادراج الطاقات المتجددة وتكنولوجيا LED هو حلاً للانتقال الطاقوي، مع فوائد فنية واقتصادية وبيئية، مما يقلل بشكل كبير من استهلاك الطاقة وحجم المكونات المختلفة وتكلفة فاتورة الكهرباء بنسبة تقارب 60%.

الكلمات المفتاحية: الانتقال الطاقوي، الإضاءة الخارجية، الطاقة المتجددة، الخلايا الشمسية، الطاقة الريحية، الاستهلاك الذاتي، الجدوى

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions le dieu puissant qui nous donne de la foi, du courage et de la patience afin d'accomplir ce modeste travail.

*Nous tenons à remercier notre promoteur **Mr. Aziz HAFFAF** d'avoir accepté de nous encadrer et pour les efforts qu'il a déployé, pour nous aider, encourager, corriger et même conseiller avec une grande gentillesse et sagesse durant toute cette période d'accompagnement.*

Nous ne pourrions jamais remercier, assez, nos parents qui nous ont accompagné et soutenu tout ce temps. Aujourd'hui nous leur devons cette réussite.

Nous exprimons notre gratitude sincère à tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail et pour l'intérêt qu'ils y ont porté.

*En particulier, nous souhaitons exprimer notre plus profonde reconnaissance aux membres du jury pour avoir gracieusement consacré leur temps à évaluer notre modeste mémoire. Nous remercions sincèrement, tout d'abord, Madame **Fatiha KENNICHE**, professeure à l'Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de mémoire. Nous tenons à remercier très sincèrement Monsieur **Mohamed MANKOUR**, professeur à l'Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, qui a accepté de participer au jury en tant qu'examineur pour évaluer ce travail.*

Nous remercions aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

*ZIANI A & LADMEK I
Juin 2024*

Dédicace

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers Dieu, le Tout-Miséricordieux,
sans qui je n'aurais pas atteint ce point.

Je dédie ce travail à mes parents, qui ont été un soutien indéfectible et une source
d'encouragement tout au long de ma vie. À ma famille et à mes proches, qui ont été
présents pour moi dans les moments joyeux et difficiles, votre soutien a été
inestimable.

À mes amis, qui ont rendu ce parcours académique riche en bonheur, en joie et en
souvenirs inoubliables, je vous suis profondément reconnaissant de votre
compagnie.

Et à mes professeurs et mentors, dont les conseils et la sagesse ont éclairé mon
chemin, me permettant d'entamer ce nouveau chapitre avec confiance et
détermination. Merci de croire en moi et de m'inspirer à atteindre de nouveaux
sommets.

Abdelmalek

Juin 2024

Dédicace

Toute ma gratitude est envers Dieu Le Tout Miséricordieux à qui sans Lui je ne serai pas ici.

Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mon père disparu trop tôt. J'espère que, du monde qui est sien maintenant, il apprécie cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Dieu, le tout puissant, l'avoir en sa sainte miséricorde !

Une dédicace à ma famille (ma mère et mes frères) qui ont toujours été là tant dans mes moments de joie ainsi que dans les difficiles.

Une dédicace aussi à mes professeurs qui m'ont permis d'écrire un nouveau chapitre de ma vie.

Ismail

Juin 2024

Table des Matières

Table des Matières	I
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux	VI
Introduction Générale	1

Chapitre 1: État de l'art et transition énergétique

1. Introduction	4
2. Aperçu historique	4
2.1. Sources d'énergie traditionnelles	4
2.2. Energies fossiles	5
2.2.1. Évolution des énergies fossiles	6
2.2.2. Panorama des énergies fossiles à travers le monde	7
2.2.3. Avantages et inconvénients des carburants fossiles	9
3. Transition énergétique	12
3.1. Origines et défis de la transition énergétique	12
3.2. Pourquoi la transition énergétique ?	13
3.2.1. Transition énergétique pour le climat	13
3.2.2. Transition énergétique et écologique	14
3.2.3. Transition énergétique pour la santé et la sécurité	14
3.2.4. Transition énergétique pour minimiser les déchets	14
4. Energies renouvelables	14
5. Intermittence et hybridation énergétique	16
6. Énergies renouvelables à l'échelle mondiale	17
6.1. État et tendances énergétiques mondiales en 2024	19
6.2. Technologies émergentes avec des exemples	20
7. Etat de l'énergie en Algérie	22
7.1. Production et consommation d'énergie	22
7.2. Emission de CO2	24
8. Transition énergétique en Algérie	25
9. Conclusion	28

Chapitre 2 : Modélisation du système hybride PV-éolien-stockage

1.Introduction	29
2. Logiciel et méthodologie	30
2.1. Logiciel	30
2.2. Méthodologie	33
3. Etude de cas - description	35

4. Evaluation de ressource	37
4.1. Les ressources solaires	37
4.2. Vitesse de vent et température	38
5. Configuration du système hybride	40
5.1. System photovoltaïque	41
5.2. Eolienne	41
5.3. Stockage	42
5.4. Convertisseur	43
6. Critère d'évaluation techno-environ-économique	44
6.1. Production d'énergie	44
6.2. Énergie excédentaire	44
6.3. Charge non satisfaite	44
6.4. Analyse environnementale	45
6.5. Coût total net actuel	46
6.6. Coût de l'énergie COE	46
7. Consommation	46
7.1. Lampes à sodium haute pression (HPS)	47
7.2. Lampes à diode électroluminescente (LED)	49
8. Conclusion	52

Chapitre 3 : Analyse et discussion des résultats - cas du SHP

1. Introduction	53
2. Analyse et discussion des résultats	53
2.1. Architecture optimale du système	54
2.2. Performance énergétique	55
2.2.1. Productivité du système photovoltaïque	57
2.2.2. Fonctionnement de l'éolienne	58
2.2.3. Batteries de stockage	59
2.2.4. Convertisseur	61
2.3. Analyse économique	62
2.4. Analyse environnementale	63
3. Conclusion	64

Chapitre 4 : Analyse comparative et discussions

1. Introduction	65
2. Analyse et discussion des résultats - Cas LED	65
2.1. Architecture optimale du système	65
2.2. Production d'énergie	66

2.3. Résultats économiques	69
3. Comparaison des résultats	70
3.1. Comparaison technique	70
3.2. Comparaison économique	71
4. Stratégies et pratiques	73
5. Conclusion	74
Conclusion Générale	75
Références Bibliographiques	77

Liste des Figures

Chapitre 1: État de l'art et transition énergétique

Figure 1.1. Consommation de combustibles fossiles dans le monde (1965-2022).	7
Figure 1.2. Consommation de combustibles fossiles par habitant en 2022.	8
Figure 1.3. Consommation de combustibles fossiles de 1965 à 2022.	9
Figure 1.4. Émissions mondiales de CO ₂ issues de la combustion d'énergie (1900-2022).	10
Figure 1.5. Emissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'énergie (2000-2022).	11
Figure 1.6. Production d'énergie renouvelable moderne par source.	19
Figure 1.7. Source de production d'électricité en Algérie (2021).	23
Figure 1.8. Consommation de l'électricité par habitant en Algérie.	24
Figure 1.9. Production et consommation de l'électricité en Algérie.	24
Figure 1.10. Emissions de CO ₂ en Algérie.	25
Figure 1.11. Emissions de CO ₂ par habitant en Algérie.	25

Chapitre 2 : Modélisation du système hybride PV-éolien-stockage

Figure 2.1. Différentes fonctions du logiciel HOMER.	32
Figure 2.2. Méthodologie suivie pour la réalisation de l'étude.	35
Figure 2.3. Localisation et image Google Earth du site.	36
Figure 2.4. Profile d'irradiation solaire et d'indice de clarté.	37
Figure 2.5. Profil mensuel de la vitesse du vent et de la température.	39
Figure 2.6. Schéma du système hybride photovoltaïque/éolienne étudié.	40
Figure 2.7. Courbe de puissance de l'éolienne sélectionnée.	42
Figure 2.8. Lampes HPS pour éclairage extérieur.	47
Figure 2.9. Structure standard des lampes SHP.	48
Figure 2.10. Schéma de conversion dans les lampes SHP.	48
Figure 2.11. Schéma de l'efficacité de conversion des lampes LED.	50
Figure 2.12. Profil de charge pour les lampes HPS.	51
Figure 2.13. Profil de charge pour les lampes LED.	52

Chapitre 3 : Analyse et discussion des résultats - cas du SHP

Figure 3.1. Architecture optimale du système.	54
Figure 3.2. Profil mensuel de la production électrique par source.	55
Figure 3.3. Production annuelle d'électricité par source d'énergie.	56
Figure 3.4. Analyse de l'offre et de la demande d'électricité (kWh/an).	56
Figure 3.5. Profil du surplus d'électricité du système.	57
Figure 3.6. Dmap de la production d'énergie PV au cours de l'année.	58
Figure 3.7. Dmap de la production d'énergie éolienne au cours de l'année.	59
Figure 3.8. Histogramme de la fréquence des états de charge des batteries.	60

Figure 3.9. État de charge des batteries au cours de l'année.	61
Figure 3.10. Coût total net actuel par type de coût.	62

Chapitre 4 : Analyse comparative et discussions

Figure 4.1. Architecture optimale du système - Cas LED.	66
Figure 4.2. Production électrique mensuelle moyenne.	66
Figure 4.3. Contribution énergétique par source d'énergie.	68
Figure 4.4. TNPC des composants du système hybride.	69
Figure 4.5. TNPC par type de coût.	70
Figure 4.6. Dimensionnement du système pour les deux cas: SHP et LED.	71
Figure 4.7. Comparaison économique pour le cas LED et SHP.	72

Liste des Tableaux

Tableau 2.1. Spécifications techno-économiques des composants.	44
Tableau 3.1. Principaux paramètres de performance du système photovoltaïque.	57
Tableau 3.2. Caractéristiques de fonctionnement de l'éolienne.	58
Tableau 3.3. Performance et caractéristiques du système de batteries.	59
Tableau 3.4. Caractéristiques opérationnelles du convertisseur.	61
Tableau 4.1. Paramètres clés de performance du système photovoltaïque.	67
Tableau 4.2. Paramètres et caractéristiques associées à la performance de l'éolien.	67
Tableau 4.3. Caractéristiques d'opération des batteries de stockage.	68
Tableau 4.4. Caractéristiques de fonctionnement des convertisseurs.	69

Introduction Générale

Ces dernières années, l'intégration des sources d'énergie renouvelables dans les systèmes électriques a suscité un intérêt considérable en raison de la demande mondiale pour une énergie propre et durable. Cette tendance est motivée par la nécessité de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'atténuer les impacts environnementaux tels que les émissions de gaz à effet de serre et la pollution. L'urgence de lutter contre le changement climatique et la dégradation de l'environnement a conduit à un changement de paradigme dans la manière dont l'énergie est produite, distribuée et consommée.

Les sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et éolienne, offrent une alternative viable aux combustibles fossiles traditionnels en fournissant une énergie dé-carbonée, abondante et durable. L'Algérie, comme d'autres pays dans le monde, s'oriente vers ces solutions et a adopté un programme national des énergies renouvelables pour diversifier le mix énergétique, qui est majoritairement basé sur le gaz naturel. L'un des objectifs du pays est d'intégrer ces énergies pour différentes applications et consommateurs, de petite à grande échelle, y compris les grandes centrales, les écoles, l'éclairage, etc.

Les universités, en tant que grands consommateurs d'énergie, sont particulièrement bien placées pour viser l'autonomie, la transition et l'efficacité énergétiques afin de réduire la consommation, les coûts associés et les émissions. L'éclairage extérieur dans ces établissements joue un rôle crucial dans la sûreté, la sécurité et l'esthétique. Un éclairage adéquat améliore la visibilité, dissuade la criminalité et contribue à l'ambiance générale et à la fonctionnalité de l'environnement du campus.

Cependant, l'utilisation des technologies traditionnelles d'éclairage extérieur, telles que les lampes à sodium haute pression (SHP), est connue pour sa consommation d'énergie élevée et son efficacité relativement faible. Ces caractéristiques les rendent moins désirables dans le contexte des objectifs modernes de développement durable. Il est donc judicieux d'utiliser les nouvelles technologies de lampes à haut rendement afin de minimiser l'énergie consommée, tout en maintenant le même niveau de service.

De plus, les systèmes hybrides qui combinent l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne peuvent fournir une alimentation fiable et durable pour l'éclairage extérieur, réduisant ainsi la dépendance aux ressources classiques émettrices de carbone et maximisant l'autoconsommation.

Ce mémoire sur l'intégration de l'énergie renouvelable dans l'infrastructure du campus s'aligne sur les objectifs de notre pays en termes de transition, d'efficacité et de durabilité. Il vise à étudier la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation d'un système hybride PV/éolien/stockage pour alimenter l'éclairage extérieur, en prenant comme exemple l'université Dr. Moulay Tahar de Saïda. L'objectif principal est d'évaluer la viabilité technique et économique ainsi que les avantages environnementaux de ce système. Il s'agit également de comparer les performances des technologies d'éclairage SHP et LED lorsqu'elles sont alimentées par le système hybride.

Notre travail de mémoire est structuré en quatre chapitres:

Dans le premier chapitre, nous présentons une vue d'ensemble du paysage énergétique actuel, en nous concentrant sur les contextes mondial et algérien. Ce chapitre comprend des statistiques détaillées sur la production et la consommation d'énergie, ainsi que sur les émissions de CO₂. Il met l'accent sur les défis posés par les combustibles fossiles, tels que l'épuisement des ressources et les émissions de gaz à effet de serre, et aborde la question de la transition inévitable vers les sources d'énergie renouvelables. En outre, il permet de mieux comprendre l'urgence et l'importance de l'intégration des technologies liées aux énergies propres.

Le deuxième chapitre aborde les aspects techniques de la modélisation du système hybride photovoltaïque-éolien-batterie pour l'éclairage extérieur de l'université. Il couvre la méthodologie utilisée, y compris une description détaillée de l'étude de cas, les considérations climatiques et géographiques, ainsi que l'évaluation des ressources solaires et éoliennes. Le chapitre explique l'architecture du système, qui comprend des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries et le convertisseur d'énergie. Le logiciel de simulation spécialisé (HOMER) utilisé pour analyser les performances du système dans différentes conditions est également présenté. Les critères d'évaluation techno-économiques pour évaluer la viabilité du système sont aussi discutés.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et à la discussion des résultats de la simulation du système hybride appliqué à l'éclairage basé sur les lampes sodium haute pression (SHP) existantes. Le chapitre évalue les performances du système en termes de production d'énergie, de surplus d'électricité et de capacité du système à répondre à la demande d'éclairage. Il examine également les résultats économiques en termes de coût total net actuel, de coût unitaire de l'énergie, de coût de la facture d'électricité et met en évidence la réduction potentielle des émissions de carbone.

Le quatrième chapitre présente une analyse comparative entre l'éclairage traditionnel par SHP et l'éclairage par la technologie LED, proposé comme moyen d'améliorer l'efficacité énergétique. Il évalue les performances du système du point de vue technique, énergétique et financier. Ce chapitre inclut également une comparaison détaillée du dimensionnement des différents composants du système, ainsi que les économies réalisées et les avantages technico-économiques obtenus par l'application de la technologie LED en comparaison avec le système à base de lampes SHP.

Enfin, le mémoire se termine par une conclusion générale qui englobe les principaux points abordés tout au long du document et résume les résultats obtenus.

Chapitre 1

État de l'art et transition énergétique

*Chapitre 1**État de l'art et transition énergétique***1. Introduction**

La transition énergétique est un enjeu majeur actuel, avec des implications environnementales, économiques et sociales significatives. Elle vise à transformer le système énergétique mondial, en passant d'une dépendance aux combustibles fossiles à une utilisation accrue des énergies renouvelables et des technologies plus efficaces et durables. Cette transformation est essentielle pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, limiter le réchauffement climatique et assurer un avenir énergétique plus sûr et plus équitable pour tous.

Dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur le secteur de l'énergie électrique et la transition énergétique. Nous analysons des statistiques énergétiques récentes, tant au niveau mondial qu'algérien, en termes de consommation, de production et d'émissions de CO₂. Nous examinons également les énergies renouvelables, les avancées récentes, les technologies émergentes et les défis actuels. Ce panorama vise à fournir une compréhension approfondie des progrès réalisés et des obstacles à surmonter pour atteindre un futur énergétique durable et résilient.

2. Aperçu historique**2.1. Sources d'énergie traditionnelles**

L'histoire de l'humanité est liée à sa capacité à exploiter différentes sources d'énergie et à les utiliser pour répondre à ses besoins essentiels. Depuis les temps anciens, les sociétés ont utilisé l'énergie des ressources naturelles disponibles, ce qui a entraîné l'utilisation de ce que nous appelons aujourd'hui les "sources d'énergie traditionnelles".

- **Le feu:** L'utilisation du feu est la première forme d'énergie que l'homme a maîtrisée. Il y a des centaines de milliers d'années, les premiers hommes ont appris à maîtriser le feu, qui leur apportait chaleur, lumière et protection.
- **L'énergie biomasse:** L'énergie issue de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui dépend du cycle de la matière vivante végétale et animale. L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets

agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses [1].

1. La biomasse par combustion: Les déchets sont directement brûlés, produisant ainsi de la chaleur, de l'électricité ou les deux (cogénération). Cela concerne le bois, les déchets des industries de transformation du bois et les déchets végétaux agricoles (pailles, canne à sucre, arachide, noix de coco, etc.). L'usine d'incinération des déchets urbains Dalkia Wastenergy (filiale de Dalkia, elle-même filiale d'EDF) d'Ivry-sur-Seine (Val-de-Marne) traite les déchets ménagers de plus de 5 millions d'habitants (soit plus de 690 000 tonnes par an). En France par exemple, 10% de la production d'électricité d'origine biomasse provient de la combustion du biogaz.

2. Par méthanisation: Les déchets organiques sont transformés en biogaz par fermentation, grâce à des micro-organismes comme des bactéries. Ce biogaz, principalement composé de méthane, est ensuite brûlé pour produire de l'électricité. Ce processus utilise des déchets ménagers, le fumier d'animaux, les boues de stations d'épuration, les papiers, les cartons, etc.

L'énergie biomasse émet peu de polluants et n'augmente pas l'effet de serre, car le CO₂ rejeté est équilibré par celui absorbé par les plantes lors de leur croissance. De plus, la méthanisation évite l'émission de méthane, un gaz à effet de serre encore plus puissant. Malgré son potentiel énergétique important, seulement un quart de celui-ci est actuellement utilisé pour la production d'électricité et de chaleur en France.

- **Énergie bois:** L'énergie bois est la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme pour se chauffer et cuire ses aliments. Aujourd'hui, le bois est une énergie biomasse qui représente en France plus de 9 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) d'énergie primaire. Dans la transition énergétique menée par la France, l'énergie bois, ainsi que la filière bois énergie, représentent une source de chaleur prioritaire pour les zones rurales et périurbaines. À la différence des énergies fossiles (charbon, fioul et gaz) et fissiles (nucléaire), l'énergie bois est une énergie d'origine renouvelable grâce à un cycle carbone neutre [2].

2.2. Energies fossiles

Les énergies fossiles sont des combustibles d'origine organique formés au cours de millions d'années par la décomposition de la matière organique. Ces sources de combustibles

sont largement utilisées par les sociétés humaines, notamment pour le transport, la production d'électricité et de chaleur [3].

Les trois principales sources d'énergie fossile sont le pétrole, le gaz naturel et le charbon.

- **Le pétrole:** C'est un liquide dense, noir et visqueux extrait de réservoirs souterrains. Il est principalement utilisé comme source d'énergie pour le transport, la production d'électricité et la fabrication de produits pétrochimiques tels que les plastiques et les produits pharmaceutiques.
- **Le gaz naturel:** Il est principalement composé de méthane et extrait des gisements souterrains. Le gaz naturel est principalement utilisé dans la production d'électricité et comme source d'énergie dans le transport.
- **Le charbon:** C'est un combustible solide et noir extrait de mines souterraines et à ciel ouvert. Il est principalement utilisé pour la production d'électricité et la fabrication d'acier [3].

2.2.1. Évolution des énergies fossiles

Depuis la révolution industrielle du XIXe siècle, l'utilisation des combustibles fossiles dans le monde a connu une croissance exponentielle. Avant cette époque, les principales sources d'énergie étaient le bois et le charbon de bois, utilisés pour le chauffage, la cuisine ou la production de matériaux.

Cependant, l'invention de la machine à vapeur et l'expansion des chemins de fer ont entraîné une augmentation significative de la demande en charbon pour alimenter ces machines. La production de charbon a donc rapidement augmenté, alimentant les machines de l'industrie textile, les aciéries et les centrales électriques. Au cours du XXe siècle, l'utilisation du pétrole et du gaz naturel s'est également développée pour alimenter les transports et les industries lourdes. Voici un bref historique de l'utilisation des combustibles fossiles dans le monde:

- 1800: L'utilisation du charbon comme source d'énergie commence à se développer avec la révolution industrielle en Europe et en Amérique du Nord.
- 1859: Le premier puits de pétrole est foré aux États-Unis.
- 1900: Le pétrole commence à remplacer le charbon comme principale source d'énergie pour les transports, notamment avec l'invention de l'automobile.
- 1940-1960: La production de gaz naturel commence à se développer et est utilisée pour alimenter l'industrie lourde et les centrales électriques.

Depuis les années 1960, la consommation de combustibles fossiles a augmenté de manière constante et rapide, sous l'effet d'une forte croissance démographique et économique mondiale. Grâce notamment à la généralisation de l'utilisation des énergies fossiles, les sociétés humaines ont connu un développement rapide (urbanisation, métropolisation, etc.) et une croissance économique importante grâce à l'industrialisation [3]. La Figure 1.1 montre la consommation de combustibles fossiles par type de combustible à l'échelle mondiale.

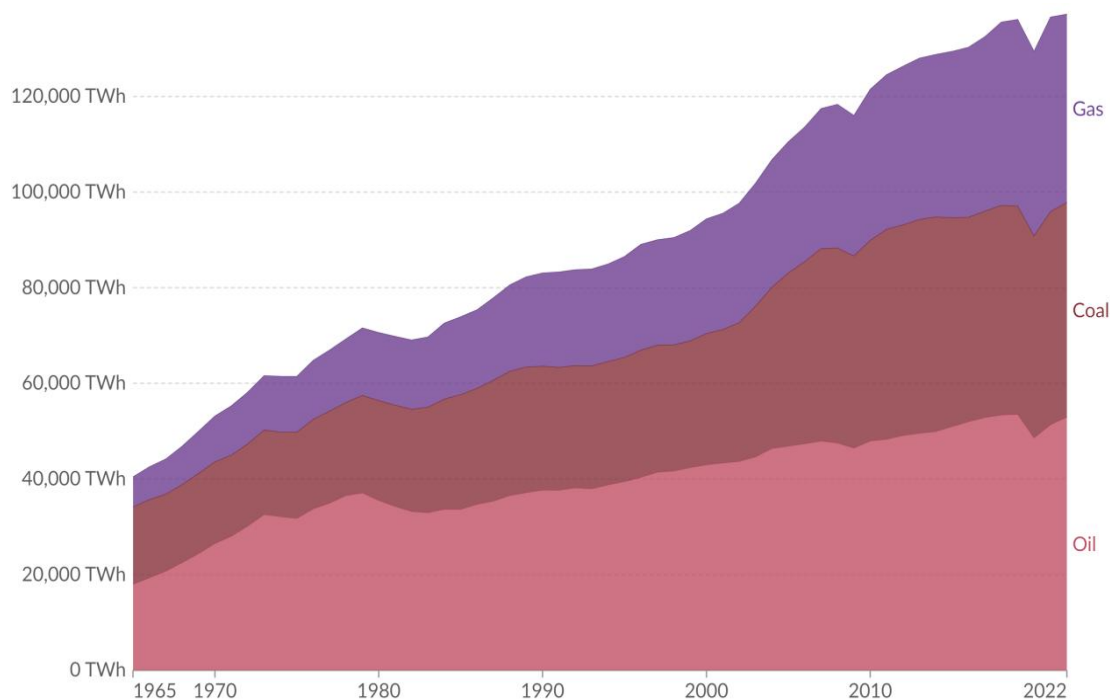


Figure 1.1. Consommation de combustibles fossiles dans le monde (1965-2022).

2.2.2. Panorama des énergies fossiles à travers le monde

Les combustibles fossiles sont actuellement la principale source mondiale d'énergie, représentant 84% de la production d'énergie primaire en 2019, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE). En Europe, les combustibles fossiles représentent environ 75% de la production d'énergie primaire. En France, ils représentent environ 45% de la production d'énergie primaire, notamment en raison de la forte proportion d'énergie nucléaire dans le pays [3]. La Figure 1.2 montre la consommation de combustibles fossiles par habitant pour l'année 2022.

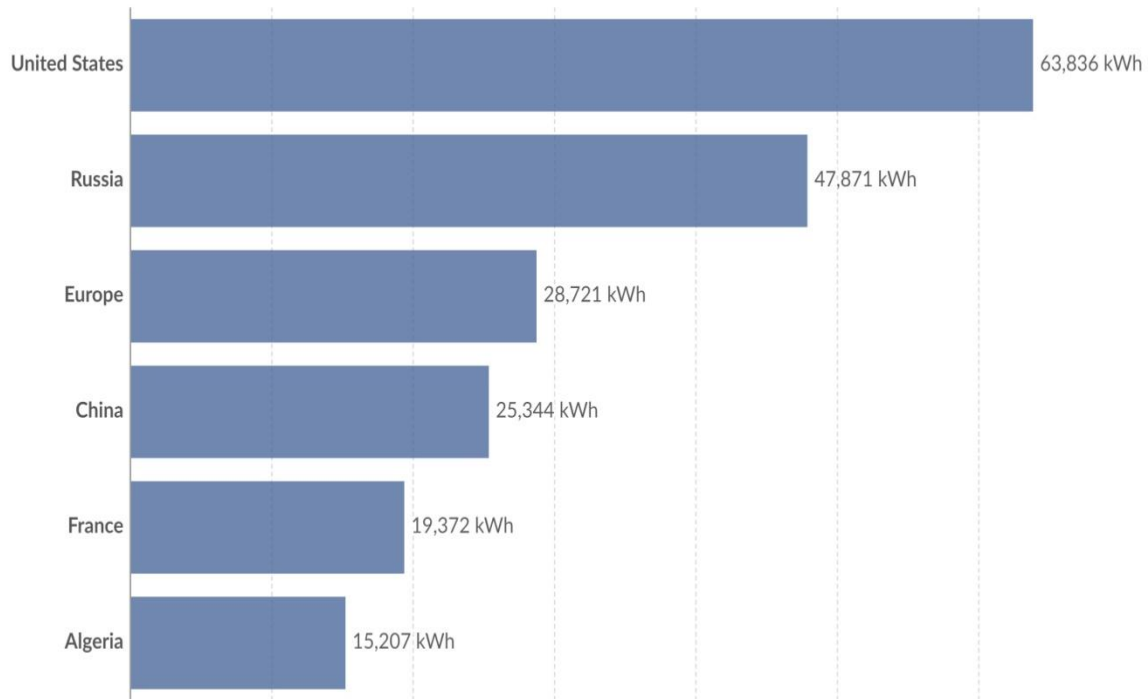


Figure 1.2. Consommation de combustibles fossiles par habitant en 2022.

Les combustibles fossiles ne sont pas répartis de manière équitable sur la planète, et quelques pays assurent l'essentiel de la production mondiale. Pour le pétrole, les principaux pays producteurs sont les États-Unis, la Russie, l'Arabie saoudite et la Chine, mais les plus grandes réserves se trouvent au Moyen-Orient, notamment en Arabie saoudite, en Iran et en Irak, ainsi qu'au Venezuela et au Canada. En ce qui concerne le gaz naturel, les pays disposant des plus grandes réserves et les principaux producteurs sont la Russie, l'Iran, le Qatar, le Turkménistan et les États-Unis. Quant au charbon, les plus grandes réserves se trouvent en Chine, aux États-Unis, en Inde, en Australie et en Indonésie, qui sont également les plus grands producteurs [3]. La Figure 1.3 montre la consommation de combustibles fossiles pour l'Algérie, la France, les États-Unis et l'Europe.

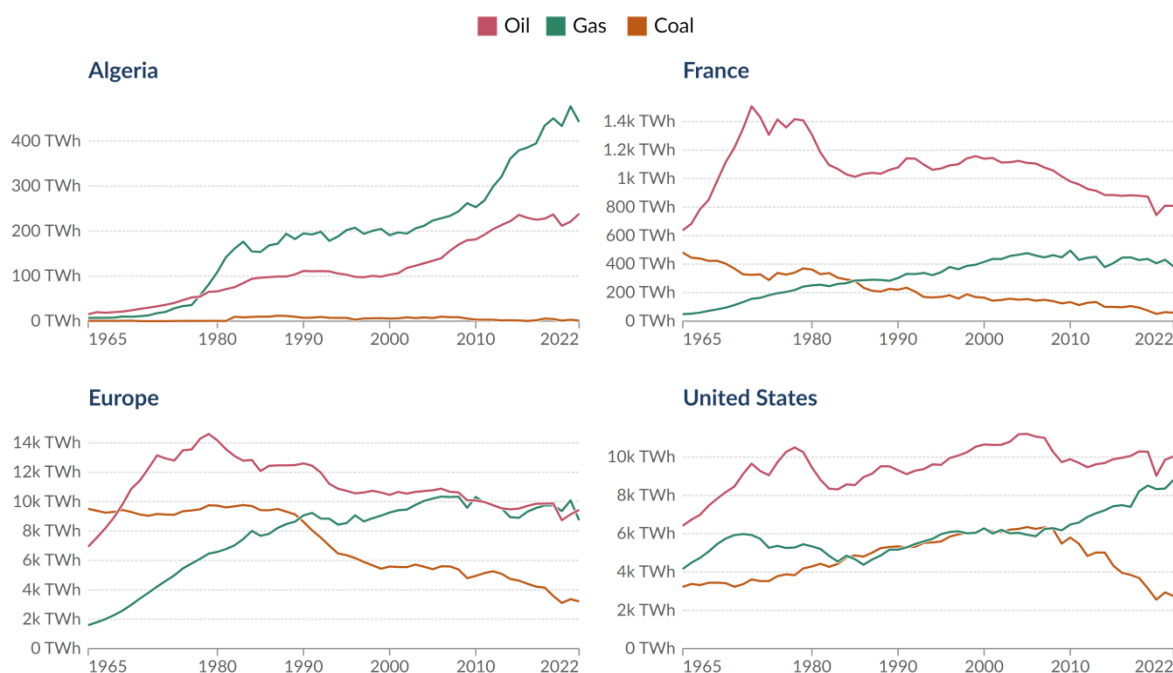


Figure 1.3. Consommation de combustibles fossiles de 1965 à 2022.

2.2.3. Avantages et inconvénients des carburants fossiles

Les combustibles fossiles présentent un certain nombre d'avantages qui en font les premières sources d'énergie mondiales, mais ils présentent également des inconvénients majeurs, notamment en matière d'environnement. Les principaux avantages des énergies fossiles sont:

- **Abondance et accessibilité:** Les énergies fossiles comme le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont largement disponibles dans de nombreuses régions du monde, ce qui en facilite l'accès et la distribution.
- **Fiabilité et stockage:** Elles offrent une source d'énergie fiable et stable, contrairement aux énergies renouvelables comme l'éolien et le solaire qui peuvent être intermittentes en fonction des conditions météorologiques.
- **Infrastructure:** L'infrastructure pour l'extraction, le transport et la distribution des énergies fossiles est déjà bien établie, ce qui réduit les coûts de mise en œuvre de nouvelles technologies.
- **Rentabilité:** Historiquement, les énergies fossiles ont souvent été moins chères que d'autres formes d'énergie, bien que cela puisse varier en fonction des conditions économiques et des politiques [3].

En revanche, les énergies fossiles présentent un certain nombre d'inconvénients, notamment sur le plan écologique:

- **Pollution due aux énergies fossiles:** L'utilisation des énergies fossiles émet des polluants atmosphériques tels que les particules fines, les oxydes de soufre et d'azote, qui ont des effets négatifs sur la santé humaine et l'environnement.
- **Émissions de gaz à effet de serre:** Les énergies fossiles se démarquent comme la principale source mondiale d'émissions de gaz à effet de serre. En 2022, les émissions totales liées à l'énergie ont augmenté de 1,0%, atteignant un niveau record de 41,3 Gt CO₂-eq. Cette augmentation significative est due à la combustion d'énergie et aux procédés industriels, représentant ainsi 89% des émissions totales de gaz à effet de serre liées à l'énergie [3].

La figure 1.4 montre les émissions mondiales de CO₂ issues de la combustion d'énergie et des processus industriels pour la période 1900-2022.

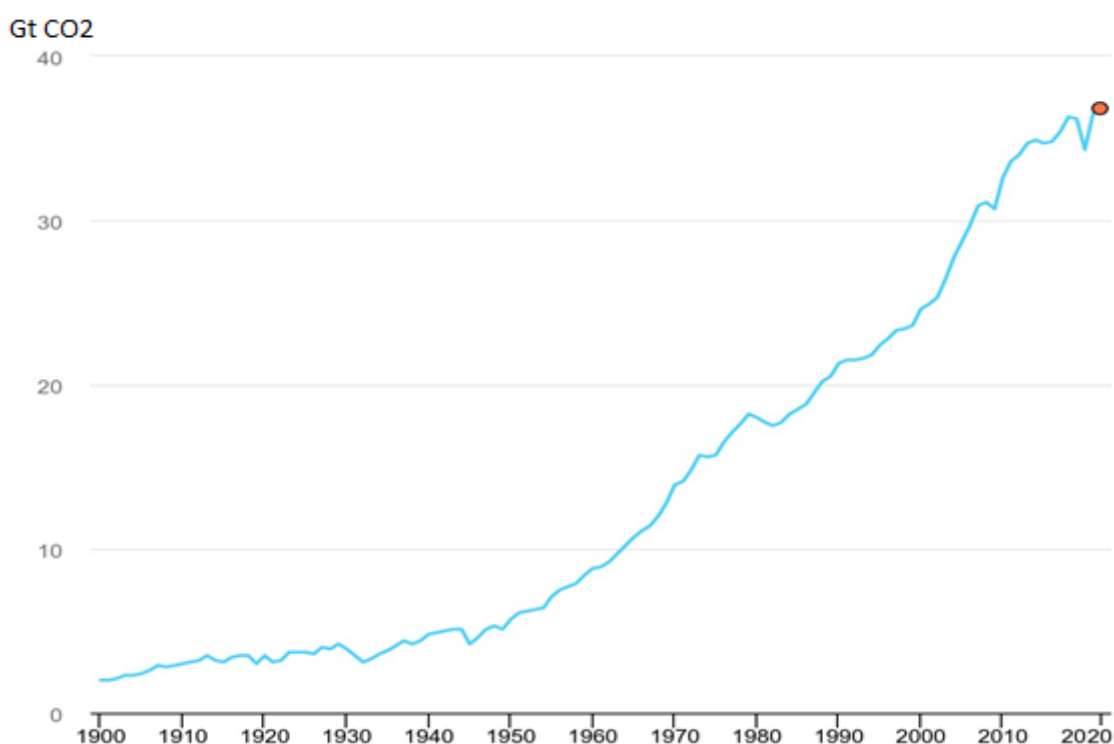


Figure1.4. Émissions mondiales de CO₂ issues de la combustion d'énergie (1900-2022).

Le méthane provenant de la combustion d'énergie, des fuites et des dégazages représentait 10 % supplémentaires, provenant principalement des opérations pétrolières et gazières à terre

ainsi que de la production de charbon à vapeur [4]. La figure 1.5 montre les émissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'énergie, pour la période 2000-2022.

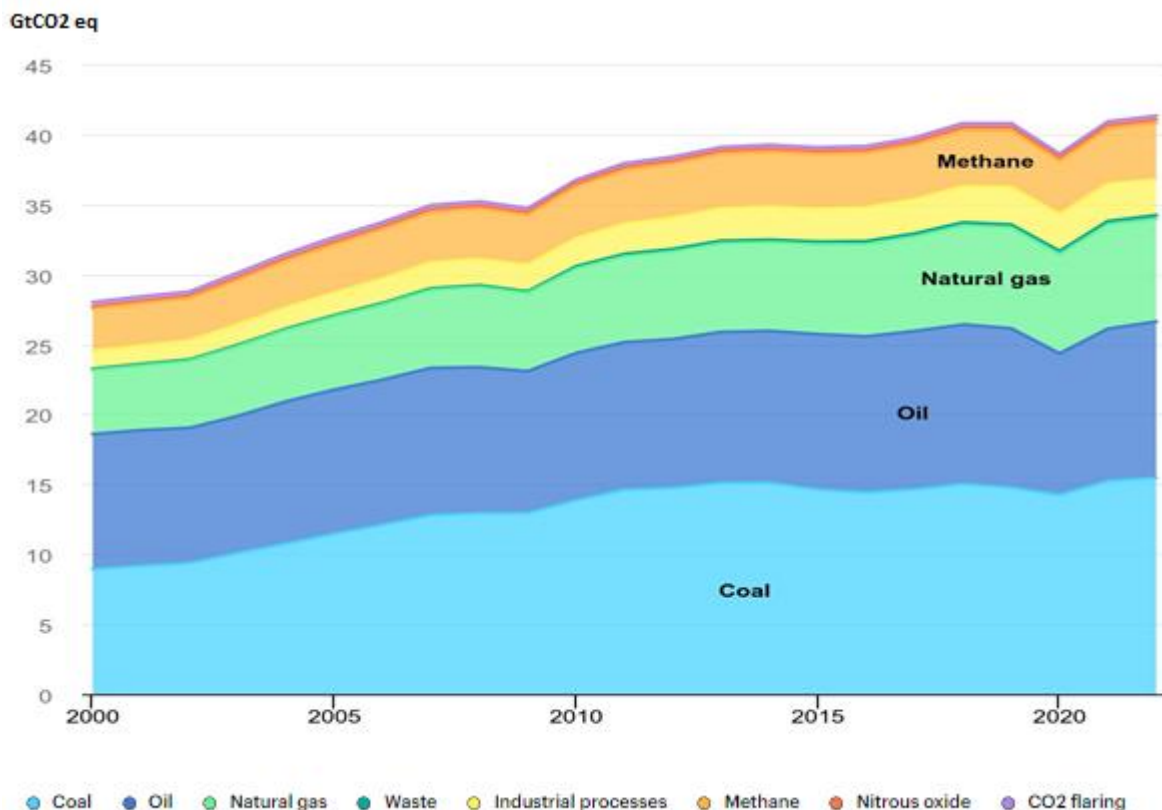


Figure 1.5. Emissions mondiales de gaz à effet de serre liées à l'énergie (2000-2022).

Actuellement, plus de 90 % des pays du monde, soit 124 sur 137, se sont engagés à atteindre la neutralité carbone d'ici à 2050. Cet effort mondial place l'énergie au premier plan des initiatives de neutralité nette, en mettant l'accent sur la diversification des sources d'énergie par un recours accru aux sources renouvelables [5].

- **Épuisement des ressources:** Les réserves de combustibles fossiles sont limitées et leur extraction pourrait devenir de plus en plus difficile et coûteuse, ce qui pourrait entraîner des pénuries et des hausses de prix.
- **Dépendance:** Étant donné que les réserves de combustibles fossiles sont concentrées dans un petit nombre de régions, les pays qui n'en disposent pas sont dépendants de ceux qui en disposent.

En raison des inconvénients des énergies fossiles, les énergies renouvelables suscitent un intérêt croissant, car elles offrent des avantages environnementaux et économiques considérables et contribuent à relever les défis du changement climatique. Pour répondre à ces

défis, les efforts se multiplient pour développer des sources d'énergie alternatives et durables, telles que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique. Ces énergies sont considérées comme une alternative durable aux énergies fossiles, car elles ne produisent pas de gaz à effet de serre et sont inépuisables à long terme.

3. Transition énergétique

La transition énergétique désigne l'ensemble des transformations du système de production, de distribution et de consommation d'énergie effectuées sur un territoire dans le but de le rendre plus écologique. Concrètement, elle vise à réduire l'impact environnemental du système énergétique [6]. Dans le cadre des stratégies de développement durable et de lutte contre le réchauffement climatique, la transition énergétique est un élément essentiel [6]. Cette transition se compose de trois éléments principaux :

- **La transformation du système de production énergétique:** Passage d'un système principalement basé sur les combustibles fossiles polluants à un système basé sur les énergies renouvelables et moins polluantes.
- **L'efficacité énergétique:** Amélioration du rendement énergétique de nos systèmes énergétiques.
- **La sobriété énergétique:** Réduction des besoins en énergie par des changements structurels et une évolution des modes de consommation.

Les programmes de transition énergétique mis en place varient selon les pays et les contextes, mais sont principalement fondés sur le remplacement progressif des combustibles fossiles (et parfois de l'énergie nucléaire) par un mix énergétique favorisant les énergies renouvelables, ainsi que sur la réduction de la consommation, la politique d'économie d'énergie et la réduction du gaspillage énergétique, notamment par l'amélioration de l'efficacité énergétique et le changement de comportement en matière de consommation. Le transfert de certaines utilisations énergétiques vers l'énergie électrique, comme les voitures électriques, fait également partie de la transition énergétique, tout comme le développement de certains vecteurs énergétiques tels que l'hydrogène vert [6].

3.1. Origines et défis de la transition énergétique

Le concept de transition énergétique est apparu dans les années 1970 et 1980, notamment aux États-Unis et au Royaume-Uni, sous la forme d'un livre blanc, suivi du premier congrès sur le sujet à Berlin.

- La transition énergétique implique le passage progressif d'énergies carbonées, polluantes ou risquées à des énergies propres, renouvelables et sûres telles que le solaire, l'éolien, la géothermie, l'hydroélectricité et l'énergie marémotrice. Ce changement répond à plusieurs enjeux complémentaires [6]:
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.
- Sécurisation des systèmes énergétiques en abandonnant progressivement l'énergie nucléaire.
- Décentralisation et réaménagement des infrastructures pour une meilleure répartition des bassins d'emplois.
- Diminution de la consommation d'énergie par une meilleure efficacité énergétique.
- Réduction des inégalités d'accès à l'énergie et accroissement de l'indépendance énergétique.
- Protection de la santé des populations.

Ces objectifs visent à transformer durablement le système énergétique mondial, en promouvant des sources d'énergie plus respectueuses de l'environnement et en renforçant la sécurité énergétique, tout en améliorant la qualité de vie et l'équité sociale.

3.2. Pourquoi la transition énergétique ?

La transition énergétique est devenue une question politique majeure en raison de plusieurs facteurs: les problèmes écologiques comme le changement climatique, les préoccupations de santé, les prix de l'énergie et la croissance économique.

3.2.1. Transition énergétique pour le climat

L'un des objectifs les plus fondamentaux de la transition énergétique est la lutte contre le réchauffement climatique. En effet, le réchauffement climatique est actuellement l'une des plus grandes préoccupations écologiques, comme le rappelle le rapport de synthèse du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié en 2023. Ce phénomène altère déjà les écosystèmes et a des répercussions sur la météo. De plus, le réchauffement climatique impacte l'économie en modifiant les conditions climatiques, ce qui affecte les activités humaines. C'est une menace majeure pour les sociétés humaines, principalement due aux émissions de CO₂ générées par les activités humaines [6].

3.2.2. Transition énergétique et écologique

La transition énergétique ne vise pas seulement à lutter contre le changement climatique, mais aussi à réduire notre impact global sur l'environnement. Par exemple, elle permet de minimiser la pollution issue de la production d'énergie conventionnelle. Les centrales au charbon émettent des particules fines, tandis que les centrales nucléaires produisent des déchets nucléaires et consomment beaucoup d'eau. De leur côté, les centrales au gaz émettent du méthane, principalement en raison de fuites. Dans l'ensemble, la production d'énergie pollue et consomme de précieuses ressources.

3.2.3. Transition énergétique pour la santé et la sécurité

La transition énergétique a également des implications sanitaires importantes. Nous savons que la pollution de l'air affecte notre santé, notamment la santé pulmonaire, et augmente le risque de maladies et de cancers. Réduire la pollution contribue donc à améliorer notre santé. De plus, la transition énergétique concerne aussi la sécurité. Les centrales thermiques et nucléaires peuvent présenter des risques importants pour les populations en cas d'accidents. C'est pourquoi certains estiment qu'il est plus sûr de passer à des sources d'énergie renouvelables décentralisées.

3.2.4. Transition énergétique pour minimiser les déchets

La transition énergétique joue un rôle crucial dans la gestion des déchets. Elle permet non seulement de réduire les déchets générés par la production d'énergie fossile et nucléaire, mais aussi de mieux valoriser certains types de déchets actuellement jetés ou gaspillés. Par exemple, les déchets ménagers organiques peuvent être recyclés dans le cadre de programmes de bio méthane ou d'incinération, où ils sont utilisés pour produire de l'électricité, de la chaleur ou d'autres formes d'énergie. Cela contribue à la fois à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à promouvoir une économie circulaire plus durable[6].

4. Energies renouvelables

Les énergies renouvelables, également appelées ressources renouvelables ou énergies vertes, sont des formes d'énergie provenant de sources qui se renouvellent naturellement à l'échelle humaine, telles que la lumière du soleil, le vent, la chaleur géothermique et la biomasse. Ces sources d'énergie sont considérées comme plus durables et respectueuses de l'environnement, car elles permettent de réduire la dépendance aux combustibles fossiles non

renouvelables et visent à minimiser les impacts environnementaux négatifs associés à la production et à la consommation d'énergie.

- **Énergie solaire:** Générée par le rayonnement solaire, elle peut être convertie en électricité à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques ou de systèmes solaires thermiques [7].
 - **Avantages:** Abondante, durable et accessible, peut être exploitée presque partout, utilisée pour le chauffage, l'éclairage et la production d'électricité.
 - **Inconvénients:** Limitée à une utilisation diurne ; nécessite des efforts continus pour développer des solutions de stockage de l'énergie pour une utilisation nocturne.
- **Énergie éolienne:** Captée à partir de l'énergie cinétique de l'air en mouvement, généralement exploitée par des éoliennes pour produire de l'électricité [8].
 - **Avantages:** Une source d'énergie en croissance rapide, utilisée dans plusieurs applications telles que le pompage de l'eau et la production d'électricité. Les éoliennes peuvent être installées à différentes échelles, des petits parcs éoliens locaux aux grands parcs offshore.
 - **Inconvénients:** Elles peuvent avoir un impact visuel et sonore négatif, ainsi que des effets sur la faune aviaire. De plus, leur production d'énergie est intermittente et dépendante du vent, ce qui nécessite une intégration complexe dans les réseaux électriques. Leur coût initial est élevé et elles occupent beaucoup d'espace.
- **Hydroélectricité (énergie hydroélectrique):** Également connue sous le nom d'énergie hydroélectrique, est une forme d'énergie renouvelable produite à partir de la conversion de l'énergie cinétique de l'eau en électricité en exploitant la force de l'eau en mouvement pour faire tourner des turbines[9].
 - **Avantages:** Incluent son aspect économique, sa fiabilité traditionnelle, et l'absence d'émissions directes de gaz à effet de serre.
 - **Inconvénients:** Provoque d'importantes pertes de terres, l'évaporation de l'eau et des perturbations écologiques, a un impact sur les personnes vivant dans les zones touchées.
- **Énergie géothermique:** Extraite de la chaleur interne de la Terre, elle est souvent utilisée pour chauffer des bâtiments, produire de l'électricité et d'autres applications industrielles [9].

- **Avantages:** Exploite la chaleur de la Terre provenant des sources chaudes et des geysers, utilisée pour le chauffage et l'électricité.
 - **Inconvénients:** Limitée à des zones géothermiques spécifiques.
- **Biomasse:** Dérivée de matières organiques, telles que les plantes et les déchets animaux, elle peut être utilisée pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburant [9].
- **Avantages:** Dérivée de substances organiques telles que les plantes et les animaux, elle peut produire de la chaleur, des carburants et de l'électricité.
 - **Inconvénients:** Brûler des arbres pour produire de la chaleur présente des risques pour l'environnement, notamment la déforestation et ses conséquences associées.

5. Intermittence et hybridation énergétique

L'utilisation des énergies renouvelables est principalement basée sur des flux naturels tels que le soleil pour l'énergie photovoltaïque, la chaleur du sol pour l'énergie géothermique, les réservoirs d'eau pour l'hydroélectricité, le vent pour l'énergie éolienne, etc. L'intermittence énergétique, caractéristique des sources renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire, pose des défis importants pour la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques. Ces sources produisent de l'électricité en fonction des conditions météorologiques, qui peuvent fluctuer et ne sont pas toujours prévisibles.

L'une des principales solutions est le développement de systèmes de stockage d'énergie. Les batteries à grande échelle, telles que les batteries lithium-ion, ainsi que les installations de pompage-turbinage, sont capables de stocker l'électricité excédentaire produite pendant les périodes de forte production. Cette énergie stockée peut ensuite être libérée pendant les périodes de faible production, assurant un approvisionnement plus constant en électricité sur le réseau.

Les stratégies de réponse à la demande jouent également un rôle crucial dans la gestion de l'intermittence énergétique. En ajustant les schémas de consommation d'électricité pour correspondre à la disponibilité de l'énergie renouvelable, les industries et les consommateurs peuvent optimiser leur utilisation. Cela inclut le déplacement des activités énergivores vers les moments où la production d'énergie renouvelable est élevée. En plus, les technologies avancées de gestion et de prévision des réseaux sont essentielles pour optimiser l'utilisation des énergies renouvelables.

Les systèmes hybrides, qui combinent différentes sources d'énergie renouvelable telles que l'éolien et le solaire, ou qui intègrent les sources renouvelables avec les énergies fossiles

traditionnelles, fournissent un approvisionnement en énergie plus fiable. Cette approche exploite les avantages de chaque source d'énergie pour minimiser les impacts de l'intermittence.

En conclusion, traiter l'intermittence énergétique est essentiel pour la transition vers un système énergétique durable et résilient. En mettant en œuvre ces solutions complètes, nous pouvons garantir que les sources d'énergie renouvelable jouent un rôle plus important dans la satisfaction de nos besoins énergétiques futurs tout en maintenant la stabilité et la fiabilité du réseau électrique [40].

6. Énergies renouvelables à l'échelle mondiale

Ces dernières années, les économies du monde entier se détournent visiblement des combustibles fossiles et adoptent les sources d'énergie renouvelables, marquant ainsi une nette tendance à l'adoption de l'énergie durable [10].

- **Canada: Un pionnier dans le développement des énergies renouvelables**

Le Canada, qui tire parti de sa vaste masse continentale et de sa géographie diversifiée, promeut activement les énergies renouvelables. L'hydroélectricité en constitue la majeure partie, contribuant à hauteur de 60% à la production d'électricité du Canada. La biomasse et l'énergie éolienne jouent également un rôle important, avec respectivement 23% et 5%. Le Canada vise à ce que 90% de son électricité provienne de sources non émettrices d'ici 2030 et a promis des fonds importants, notamment un programme de 964 millions de dollars pour les projets d'énergie renouvelable [11].

- **L'Europe: Des objectifs ambitieux en matière d'énergies renouvelables**

En 2019, les énergies renouvelables représentaient 19,7% de la consommation d'énergie dans l'UE, se rapprochant ainsi de l'objectif de 20% fixé pour 2020. La Suède arrive en tête avec 56,4% d'énergie renouvelable, suivie par la Finlande et la Lettonie. Le vent et l'eau contribuent chacun à hauteur de 35% à l'électricité renouvelable en Europe, le solaire connaissant une croissance rapide, atteignant 125,7 TWh en 2019. L'UE vise à porter la part des énergies renouvelables à 40% de la consommation finale d'ici à 2030, avec le soutien du Fonds de transition juste, doté de 46 milliards d'euros [12,13].

- **États-Unis: Croissance rapide des énergies renouvelables**

Les énergies renouvelables sont la source d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide aux États-Unis, ayant doublé entre 2000 et 2018. En 2018, elles représentaient 17% de la production nette d'électricité. Cette part devrait atteindre 20 % d'ici 2020, l'énergie éolienne dépassant l'hydroélectricité. La capacité de production d'énergie solaire a atteint plus de 81 GW, représentant 12% de la consommation totale d'énergie. Les États-Unis ont fixé des objectifs ambitieux, notamment un investissement de 2000 milliards de dollars et la décarbonisation complète du secteur de l'électricité d'ici 2035 [12].

- **L'essor des énergies renouvelables dans la région APAC**

La région Asie-Pacifique (APAC) connaît une augmentation sans précédent de la demande d'énergie renouvelable, étant reconnue comme celle qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Pour répondre à ce besoin croissant, la région APAC a investi de manière significative dans les technologies et les infrastructures liées aux énergies renouvelables, visant une augmentation remarquable de la capacité d'environ 2 TW d'ici 2030.

Le rapport REN21 sur l'état des énergies renouvelables en Asie et dans le Pacifique décrit les différentes pénétrations des énergies renouvelables dans les sous-régions. En tête, l'Asie du Sud-Est affiche un taux de pénétration moyen impressionnant de 45,7 %, suivie de près par l'Asie du Sud (42%). En revanche, l'Asie centrale et l'Asie du Nord-Est sont à la traîne avec des parts plus faibles, respectivement de 16,2% et 11,7% en moyenne.

Malgré des taux de pénétration variables, il existe une tendance perceptible vers un bouquet énergétique plus diversifié dans l'ensemble de l'APAC. Wood Mackenzie prévoit un doublement des investissements dans la production d'énergie renouvelable, atteignant 1,3 billion de dollars américains d'ici 2030. L'éolien et le solaire, notamment défendus par la Chine et l'Inde, sont appelés à jouer un rôle central, avec une nouvelle capacité de 430 GW jusqu'en 2027 [14,15]. La Figure 1.6 montre la production d'énergie renouvelable moderne par source pour plusieurs régions.

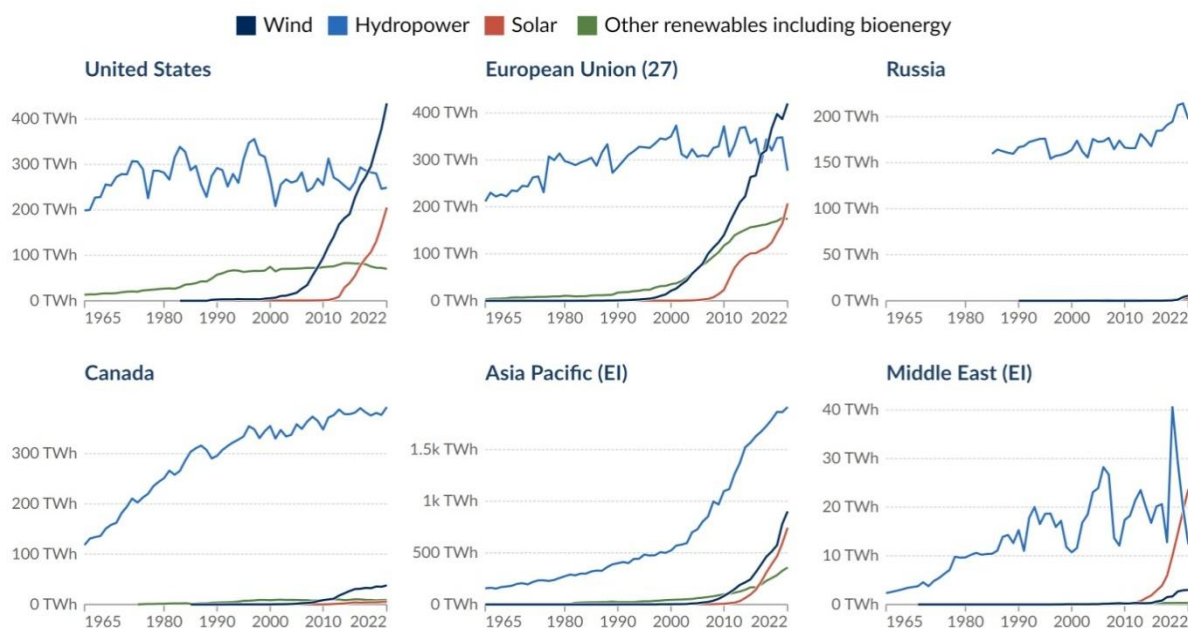


Figure 1.6. Production d'énergie renouvelable moderne par source.

6.1. État et tendances énergétiques mondiales en 2024

Le paysage énergétique mondial est en pleine mutation, marqué par une interaction dynamique entre les combustibles fossiles et les sources renouvelables. Alors que nous naviguons à travers les complexités de cette évolution énergétique, il est primordial de comprendre l'état actuel des choses. Cette introduction ouvre la voie à une exploration complète des subtilités de la transition énergétique, en se penchant sur les statistiques, les tendances et les développements récents.

Les données prévisionnelles de DNV anticipent une réduction significative des émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie d'ici 2050, avec une diminution de 46 % par rapport aux niveaux actuels. Toutefois, le chemin parcouru jusqu'ici montre que d'ici 2030, les émissions ne devraient être que marginalement inférieures à celles d'aujourd'hui, ce qui souligne l'urgence de changements significatifs dans les politiques et les pratiques énergétiques.

Le paysage énergétique en 2024 subit des changements et d'importantes transformations marquées par des changements dans les modes de consommation et une transition vers des sources d'énergie plus propres, reflétant un engagement mondial en faveur de pratiques durables et l'impératif de lutter contre le changement climatique. Les principales tendances qui façonnent le secteur de l'énergie sont les suivantes [16]:

- **La domination des combustibles fossiles persiste:** Malgré une augmentation de 1 % des énergies renouvelables, les combustibles fossiles conservent leur emprise sur la consommation mondiale d'énergie [17].

- **Croissance prévue:** Une augmentation de 1,8 % de la consommation mondiale d'énergie est attendue en 2024, principalement en raison de la forte demande en Asie [17].
- **Impact des énergies renouvelables:** La croissance des énergies renouvelables n'a pas réduit de manière significative la domination des combustibles fossiles, ce qui souligne la dépendance continue à l'égard des sources traditionnelles [20].

Ces tendances indiquent que, bien que des progrès soient réalisés vers des pratiques énergétiques plus durables, il reste encore beaucoup à faire pour réduire la dépendance mondiale aux combustibles fossiles et atteindre les objectifs de réduction des émissions de CO₂.

En ce qui concerne les tendances en matière de coût et de consommation nette zéro, la transition vers le « **zéro net** » est économiquement et écologiquement avantageuse par rapport à la poursuite de l'utilisation des combustibles fossiles. Les énergies renouvelables deviennent économiquement compétitives, dans certains cas, moins chères que les combustibles fossiles, renforçant ainsi leur compétitivité économique [18].

En ce qui concerne les investissements dans les **technologies d'énergie propre** en 2024, une prévision de près de 800 milliards de dollars souligne l'importance croissante accordée à l'énergie propre. La tendance en matière d'énergies renouvelables se poursuit en 2024, mettant l'accent sur un avenir vert et décentralisé [19,20].

De plus, la transition vers les **véhicules électriques (VE)** reflète l'importance croissante accordée à la dé-carbonisation du secteur des transports [17].

6.2. Technologies émergentes avec des exemples

Les énergies renouvelables sont essentielles pour lutter contre le changement climatique, et les technologies émergentes jouent un rôle crucial dans la promotion de la durabilité. On peut citer les exemples suivants:

- **Énergie solaire flottante:** Les panneaux photovoltaïques installés sur des structures flottantes dans des plans d'eau, comme l'illustre la centrale chinoise de 150 MW, offrent une solution là où les terrains sont rares, en fournissant une énergie durable à des milliers de foyers. Par exemple, le réservoir du barrage de Yamakura au Japon préserve les terres et produit de l'énergie propre [21,34].
- **Énergie géothermique:** L'Islande est pionnière dans l'exploitation de la chaleur du noyau de la Terre, couvrant 85 % de ses besoins énergétiques grâce à des sources géothermiques. Cette technologie contribue à la production d'électricité et au

chauffage durable des bâtiments. La centrale géothermique d'Hellisheidi en Islande, la plus grande au monde, en est un exemple remarquable [22,37].

- **Énergie marémotrice:** Des projets tels que MeyGen, situés dans les îles Orcades en Écosse, exploitent les marées océaniques pour produire de l'électricité à l'aide de turbines installées dans les courants de marée. Ces projets démontrent le potentiel de cette technologie pour alimenter les foyers et réduire la dépendance aux sources d'énergie conventionnelles [23,24].
- **Énergie d'hydrogène:** Des pays du monde entier, dont le Royaume-Uni et le Japon, poursuivent activement des stratégies en matière d'hydrogène vert afin de faire progresser leurs transitions énergétiques durables. L'essor des véhicules à pile à combustible, mené par des entreprises pionnières comme Toyota et Honda, utilise l'hydrogène comme source de carburant propre. L'électrolyse est utilisée pour produire de l'hydrogène, contribuant ainsi à un secteur des transports durable [25,26]. L'entreprise allemande CoradiaiLint illustre cet engagement avec son train alimenté par une pile à combustible à hydrogène, qui n'émet que de la vapeur d'eau. Le Japon, précurseur dans ce domaine, a lancé sa stratégie de l'hydrogène vert en 2017 [36].
- **Bioénergie avec captage et stockage du carbone (BECCS):** La BECCS consiste à extraire la bioénergie de la biomasse tout en capturant et stockant les émissions de carbone. Cette technologie contribue à l'élimination du carbone, répondant ainsi aux préoccupations liées au changement climatique. La centrale électrique de Drax, au Royaume-Uni, explore la technologie BECCS pour capturer et stocker les émissions de dioxyde de carbone provenant de la combustion de la biomasse [27].
- **Véhicules électriques (VE) avec stations de recharge à énergie renouvelable:** Il s'agit de l'intégration des véhicules électriques aux sources d'énergie renouvelable pour la recharge. L'utilisation de panneaux solaires ou d'autres énergies renouvelables pour charger les VE favorise un transport durable. Un exemple notable est la grande station de recharge de véhicules électriques à Guangzhou, en Chine, alimentée par des panneaux solaires [28].
- **Systèmes de réseaux intelligents:** Les réseaux intelligents sont des réseaux électriques utilisant la technologie numérique pour la communication bidirectionnelle. Ils optimisent la distribution de l'énergie, améliorent l'efficacité et intègrent des sources d'énergie renouvelables, permettant ainsi une gestion intelligente de l'électricité. Un exemple notable est la mise en œuvre par la Pacific Gas and Electric

Company aux États-Unis, qui optimise la distribution d'énergie renouvelable et réduit le gaspillage d'énergie [29].

- **Solutions de stockage (batteries lithium-ion et stockage hydroélectrique par pompage):** Le stockage de l'énergie consiste à emmagasiner l'énergie excédentaire en vue d'une utilisation ultérieure. Les batteries lithium-ion et l'hydroélectricité par pompage sont des méthodes couramment utilisées. Les batteries lithium-ion stockent l'électricité par voie chimique, tandis que le pompage hydraulique utilise l'énergie potentielle gravitationnelle. Un exemple notable est le Tesla Powerpack, un système de stockage par batteries lithium-ion qui permet de stocker l'énergie renouvelable excédentaire et de stabiliser le réseau [30,31,38].
- **Systèmes de gestion de l'énergie basés sur l'intelligence artificielle (IA):** Ces systèmes exploitent l'intelligence artificielle pour optimiser la consommation d'énergie. L'IA analyse les données en temps réel et propose des solutions pour une utilisation efficace de l'énergie, contribuant ainsi au développement durable et à la réduction du gaspillage d'énergie. Un exemple notable est la plateforme EnergyIP Smart Grid de Siemens, qui utilise l'IA pour analyser les données et fournir des solutions de gestion de l'énergie en temps réel [32,33,39].

7. Etat de l'énergie en Algérie

L'Algérie, pays historiquement dépendant des énergies fossiles, est un important producteur et exportateur de pétrole et de gaz. Cependant, elle possède également l'un des plus importants potentiels d'énergies renouvelables au monde, notamment en énergie solaire, en raison de sa situation géographique favorable. Cela offre des opportunités pour réussir la transition énergétique en diversifiant les ressources et en minimisant les émissions de gaz à effet de serre du secteur de l'énergie [40].

7.1. Production et consommation d'énergie

La production énergétique en Algérie est essentiellement caractérisée par une dépendance excessive aux hydrocarbures, principalement le pétrole et le gaz naturel, qui constituent 93,6% de ses exportations. Environ 90% de l'électricité en Algérie est principalement produite à partir de centrales au gaz naturel. Actuellement, l'Algérie ne produit qu'une petite partie de son électricité à partir de sources renouvelables, soit seulement 3% ou 686 MW par an,

provenant de l'énergie solaire (448 MW), de l'énergie hydraulique (228 MW) et de l'énergie éolienne (10 MW).

Les experts prévoient que d'ici 2035, le pays devra renoncer aux recettes des exportations d'hydrocarbures pour répondre à la demande intérieure croissante en électricité, à moins que des ressources renouvelables significatives ne soient ajoutées au mix de production d'électricité [40,41,42].

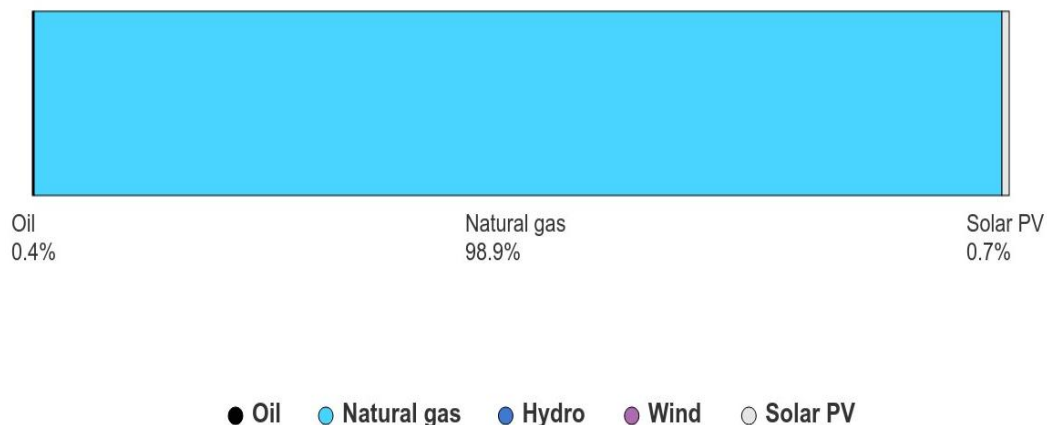


Figure 1.7. Source de production d'électricité en Algérie (2021).

La consommation totale d'énergie a augmenté de 3% en 2022 pour atteindre 66 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep), après une croissance de 6% en 2021 et une baisse de 5% en 2020. En moyenne, la consommation a augmenté régulièrement de 5% par an sur la période 2010-2019. La consommation totale de 66,65 milliards de kWh d'énergie électrique par an souligne l'importance de l'énergie pour alimenter l'économie algérienne et soutenir ses industries, ses transports et ses ménages.

De plus, la consommation moyenne d'énergie par habitant de 1484 kWh donne une idée des besoins énergétiques de la population et du potentiel de croissance du secteur de l'énergie. Dans l'ensemble, ces informations soulignent le rôle essentiel que joue l'énergie dans le développement de l'Algérie et mettent l'accent sur la nécessité de trouver des solutions énergétiques durables et efficaces pour répondre à la demande croissante d'énergie du pays [43].

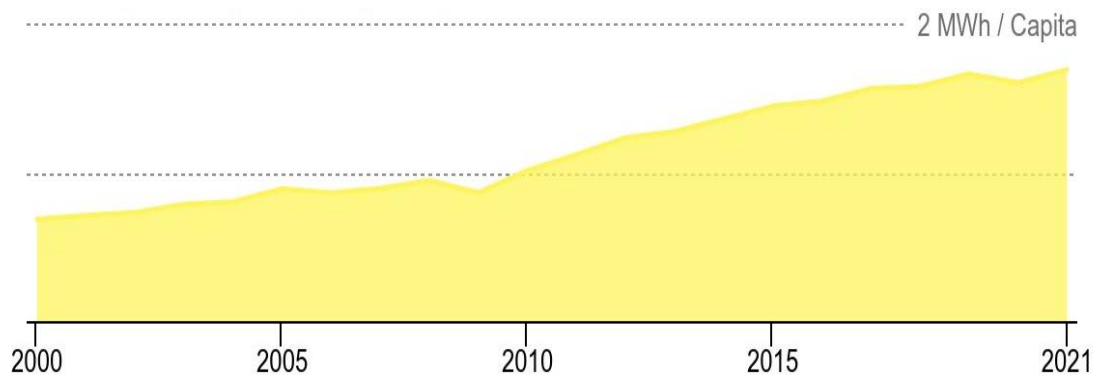


Figure 1.8. Consommation de l'électricité par habitant en Algérie.

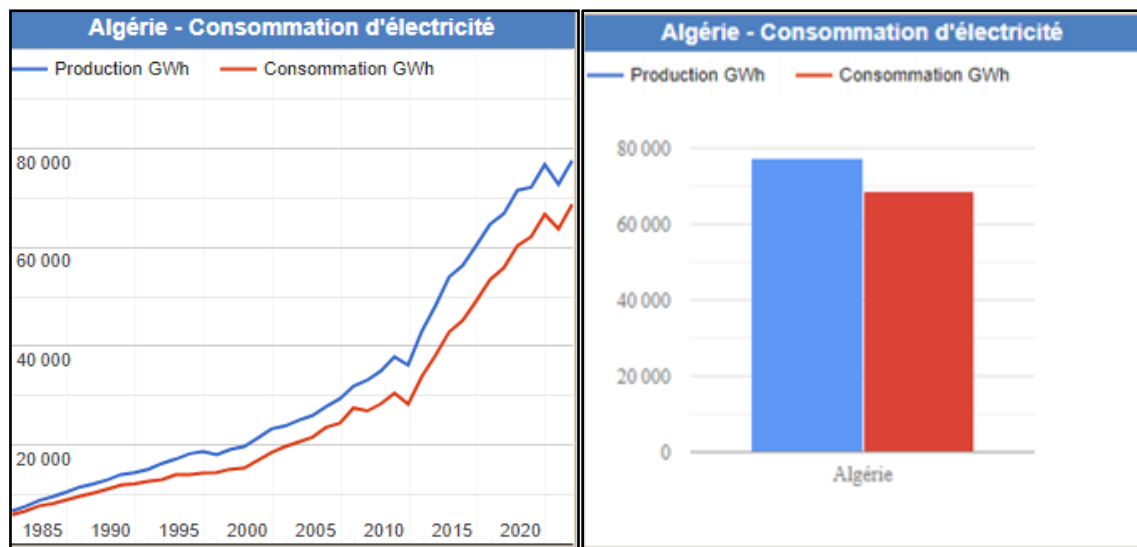


Figure 1.9. Production et consommation de l'électricité en Algérie [44].

7.2. Emission de CO₂

La combustion de combustibles fossiles contribue de manière significative aux émissions de CO₂. Selon des rapports récents, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) de l'Algérie ont connu une augmentation notable de 4,051 mégatonnes en 2021, soit une hausse de 2,4% par rapport à l'année précédente. Les émissions totales de CO₂ pour l'année 2021 ont été estimées à environ 173,001 mégatonnes, ce qui place l'Algérie à la 152^e place sur 184 pays classés en fonction de leurs émissions de carbone. Outre les émissions totales de CO₂, l'analyse des émissions par habitant est également cruciale. Les émissions de CO₂ par habitant de l'Algérie étaient de 3,93 tonnes en 2021, ce qui est préoccupant [45]. Pour lutter contre la détérioration de la qualité de l'environnement, l'Algérie s'est engagée dans divers cadres mondiaux. L'Algérie a été l'un des pays en développement qui ont participé à l'Accord de Paris de 2015, s'engageant à réduire les émissions de CO₂ d'un minimum de 7% d'ici 2030.

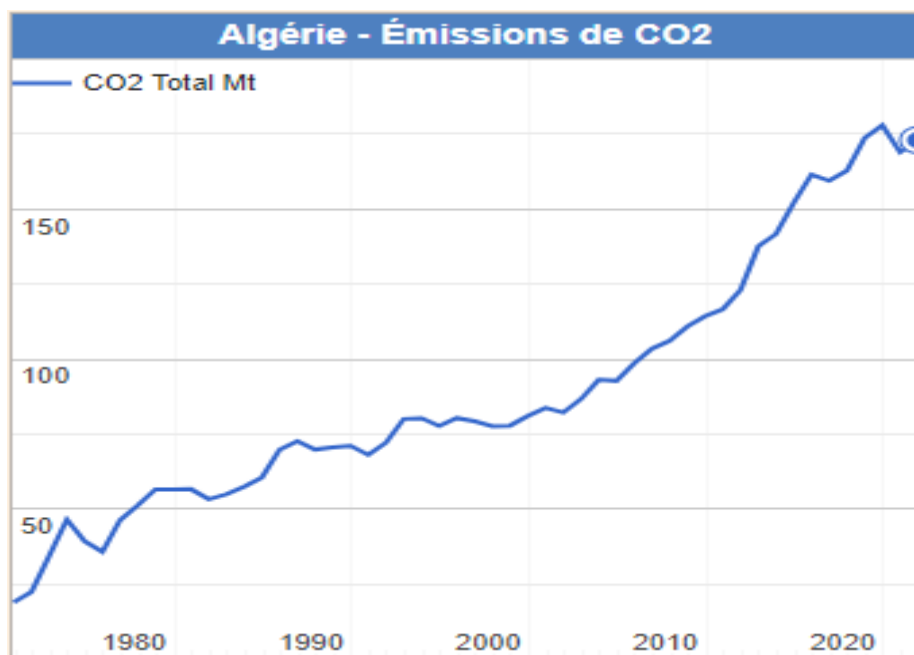


Figure 1.10. Emissions de CO2 en Algérie [45].

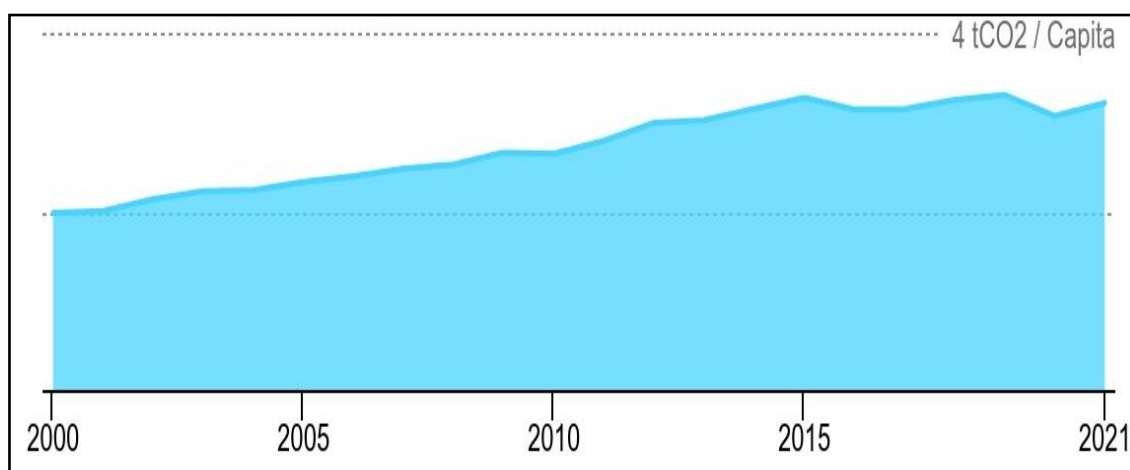


Figure 1.11. Emissions de CO2 par habitant en Algérie.

8. Transition énergétique en Algérie

L'Algérie, tout comme de nombreux pays à travers le monde, a lancé son plan d'action gouvernemental pour la mise en œuvre du programme de transition énergétique. Le premier programme national dédié au développement et à la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) a été adopté par le gouvernement Algérien le 3 février 2011. Ce programme ambitieux vise à atteindre un taux de 40% de la capacité de production d'électricité d'origine renouvelable, soit environ 22 000 MW, d'ici à l'horizon 2030 [46].

Le programme national de transition énergétique en Algérie est structuré selon différentes filières technologiques. Le solaire photovoltaïque représente la plus grande part avec 13575

MW prévus, suivi de l'éolien avec 5010 MW, le solaire thermique avec 2000 MW, la biomasse avec 1000 MW, la cogénération avec 400 MW, et enfin la géothermie avec 15 MW. Ce programme ambitieux vise non seulement à diversifier les sources d'énergie mais aussi à réduire la dépendance au gaz naturel. En effet, les 22000 MW de capacité de production d'électricité renouvelable permettront d'épargner environ 300 milliards de m³ de gaz naturel, soit un volume équivalent à huit fois la consommation nationale de l'année 2014. Ce projet est une étape cruciale dans la transition vers une économie énergétique plus durable pour l'Algérie.

En termes de potentiel, l'Algérie dispose d'abondantes ressources renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et la biomasse. En ce qui concerne l'énergie solaire, l'Algérie bénéficie de niveaux d'irradiation solaire parmi les plus élevés au monde, capable de générer entre 1850 et 2100 kilowattheures par mètre carré et par an, avec jusqu'à 3500 heures d'ensoleillement par an dans ses régions désertiques.

De plus, l'Algérie possède un littoral méditerranéen de 1200 kilomètres exposé à des vents. Selon les études, le Sud est caractérisé par des vitesses de vent plus élevées que le Nord, particulièrement dans le Sud-est où les vitesses dépassent 7 m/s, atteignant même plus de 8 m/s dans la région de Tamanrasset.

Concernant le Nord, on observe généralement des vitesses moyennes plus faibles. Cependant, des microclimats sont présents sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, ainsi que sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El Bayadh, où les vitesses de vent sont de l'ordre de 6 à 7 m/s. Dans le Grand Sud, les vitesses dépassent 8 m/s, offrant un potentiel éolien significatif pour le développement des énergies renouvelables en Algérie [46,47].

L'énergie solaire photovoltaïque est une option très prometteuse pour l'Algérie en raison de plusieurs facteurs. Tout d'abord, l'Algérie bénéficie d'un potentiel solaire exceptionnel, avec une irradiation solaire moyenne d'environ 2000 à 3500 kWh/m²/an, ce qui en fait un lieu idéal pour exploiter cette énergie. De plus, le pays dispose de vastes zones désertiques peu peuplées, offrant un espace ample pour des installations solaires PV à grande échelle sans concurrence avec les terres agricoles ou urbaines. L'investissement dans le solaire PV permettrait à l'Algérie de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles, de renforcer sa sécurité énergétique et de diversifier son mix énergétique, ce qui est crucial pour passer d'une économie dépendante des hydrocarbures. Sur le plan environnemental, le solaire PV est une source d'énergie propre qui ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre pendant son fonctionnement, aidant ainsi l'Algérie à atteindre ses objectifs climatiques et à réduire son

empreinte carbone. Le coût de la technologie solaire PV a également considérablement diminué au fil des ans, la rendant plus viable économiquement par rapport à d'autres sources d'énergie. Enfin, le gouvernement algérien montre un soutien croissant pour les énergies renouvelables à travers des politiques, des incitations et des initiatives visant à promouvoir le développement et l'adoption du solaire PV. En raison de tous ces avantages, l'énergie solaire photovoltaïque est bien placée pour jouer un rôle significatif dans l'avenir énergétique de l'Algérie.

L'énergie solaire photovoltaïque trouve des applications dans de nombreux domaines : dans le secteur résidentiel, dans le secteur commercial et industriel, en agriculture, dans le domaine du transport, ainsi que dans les applications portables, telles que les chargeurs solaires pour appareils électroniques et l'éclairage solaire portable, souvent utilisé dans les situations d'urgence et les feux de signalisation solaires.

L'éclairage extérieur et les infrastructures publiques sont l'une des applications importantes de ces énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire photovoltaïque. En Algérie, une part importante de la consommation d'énergie électrique est dédiée à l'éclairage extérieur, soit 6 500 mégawatts en 2021, ce qui représente 40% de la consommation électrique globale dans le pays. Avec de vastes zones urbaines et de nombreuses infrastructures publiques, l'éclairage des rues, des places et des espaces extérieurs nécessite une quantité importante d'énergie.

Face à cette situation, en 2019, le Ministère de l'Intérieur, des Collectivités Locales et de l'Aménagement du Territoire (MICLAT) a accompli des réalisations significatives dans le domaine de l'énergie solaire. Pour l'éclairage public, 15150 nouveaux points lumineux photovoltaïques ont été installés, accompagnés par la substitution de 265 758 lampes énergivores par des luminaires LED, totalisant une capacité de 1515 KWc. En matière d'électrification, 348 écoles primaires, dont 96 situées dans des zones reculées, ont été équipées de systèmes photovoltaïques, représentant une capacité de 3610 KWc. De plus, 3550 kits solaires individuels ont été fournis à des foyers sans accès à l'électricité, avec une capacité de 4021 KWc. Enfin, 3500 points lumineux solaires ont été installés près des plages et dans les forêts récréatives, ainsi que des bornes solaires pour la recharge des batteries, totalisant 4197 KWc. En somme, les projets réalisés par le MICLAT ont cumulé une capacité de 9146 KWc, démontrant un engagement fort envers les énergies renouvelables [47].

9. Conclusion

Après avoir présenté l'état de l'art sur la situation énergétique mondiale et algérienne à partir de statistiques récentes provenant de différentes sources spécialisées dans le secteur de l'énergie, il apparaît que les énergies fossiles, bien que longtemps dominantes, présentent des enjeux majeurs tels que l'épuisement des ressources, les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance économique. Cette évolution montre clairement que la transition énergétique est inévitable. En réponse à ces défis, les nouvelles énergies renouvelables émergent comme une alternative cruciale, offrant des avantages environnementaux, économiques et durables. Cette transition ne se limite pas à un simple remplacement des sources d'énergie, mais implique un changement fondamental dans notre manière de produire, distribuer et consommer de l'énergie.

Notre sujet de mémoire sur l'hybridation énergétique solaire photovoltaïque et éolienne avec stockage pour l'éclairage extérieur dans le milieu universitaire est en lien avec les perspectives des pays en termes d'intégration des énergies renouvelables, d'efficacité énergétique et de transition énergétique.

Le chapitre 2 sera dédié à la description des différentes parties et à la modélisation des composants du système hybride, au logiciel de simulation, à la méthodologie de l'étude, ainsi qu'à la présentation des critères de l'évaluation techno-économique et à la discussion sur la consommation et les courbes de charge.

Chapitre 2

Modélisation du système hybride PV-éolien-stockage

*Chapitre 02**Modélisation du système hybride PV-éolien-stockage***1. Introduction**

L'éclairage sur les campus universitaires est un aspect crucial, ayant un impact à la fois sur la sécurité et l'esthétique. La transition énergétique vers les énergies renouvelables dans ce secteur est une priorité, notamment dans le contexte de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de promotion de la durabilité. Les systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergie représentent une solution prometteuse à ces défis.

Ce chapitre se concentre sur la modélisation d'un système hybride PV-éolien-batterie visant à optimiser l'approvisionnement énergétique de l'éclairage sur un campus universitaire. La méthodologie employée comprend une description détaillée de l'étude de cas choisie, tenant compte des spécificités climatiques et géographiques du site. L'évaluation des ressources énergétiques disponibles, telles que le potentiel solaire et éolien, est cruciale pour dimensionner correctement le système. Cela est suivi par une description de l'architecture du système, incluant des panneaux solaires, des éoliennes, des batteries de stockage et des onduleurs.

Les composants du système sont modélisés à l'aide du logiciel de simulation spécialisé HOMER, permettant d'analyser les performances énergétiques dans différentes conditions. Les données techniques d'entrée, telles que les caractéristiques des panneaux solaires, des éoliennes et des batteries, ainsi que les données économiques telles que les coûts d'installation et de maintenance, sont prises en compte.

Ces dernières années, de nombreuses recherches ont été menées sur la faisabilité et les avantages des systèmes d'éclairage alimentés par des énergies renouvelables. Ces études se concentrent principalement sur l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne pour répondre aux besoins d'éclairage, allant des applications à petite échelle comme les lampes solaires aux installations plus grandes, telles que les systèmes d'éclairage public. Par exemple, l'auteur dans [48] décrit un système d'éclairage public alimentés par l'énergie solaire. La référence [49] présente une étude de faisabilité économique de système d'éclairage solaire en Libye. Les technologies de l'énergie solaire et des diodes électroluminescentes (LED) sont proposées comme une solution pour la gestion de la demande d'éclairage public dans la référence [50]. La référence [51] fournit des recommandations et illustre l'impact local pour le Sultanat

d'Oman lorsque l'éclairage des rues est assuré par des LED alimentées par l'énergie solaire. L'évaluation des performances technico-économiques et des émissions de gaz à effet de serre (GES) de différentes configurations de systèmes hybrides pour la production d'hydrogène et d'électricité, visant à répondre aux besoins des transports publics et de l'éclairage public dans trois villes marocaines, est présentée dans [52]. Trois scénarios de systèmes d'éclairage public sont simulés avec des lampes conventionnelles, comme les lampes à sodium haute pression (SHP), incluant un système d'éclairage public solaire isolé, un système solaire raccordé au réseau et un système d'éclairage public solaire avec stockage et raccordement au réseau [53]. En outre, les systèmes solaires-éoliens sont étudiés dans un nombre limité de cas, notamment en Turquie [54], en Corée [55], en Indonésie [56], en Malaisie [57], et en Jordanie [58].

De nombreux logiciels ont été utilisés dans ces études pour la modélisation et l'étude des systèmes d'énergie renouvelable, chacun ayant sa propre spécialité, parmi les plus utilisés, on trouve:

1. HOMER: Optimisation des micro-réseaux.
2. PVSyst: Étude, dimensionnement et simulation des systèmes photovoltaïques.
3. SAM (System Advisor Model): Modèles de performance et financiers pour les projets d'énergie renouvelable.
4. RETScreen: Analyse de faisabilité des projets d'énergie renouvelable.
5. MATLAB/Simulink: Simulation et optimisation des systèmes d'énergie renouvelable.

D'après les études présentées dans la littérature, il existe un nombre limité d'études portant sur la configuration et l'intégration des systèmes photovoltaïques et des éoliennes pour l'éclairage en Algérie d'une part, et en particulier dans le milieu universitaire d'autre part.

2. Logiciel et méthodologie

2.1. Logiciel

Pour notre étude, nous avons utilisé le logiciel HOMER, spécialisé dans l'optimisation des micro-réseaux. HOMER nous a permis de simuler différentes configurations de systèmes énergétiques en combinant des sources d'énergie renouvelables et non renouvelables, des dispositifs de stockage et des réponses à la demande. Grâce à ses capacités de simulation et d'analyse, nous avons pu identifier la configuration optimale en termes de coûts, de performance et de fiabilité pour notre projet. Le logiciel prend en compte divers facteurs

économiques et techniques, ce qui nous a aidés à évaluer la viabilité et l'efficacité de différentes solutions énergétiques dans divers scénarios.

HOMER (Hybrid Optimization Model for Multiple Energy Resources) est un logiciel spécialisé dans la conception et l'optimisation des micro-réseaux et des systèmes énergétiques hybrides. Développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) des États-Unis, HOMER est largement utilisé pour modéliser les configurations optimales de systèmes énergétiques combinant des sources d'énergie renouvelables, des sources d'énergie non renouvelables, et des dispositifs de stockage. Il peut simuler une variété de sources d'énergie et de technologies pour déterminer la combinaison optimale pour un projet donné. Voici les principales sources d'énergie que HOMER peut intégrer et analyser [61].

1. Sources d'énergie renouvelable:

- **Énergie solaire:** Utilisation de panneaux photovoltaïques pour convertir la lumière du soleil en électricité.
- **Énergie éolienne:** Utilisation de turbines éoliennes pour convertir le vent en électricité.
- **Énergie hydraulique:** Utilisation de petites centrales hydroélectriques pour générer de l'électricité à partir de l'eau en mouvement.
- **Biomasse:** Utilisation de matières organiques (bois, déchets agricoles, etc.) pour produire de l'énergie via combustion ou gazéification.

2. Sources d'énergie conventionnelle:

- **Diesel:** Utilisation de générateurs diesel pour produire de l'électricité.
- **Gaz naturel:** Utilisation de générateurs au gaz naturel pour produire de l'électricité.

3. Technologies de stockage de l'énergie:

- **Batteries:** Stockage de l'énergie pour une utilisation ultérieure.
- **Hydrogène:** Production et stockage d'hydrogène pour une utilisation dans des piles à combustible.

4. Technologies de support

- **Réseau électrique:** Connexion à un réseau électrique existant pour acheter ou vendre de l'électricité.
- **Convertisseurs:** Utilisation d'onduleurs et de convertisseurs pour transformer l'énergie d'une forme à une autre.

HOMER permet aux utilisateurs de modéliser les performances de ces différentes sources d'énergie, de calculer les coûts associés, et de simuler différents scénarios pour identifier la solution la plus rentable et la plus durable pour un projet énergétique donné.

Dans le logiciel HOMER, les différentes charges peuvent être de types variés, notamment :

- **Charges électriques en AC ou DC:** HOMER permet de modéliser des charges électriques fonctionnant en courant alternatif ou en courant continu. Les charges en AC incluent typiquement les appareils ménagers, l'éclairage, les moteurs AC, etc.
- **Charges thermiques:** Les charges thermiques dans HOMER peuvent représenter la consommation d'énergie pour le chauffage, la ventilation, la climatisation (HVAC), les procédés industriels, etc. HOMER peut modéliser ces charges pour optimiser l'utilisation de sources d'énergie thermique renouvelable comme le solaire thermique.
- **Hydrogène:** HOMER permet également de modéliser des systèmes basés sur l'hydrogène, notamment les piles à combustible et les systèmes de stockage d'hydrogène.

Comme illustré à la Figure 2.1, le logiciel effectue trois tâches principales: simulation, optimisation, et analyse de sensibilité [60,61].

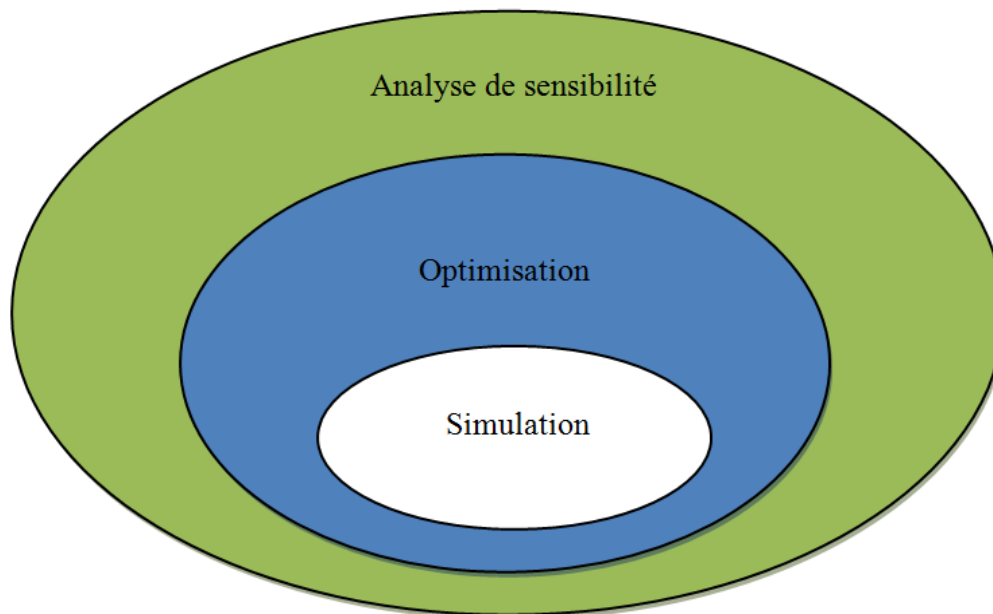


Figure 2.1. Différentes fonctions du logiciel HOMER [60].

1. Simulation: HOMER simule différentes configurations de systèmes énergétiques en prenant en compte les sources d'énergie renouvelables et non renouvelables, les dispositifs de stockage, et les stratégies de gestion de la demande. Cette simulation permet de comprendre

comment les différents composants du système interagissent et se comportent sous diverses conditions, telles que différents profils de charge, modèles météorologiques et disponibilité des ressources énergétiques.

2. Optimisation: HOMER optimise la conception et l'exploitation des systèmes énergétiques afin de trouver la solution la plus rentable et efficace. Il évalue de nombreuses configurations de système et tailles de composants pour minimiser les coûts, maximiser la fiabilité et répondre aux exigences de performance. Le processus d'optimisation prend en compte divers facteurs, tels que les coûts des équipements, les prix des combustibles, les coûts de maintenance et les critères de performance du système. Le logiciel fournit diverses variables de décision, telles que:

- La taille de l'installation photovoltaïque.
- Le nombre d'éoliennes.
- La taille de chaque générateur.
- Le nombre de batteries.
- La taille du convertisseur AC-DC.
- La stratégie de répartition (l'ensemble des règles régissant le fonctionnement du système)

3. Analyse de Sensibilité: HOMER effectue des analyses de sensibilité pour évaluer l'impact des changements dans les paramètres clés sur la performance du système et la faisabilité économique. Cela comprend la variation de facteurs tels que les prix des combustibles, les coûts des équipements et la disponibilité des ressources renouvelables. L'analyse de sensibilité aide les utilisateurs à comprendre la robustesse de la conception de leur système énergétique et à identifier les facteurs critiques influençant sa performance et son économie.

En résumé, ces tâches permettent aux utilisateurs de modéliser, optimiser et analyser efficacement les systèmes énergétiques, soutenant ainsi la prise de décision éclairée pour des solutions énergétiques durables et efficaces.

HOMER permet de simuler différents scénarios et d'optimiser la configuration du système en fonction des ressources disponibles et des besoins énergétiques.

2.2. Méthodologie

La première étape dans l'étude des systèmes d'énergie hybrides est de sélectionner un site d'étude approprié. Puis les étapes de l'évaluation des ressources sont résumées comme suit:

1. Collecte de données de ressources: Avant d'utiliser HOMER, il est crucial de rassembler des données précises sur les ressources énergétiques disponibles. Cela inclut:

- **Données solaires:** Information sur l'irradiation solaire moyenne mensuelle ou quotidienne, souvent obtenue à partir de bases de données météorologiques ou de mesures locales.
- **Données éoliennes:** Information sur la vitesse du vent, collectée par des anémomètres ou à partir de sources météorologiques.
- **Données de température:** Comme pour les données solaires et éoliennes, il est crucial de collecter des données précises sur la température ambiante pour la région d'intérêt. Ces données peuvent être obtenues à partir de sources météorologiques locales ou de bases de données climatiques.

2. Entrée des données dans HOMER: Les données collectées sont ensuite saisies dans HOMER. Cela comprend les ressources solaires, les ressources éoliennes, et la température pour chaque période de temps (heure, jour, mois).

Une fois les données collectées, elles sont importées dans HOMER. Cela implique de saisir les distributions des valeurs d'irradiation solaire, les vitesses du vent, ainsi que le profil de température. Ces informations permettent à HOMER de modéliser plus précisément les performances des panneaux photovoltaïques et des éoliennes en fonction des conditions climatiques locales.

Après l'importation des données, le système hybride est modélisé dans HOMER. Les spécifications techniques, les coûts, et l'efficacité des modules PV, des éoliennes, et des systèmes de stockage d'énergie sont définis. HOMER simule ensuite la production d'énergie des composants du système en fonction des données climatiques importées. Ces simulations permettent d'analyser la complémentarité des ressources solaires et éoliennes et d'optimiser la configuration du système pour répondre aux besoins énergétiques de manière efficace et fiable.

HOMER exécute des simulations pour divers scénarios et configurations afin d'identifier la solution optimale. Une analyse de sensibilité peut être réalisée pour étudier l'impact des variations de température, de vitesse du vent et d'irradiation solaire sur la performance du système. Les résultats sont présentés sous forme de rapports détaillés, comprenant des graphiques et des tableaux, qui facilitent l'interprétation des données et la prise de décisions informées. Ces rapports permettent de choisir les composants optimaux, d'analyser les coûts totaux et de déterminer la rentabilité du projet.

La méthodologie utilisée pour réaliser notre simulation est illustrée dans le diagramme de la figure 2.2.

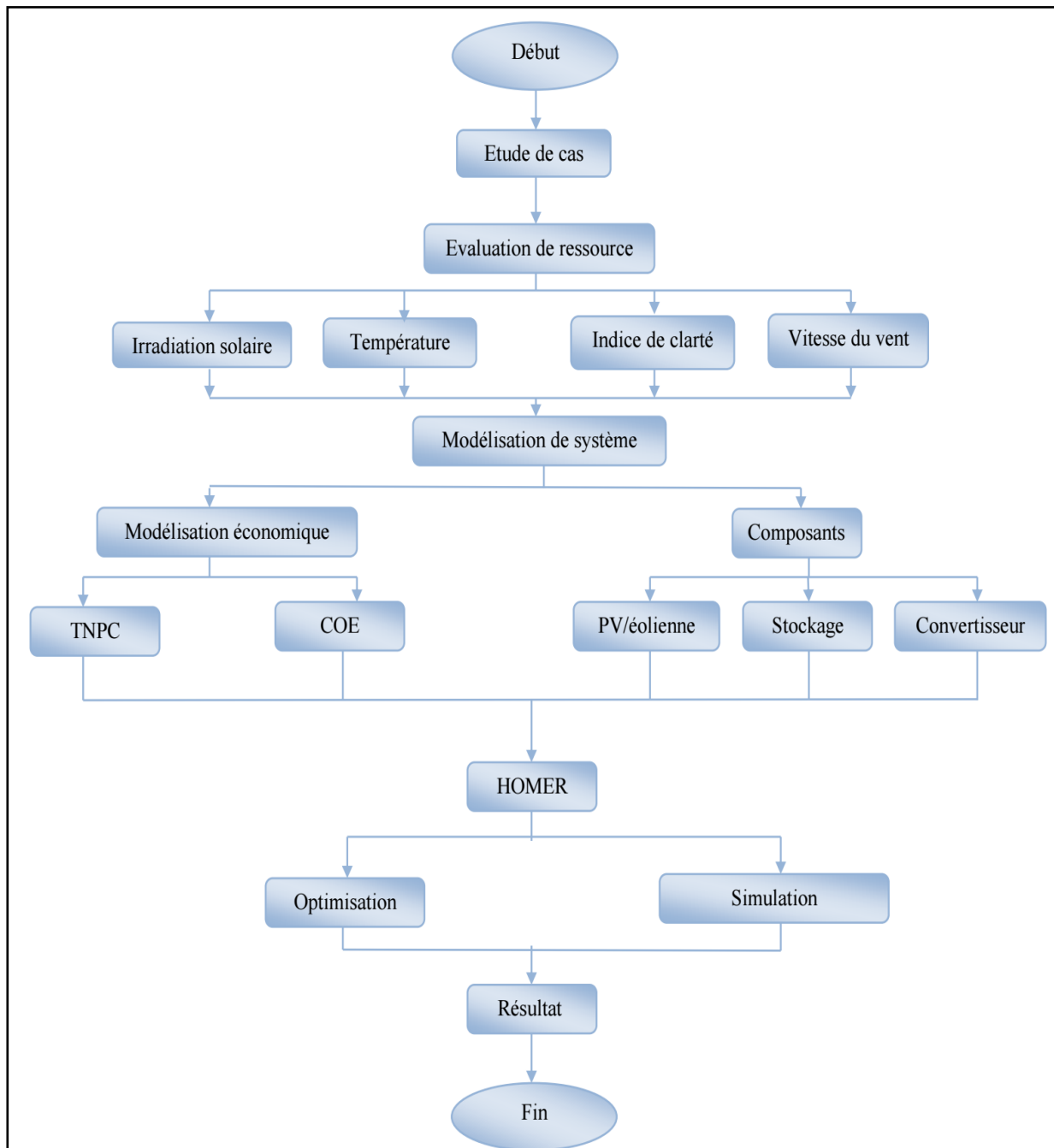


Figure 2.2. Méthodologie suivie pour la réalisation de l'étude.

3. Etude de cas - description

L'objectif principal de notre simulation est d'étudier un système énergétique hybride comme source d'énergie fiable et durable pour l'éclairage extérieur de l'université. Le choix du site constitue la première étape cruciale dans l'étude des systèmes d'énergie hybrides. Cela

implique de sélectionner une localisation spécifique où le système hybride d'énergie sera déployé et évalué. Cette sélection est cruciale car elle détermine les conditions environnementales, les ressources énergétiques disponibles (telles que le vent, le soleil, la biomasse, etc.) ainsi que les besoins énergétiques locaux. Cette étape permet de définir les paramètres de base nécessaires pour la modélisation et l'optimisation du système hybride d'énergie, en tenant compte des caractéristiques géographiques et climatiques spécifiques au site choisi. Le site sélectionné pour notre étude est l'université de Saïda Dr Moulay Tahar, géographiquement située aux coordonnées $34^{\circ} 51' 30.888''$ N, $0^{\circ} 9' 7.416''$ E. La localisation détaillée de la wilaya de Saïda et de l'université est clairement indiquée dans la figure 2.3.



Figure 2.3. Localisation et image Google Earth du site.

4. Evaluation de ressource

L'évaluation des ressources pour un système d'énergie hybride PV/éolien est une étape cruciale dans la planification et la mise en œuvre de telles installations. Cette évaluation consiste à analyser et quantifier les ressources énergétiques disponibles, telles que l'irradiation solaire, la vitesse du vent, et la température ambiante, qui sont essentielles pour une analyse approfondie, pour déterminer leur potentiel à produire de l'électricité de manière efficace et fiable. Notez que les données sont obtenues à partir de la NASA, qui fournit des bases de données climatiques et météorologiques détaillées pouvant être intégrées dans HOMER pour une analyse précise selon les coordonnées géographiques du site sélectionné. Ces résultats nous aideront sans aucun doute à prendre des décisions éclairées et à optimiser l'utilisation des ressources pour la réussite du projet.

4.1. Les ressources solaires

La figure 2.4 montre le profil mensuel de l'irradiation solaire et de l'indice de clarté. Après l'analyse approfondie des données, il apparaît clairement que l'indice de clarté et l'irradiation solaire connaissent des fluctuations notables tout au long de l'année. Sur la base des résultats, nous avons recueilli des observations et des informations précieuses qui peuvent aider à comprendre les tendances de ces variables.

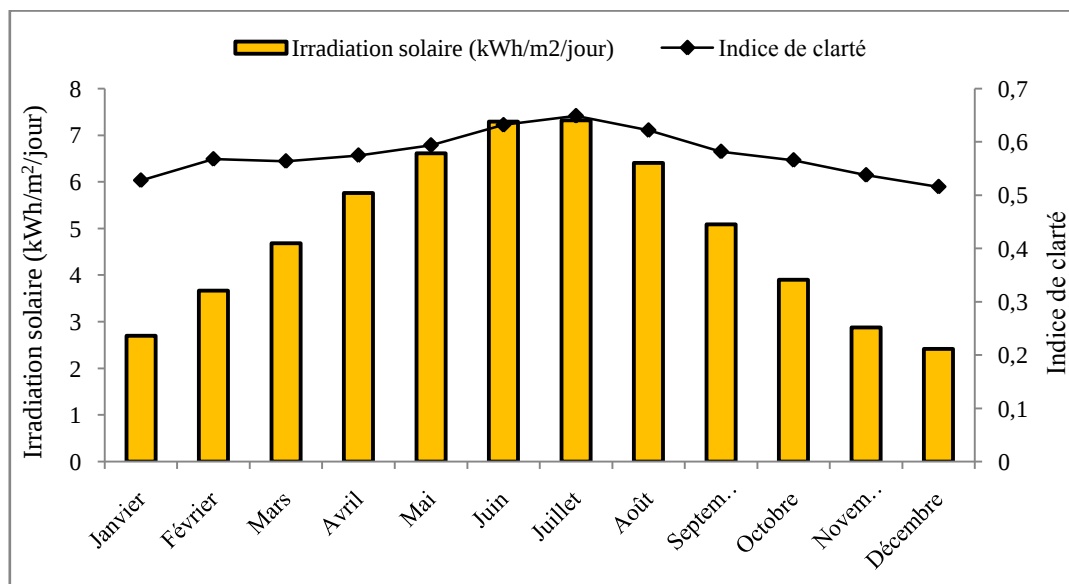


Figure 2.4. Profil d'irradiation solaire et d'indice de clarté.

Tout d'abord, en ce qui concerne l'évolution de l'indice de clarté, les données montrent que les valeurs ont tendance à varier de manière significative au cours de l'année, avec un indice

de clarté annuel moyen d'environ 0,582 ; il a un minimum de 0,516 en décembre et un maximum de 0,649 en juillet. Dans l'ensemble, l'indice de clarté a tendance à être plus élevé pendant les mois d'été, plus précisément entre juin et août, et plus faible pendant les mois d'hiver, de décembre à février. Cette tendance correspond aux conditions météorologiques typiques de nombreuses régions, où le ciel est souvent plus clair en été en raison de la diminution des nuages et des interférences atmosphériques, tandis que les hivers ont tendance à être plus nuageux.

Deuxièmement, l'analyse des données révèle une relation cohérente entre les valeurs d'irradiation solaire et l'indice de luminosité. L'irradiation solaire présente une variation saisonnière, avec des valeurs plus élevées enregistrées pendant les mois d'été et des valeurs plus faibles pendant les mois d'hiver. Plus précisément, l'irradiation solaire la plus faible est observée en décembre avec 2,420 kWh/m²/jour, tandis que la plus élevée est enregistrée en juillet avec 7,320 kWh/m²/jour. La moyenne annuelle de l'irradiation solaire est d'environ 4,885 kWh/m²/jour. En outre, le pic d'irradiation solaire coïncide avec les mois de juin et juillet, ce qui correspond à la période où l'indice de clarté est le plus élevé. Inversement, l'irradiation solaire minimale est observée en décembre et janvier, ce qui correspond aux mois où l'indice de clarté est le plus faible.

Troisièmement, l'analyse a également révélé que les variations de l'indice de clarté et de l'irradiation solaire peuvent être attribuées à plusieurs facteurs tels que les changements météorologiques saisonniers, la couverture nuageuse et l'angle d'ensoleillement. Pendant les mois d'été, le soleil est plus haut dans le ciel, ce qui se traduit par une lumière solaire plus directe et moins d'interférences atmosphériques, d'où des valeurs d'indice de clarté et d'irradiation solaire plus élevées. À l'inverse, pendant les mois d'hiver, l'angle du soleil est plus faible, ce qui augmente la probabilité de diffusion atmosphérique et de couverture nuageuse, qui réduit à la fois l'indice de clarté et les valeurs d'irradiation solaire.

Enfin, nous pouvons conclure que la compréhension des tendances saisonnières de l'indice de clarté et de l'irradiation solaire est cruciale pour diverses industries, y compris l'énergie solaire. Pour le secteur de l'énergie solaire, connaître les mois de pointe de l'irradiation solaire peut éclairer les décisions concernant les périodes optimales pour l'installation de panneaux solaires, la maintenance et la production d'énergie.

4.2. Vitesse de vent et température

Le graphique de la figure 2.5.démontrent l'évolution de vitesse de vent et température au cours de l'année.

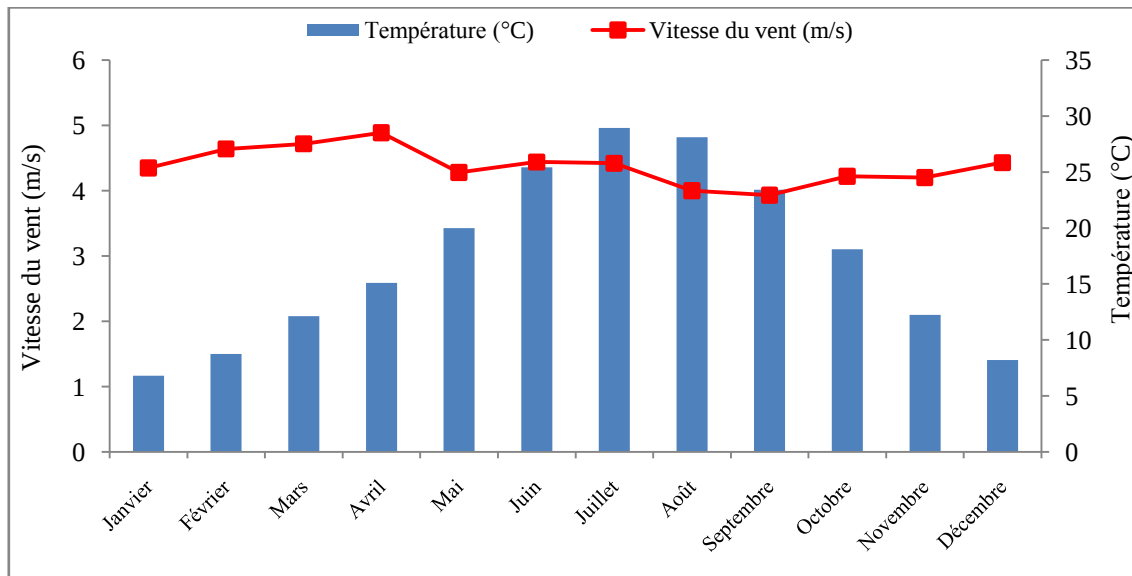


Figure 2.5. Profil mensuel de la vitesse du vent et de la température.

Les données fournies révèlent des informations essentielles sur les conditions climatiques d'une région donnée. Elles mettent en évidence les températures les plus élevées et les plus basses ainsi que la vitesse du vent tout au long de l'année. Selon les données, le mois de juillet enregistre la température la plus élevée (28,950°C), tandis que le mois de janvier est le plus froid, avec la température la plus basse (6,810°C). La température moyenne annuelle est d'environ 17,23°C.

Les données relatives à la vitesse du vent varient entre un minimum de 3,930 m/s en septembre et un maximum de 4,890 m/s en avril, ce qui indique une fluctuation saisonnière minime. La vitesse moyenne annuelle du vent est d'environ 4,370 m/s.

L'analyse des données révèle que la température augmente progressivement de janvier à juillet, puis commence à diminuer jusqu'en décembre, suivant le schéma saisonnier typique. La vitesse du vent, quant à elle, reste relativement stable tout au long de l'année, avec des fluctuations mineures.

Les variations de température peuvent être attribuées à des facteurs saisonniers, tels que l'inclinaison de l'axe terrestre et la distribution de l'énergie solaire. D'autre part, la vitesse du vent peut être affectée par des événements météorologiques locaux, tels que la pression atmosphérique et les systèmes de haute et basse pression.

Implications: La vitesse du vent et la température varient considérablement d'un mois à l'autre. Il est donc essentiel pour les producteurs d'énergie d'avoir une compréhension globale de ces schémas. Cette compréhension peut s'avérer précieuse dans de nombreux scénarios,

comme l'optimisation de la production d'énergie éolienne. Par exemple, les éoliennes produisent un maximum d'électricité lorsque la vitesse du vent se situe dans certaines limites.

Les producteurs d'énergie peuvent donc s'appuyer sur leur connaissance des régimes de vent pour planifier l'emplacement, l'orientation et la conception optimaux des éoliennes. De même, les variations de température peuvent affecter l'efficacité des panneaux solaires, et les producteurs d'énergie peuvent utiliser cette connaissance pour optimiser leur production. En résumé, une connaissance approfondie des régimes de vent et de température au cours des différents mois peut aider les producteurs d'énergie à optimiser leurs processus de production d'énergie renouvelable.

5. Configuration du système hybride

Le système hybride d'énergie solaire photovoltaïque-éolien-batterie combine plusieurs sources d'énergie renouvelable pour générer, stocker et distribuer efficacement de l'électricité. Le système se compose de plusieurs composants clés, chacun jouant un rôle crucial dans son fonctionnement. Le schéma global du système étudié est montré dans la figure 2.6.

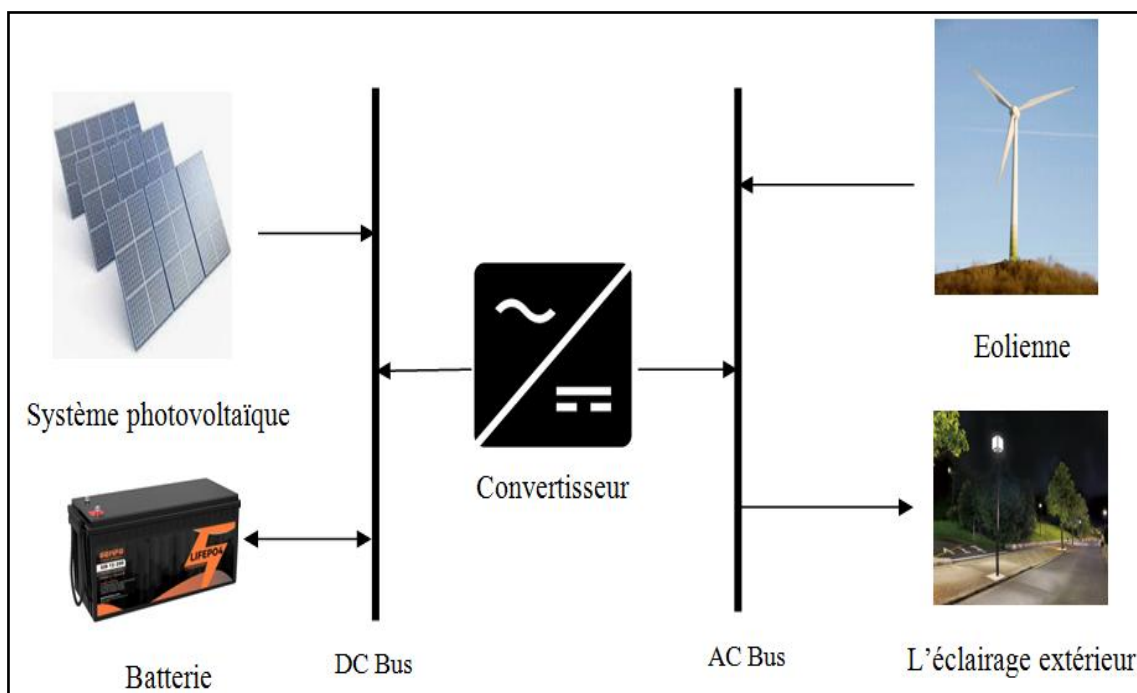


Figure 2.6. Schéma du système hybride photovoltaïque/éolien étudié.

5.1. System photovoltaïque

Les modules PV, ou panneaux solaires photovoltaïques, sont composés d'une série de cellules solaires semi-conductrices qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité en utilisant l'effet photovoltaïque. L'efficacité d'un panneau solaire dépend de divers facteurs tels que la qualité des matériaux, la quantité et l'intensité de la lumière solaire, et la conception des cellules. La puissance de sortie du système photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'irradiation solaire et de la température, qui peuvent être estimées à l'aide de la formule donnée dans l'équation (2.1) [59,63,64].

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T}{G_{T,CTS}} \right) [1 + \alpha_p (T_C - T_{C,CTS})] \quad (2.1)$$

Où, Y_{PV} (kW) est la capacité nominale du système PV, ce qui signifie sa puissance de sortie dans des conditions de test standard, f_{PV} (%) est le facteur de déclassement du PV. G_T (1 kW/m^2) est le rayonnement solaire incident. $G_{T,CTS}$ (1 kW/m^2) est le rayonnement incident dans des conditions de test standard, α_p (%/°C) est le coefficient de température, T_C (°C) est la température des cellules PV. $T_{C,CTS}$ (25 °C) est la température des cellules PV dans des conditions de test standard.

5.2. Eolienne

La conversion de l'énergie éolienne désigne le processus de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique utilisable. Cela est généralement réalisé à l'aide de turbines éoliennes, qui captent l'énergie cinétique du vent et la transforment en énergie mécanique. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique à l'aide d'un générateur situé dans la turbine.

La puissance de sortie d'une éolienne est principalement déterminée par sa courbe de puissance, qui illustre la relation entre la vitesse du vent et la puissance de sortie. La courbe inclut des paramètres clés tels que la vitesse de démarrage, la vitesse nominale et la vitesse de coupure, qui représentent respectivement la vitesse minimale requise pour commencer à générer de l'électricité, la vitesse du vent à laquelle l'éolienne produit sa puissance nominale maximale, et la vitesse maximale du vent à laquelle l'éolienne s'arrête pour éviter les dommages. L'équation de conversion de l'énergie éolienne est donnée par l'équation (2.2).

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 C_p \quad (2.2)$$

Où, P est la puissance extraite du vent (en watts, W), ρ est la densité de l'air (en kilogrammes par mètre cube, kg/m^3), A est la surface balayée par les pales de la turbine (en

mètres carrés, m^2), V est la vitesse du vent (en mètres par seconde, m/s), et C_p est le coefficient de puissance, qui représente l'efficacité de la turbine dans la capture de l'énergie cinétique du vent. Le coefficient de puissance C_p dépend de divers facteurs tels que la conception de la turbine, l'efficacité des pales et la vitesse du vent [65].

Dans ce cas, nous avons utilisé le modèle WES 5 Tulipo, abrégé en WES5, qui est une éolienne à haut rendement conçue et fabriquée par Wind Energy Solutions. Cette éolienne a une puissance nominale de 2,5 kW AC, ce qui la rend adaptée aux applications énergétiques à petite échelle. La WES 5 Tulipo se caractérise par une conception tripale à vent ascendant avec un diamètre de rotor de 5 mètres, garantissant des performances aérodynamiques optimales. Elle est équipée d'un générateur asynchrone à vitesse variable et d'un convertisseur à base d'IGBT, permettant une conversion efficace de l'énergie et une adaptabilité aux différentes conditions de vent. Cette combinaison de caractéristiques fait de la WES 5 Tulipo un choix fiable pour l'intégration de l'énergie éolienne dans les systèmes hybrides. La figure 2.7 montre la courbe de puissance de l'éolienne sélectionnée.

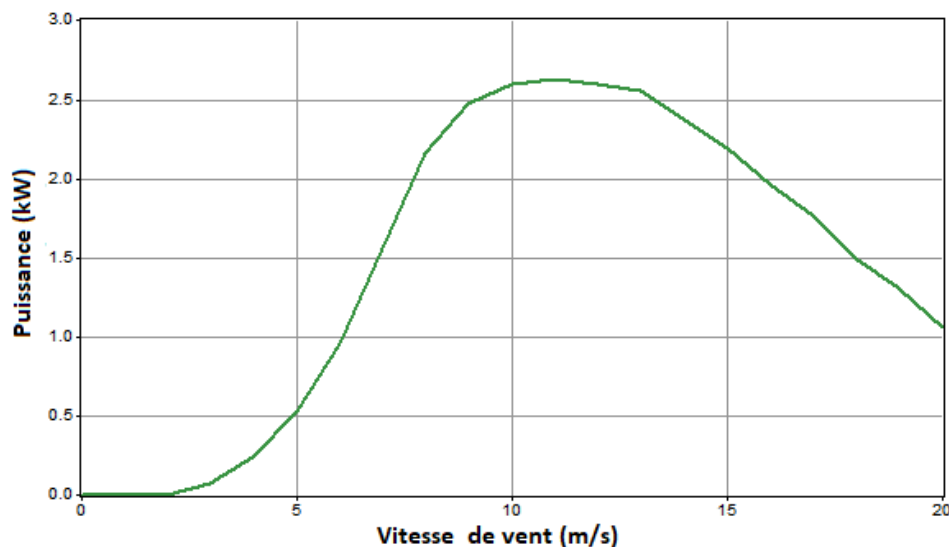


Figure 2.7. Courbe de puissance de l'éolienne sélectionnée.

5.3. Stockage

Les systèmes hybrides solaires/éoliens sont devenus un choix de plus en plus populaire pour la production d'énergie renouvelable. Cependant, les problèmes d'intermittence associés aux sources d'énergie renouvelables peuvent poser des difficultés pour maintenir un approvisionnement énergétique régulier. Pour atténuer ces problèmes, le stockage de l'énergie par batteries jouent un rôle crucial assurant la stabilité, la fiabilité et l'efficacité de la

fourniture d'énergie. Les batteries stockent l'énergie excédentaire produite par les panneaux photovoltaïques et les éoliennes pendant les périodes de forte production et de faible demande. Cette énergie stockée peut être utilisée ultérieurement lorsque la demande d'énergie dépasse la production, assurant ainsi une alimentation électrique continue.

La quantité maximale d'énergie que la batterie peut absorber pendant une durée déterminée est donnée par l'équation suivante:

$$P_{batt, c \max, kbm} = \frac{kQ_1 e^{-k \Delta t} + Qkc(1 - e^{-k \Delta t})}{1 - e^{-k \Delta t} + c(k \Delta t - 1 + e^{-k \Delta t})} \quad (2.3)$$

Où, Q_1 représente l'énergie disponible (kWh) dans la batterie au début de l'intervalle de temps, Q est la quantité totale d'énergie (kWh) dans la batterie au début de l'intervalle de temps, c est le rapport de capacité de la batterie, k est la constante de taux de la batterie (h^{-1}), et Δt est la durée de l'intervalle de temps (h).

La quantité maximale d'énergie que le banc de batteries peut décharger pendant une durée spécifique est donnée par l'équation suivante:

$$P_{batt, d \max, kbm} = \frac{-kcQ_{\max} + kQ_1 e^{-k \Delta t} + Qkc(1 - e^{-k \Delta t})}{1 - e^{-k \Delta t} + c(k \Delta t - 1 + e^{-k \Delta t})} \quad (2.4)$$

Où, $Q_{\max}$ est la capacité totale (kWh) du parc de batteries. Le débit de la durée de vie est donné par l'équation suivante:

$$Q_{Durée, i} = f_i d_i \left(\frac{q_{\max} V_{nom}}{1000 \text{ W / kW}} \right) \quad (2.5)$$

Où, $Q_{Durée, i}$ représente le débit pendant la durée de vie de la batterie (kWh), f_i est le nombre de cycles jusqu'à la défaillance, d_i est la profondeur de décharge (%), $q_{\max}$ est la capacité maximale de la batterie (Ah), V_{nom} est la tension nominale de la batterie (V).

5.4. Convertisseur

Dans un système hybride PV-éolien avec batterie, le convertisseur joue un rôle crucial dans la gestion et l'optimisation du flux d'énergie entre les différents composants. Tout d'abord, il gère la conversion AC/DC et DC/AC. Les panneaux PV génèrent du courant continu, et si la charge ou le réseau nécessite du courant alternatif le convertisseur (onduleur) convertit le DC en AC. Les éoliennes, en fonction de leur type de générateur, peuvent produire soit de l'AC soit du DC, et le convertisseur ajuste en conséquence pour correspondre aux spécifications de la charge ou pour stocker l'énergie dans les batteries. Le rendement de l'onduleur peut être exprimé par l'équation (2.6) comme suit [66-69].

$$P_{\text{Entrée}} = \frac{P_{\text{Sortie}}}{\eta_{\text{Conv}}} \quad (2.6)$$

Où, $P_{\text{Entrée}}$ (kW) est la puissance d'entrée CC, P_{Sortie} (kW) est la puissance de sortie CA et η_{Conv} (%) est le rendement de convertisseur. Les caractéristiques techniques et les données d'entrée économiques pour les différents composants du système énergétique hybride sont détaillées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Spécifications techno-économiques des composants.

Composants	Capital (\$)	Remplacement (\$)	O&M (\$)
PV	700/kW	700/kW	10
Eolienne	950/kW	900/kW	10
Stockage	104,43/kWh	104,43/kWh	5
Convertisseur	100/kW	100/kW	0

6. Critère d'évaluation techno-environ-économique

6.1. Production d'énergie

La puissance totale produite par le système hybride à tout moment test la somme de la puissance générée par les panneaux photovoltaïques et les éoliennes, moins la puissance utilisée pour charger les batteries, plus la puissance déchargée des batteries:

$$P_{\text{Total}}(t) = P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{Eolienne}}(t) - P_{\text{Charge}}(t) + P_{\text{Décharge}}(t) \quad (2.7)$$

Où, $P_{\text{PV}}(t)$ est la puissance produite par les panneaux photovoltaïques, $P_{\text{Eolienne}}(t)$ est la puissance produite par les éoliennes, $P_{\text{Charge}}(t)$ est la puissance entrant dans la batterie à l'instant, $P_{\text{Décharge}}(t)$ est la puissance tirée de la batterie à l'instant (t).

6.2. Énergie excédentaire

L'énergie excédentaire est calculée comme la différence entre la puissance totale générée et la demande de charge, après prise en compte de la charge de la batterie.

$$P_{\text{Excès}}(t) = P_{\text{Total}}(t) - P_{\text{Demande}}(t) \quad (2.8)$$

Où, $P_{\text{Excès}}(t)$ est l'excédent de puissance disponible à l'instant (t), $P_{\text{Totale}}(t)$ est la puissance totale du système à l'instant (t), $P_{\text{Demande}}(t)$ est la demande de charge à l'instant (t).

6.3. Charge non satisfaite

Il est essentiel de répondre à la demande non satisfaite pour garantir la fiabilité de l'approvisionnement en électricité. La charge non satisfaite correspond à la partie de la

demande d'énergie qui n'est pas satisfaite par la production combinée des panneaux photovoltaïques, des turbines éoliennes et des batteries de stockage. Cette situation se produit lorsque l'énergie produite et l'énergie stockée sont insuffisantes pour satisfaire la demande de la charge. La charge non satisfaite à tout moment t peut être calculée à l'aide de l'équation suivante.

$$P_{\text{Déficit}}(t) = P_{\text{Demande}}(t) - P_{\text{Total}}(t) \quad (2.9)$$

Où, $P_{\text{Déficit}}(t)$ est la charge non satisfaite au moment (t) .

6.4. Analyse environnementale

Les économies de CO₂ constituent un avantage environnemental majeur. En remplaçant ou en complétant l'électricité produite à partir de combustibles fossiles par des sources d'énergie renouvelables, le système peut réduire de manière significative les émissions de gaz à effet de serre. Les économies de CO₂ réalisées par le système hybride PV-éolien-batterie peuvent être calculées à l'aide de la formule suivante:

$$CO2_{\text{Economie}} = E_{\text{Total}} * EF \quad (2.10)$$

Où, $CO2_{\text{Economie}}$ est la quantité de CO₂ réduite (en kg), E_{Total} est l'énergie totale produite par le système hybride (en kWh), et EF est le facteur d'émission de la source d'énergie conventionnelle déplacée (en kg CO₂/kWh).

L'évaluation économique d'un système énergétique hybride implique une évaluation complète des coûts, des bénéfices et des mesures financières afin de déterminer la faisabilité et la rentabilité de la mise en œuvre d'un tel système. Elle joue un rôle crucial dans la prise de décision et l'obtention d'un financement pour les projets d'énergie renouvelable. Plusieurs critères notamment le coût de l'énergie et le coût total net actualisé sont utilisés.

L'analyse économique réalisée par le logiciel permet de déterminer la configuration de système la plus efficace et optimal avec le coût total net actuel plus bas. Ce résultat est obtenu en comparant tous les coûts et toutes les recettes qui surviennent pendant la durée de vie du projet, y compris les coûts de construction initiale, de remplacement des composants, de maintenance, de combustible, de coût d'achat de l'électricité au réseau et d'autres coûts tels que les pénalités résultant des émissions polluantes. Les recettes comprennent le revenu de la vente d'électricité au réseau et toute valeur de récupération à la fin de la durée de vie du projet [60,61].

6.5. Coût total net actuel

Le coût total net actuel du système est la valeur actuelle de tous les coûts qu'il encourt pendant sa durée de vie, moins la valeur actuelle de tous les revenus qu'il génère pendant sa durée de vie. Les coûts comprennent les coûts d'investissement, les coûts de remplacement, les coûts d'exploitation et de maintenance, les coûts des combustibles, les pénalités sur les émissions et les coûts d'achat de l'électricité au réseau. Les revenus comprennent la valeur de récupération et les revenus des ventes au réseau. HOMER calcule le coût actualisé net total à l'aide de l'équation suivante [62].

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})} \quad (2.11)$$

Où, $C_{ann,tot}$ représente le coût total annualisé (\$/an), i est le taux d'intérêt (%), et R_{proj} est la durée de vie du projet (an). CRF est le facteur de récupération du capital, donné par l'équation (2.6) suivante [62].

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{i(1+i)^N - 1} \quad (2.12)$$

Où, i est le taux d'intérêt réel annuel et N le nombre d'années.

6.6. Coût de l'énergie COE

HOMER définit le coût de l'énergie nivelé COE en \$/kWh comme le coût moyen par kWh de l'énergie électrique utile produite par le système. Pour calculer le COE, HOMER divise le coût annualisé de la production d'électricité par la production totale d'énergie électrique utile. L'équation du COE est la suivante:

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{prim,AC} + E_{prim,DC} + E_{def}} \quad (2.13)$$

Où, $C_{ann,tot}$ représente le coût total annualisé du système (\$/an), $E_{prim,AC}$ correspond à la charge primaire en courant alternatif (kWh/an), $E_{prim,DC}$ est la charge primaire en courant continu (kWh/an) et E_{def} désigne la charge différée desservie (kWh/an) [62].

7. Consommation

La charge (consommation d'énergie) dans un système énergétique joue un rôle crucial et a un effet sur son fonctionnement et sa performance globale. Fondamentalement, le profil de

charge définit les besoins en énergie au fil du temps, incluant des variations quotidiennes, saisonnières et horaires.

Ce profil de consommation influence directement le dimensionnement et le type de configuration des composants du système tels que les panneaux PV, les éoliennes, et les batteries de stockage. Des demandes d'énergie plus importantes nécessitent des composants de taille appropriée pour garantir que le système puisse répondre efficacement aux besoins énergétiques de pointe.

Lors de notre récente visite sur le site de l'étude, pour l'évaluation du système d'éclairage extérieur de l'université nous avons découvert qu'il existe plusieurs types des utiliser y compris les lampes classiques au sodium haute pression (SHP) qui sont largement utilisé (Figure 2.8).

Dans cette section, nous présentons en détail le fonctionnement de ces lampes et présenterons leurs avantages et inconvénients. Nous les comparerons ensuite aux lampes à diodes électroluminescentes (LED), qui gagnent en popularité en tant qu'alternative plus efficace sur le plan énergétique et plus rentable que les lampes SHP.



Figure 2.8. Lampes HPS pour éclairage extérieur.

7.1. Lampes à sodium haute pression (SHP)

SHP signifie sodium haute pression (High-Pressure Sodium). Les lampes SHP sont un type d'éclairage à décharge à haute intensité (HID) couramment utilisé pour l'éclairage extérieur et l'éclairage public. Elles produisent de la lumière en faisant passer un courant électrique à travers un mélange de gaz contenant du sodium et de la vapeur de mercure. Lorsque la lampe est alimentée, les gaz s'ionisent et produisent une lumière jaune-orange intense [70].



Figure 2.9. Structure standard des lampes SHP [76].

En termes de fonctionnement, les lampes au sodium haute pression ont été introduites pour la première fois dans les années 1960 par General Electric. Ces lampes fonctionnent en allumant un mélange de gaz à l'intérieur, contenant du sodium et du mercure, à l'aide d'une décharge électrique. Une fois le mélange gazeux enflammé, le sodium et le mercure se vaporisent, produisant ainsi une lumière jaune intense. Cette lumière jaune provient principalement de l'émission spectrale de la raie D du sodium à environ 589,3 nm et est responsable de la lueur jaune-orange caractéristique des lampes SHP [71]. Comme illustré dans la figure 2.10, les lampes à sodium haute pression ne convertissent qu'environ 10% de l'énergie électrique en lumière visible, les 90 % restants étant perdus sous forme de chaleur. Cette inefficacité rend les lampes SHP moins intéressantes du point de vue de l'utilisation de l'énergie.

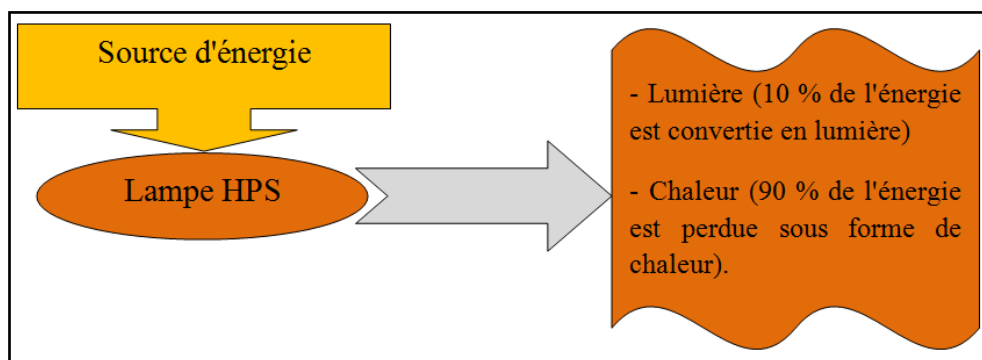


Figure 2.10. Schéma de conversion dans les lampes SHP.

- **Avantages**

- ✓ Rendement élevé: Les lampes SHP produisent plus de lumière par watt d'électricité consommé que les lampes à incandescence ou fluorescentes.
- ✓ Longue durée de vie: Les lampes à vapeur de sodium haute pression (SHP) se caractérisent par une durée de vie opérationnelle prolongée, généralement comprise entre 15000 et 24000 heures. Bien que leur longévité ne soit pas comparable à celle des LED, les lampes SHP surpassent les ampoules à incandescence et de nombreuses lampes fluorescentes compactes en termes de durabilité.
- ✓ Bon rendu des couleurs pour l'éclairage extérieur [72].

- **Inconvénients**

- ☒ Mauvais rendu des couleurs: Les lampes SHP ont un faible indice de rendu des couleurs (IRC), ce qui les rend inadaptées aux applications pour lesquelles une représentation précise des couleurs est importante.
- ☒ Temps de chauffe: Il leur faut plusieurs minutes pour atteindre leur pleine luminosité après avoir été allumées.
- ☒ Comportement en fin de vie: Au fur et à mesure que les lampes HPS vieillissent, leur rendement lumineux diminue et elles peuvent présenter des scintillements ou des cycles avant de tomber complètement en panne [72].

7.2. Lampes à diode électroluminescente (LED)

Selon la littérature, l'éclairage basé sur les lampes SHP est inefficace et énergivore par rapport à d'autres technologies récemment apparues. De nombreux documents de recherche ont confirmé ces caractéristiques et avantages multiples.

LED est l'abréviation de diode électroluminescente (Light Emitting Diode) sont des dispositifs d'éclairage qui utilisent la technologie des semi-conducteurs pour produire de la lumière. Contrairement aux ampoules incandescentes ou fluorescentes traditionnelles, qui reposent sur le chauffage d'un filament ou d'un gaz pour produire de la lumière, les LED génèrent de la lumière grâce au mouvement des électrons dans un matériau semi-conducteur [75].

Le développement des lampes à diodes électroluminescentes est en cours depuis les années 1960. Cependant, des progrès significatifs dans la technologie des LED ont conduit à des applications pratiques dans l'éclairage, à partir du début des années 2000. Le mécanisme des lampes LED implique le passage d'un courant électrique à travers un matériau semi-conducteur, ce qui permet aux électrons de libérer de l'énergie sous forme de photons,

produisant ainsi de la lumière. La couleur de la lumière émise par les LED est déterminée par le matériau semi-conducteur utilisé, ce qui permet d'obtenir une large gamme de couleurs, y compris la lumière blanche [73].

L'un des principaux avantages des lampes LED est leur efficacité lumineuse élevée, c'est-à-dire la quantité de lumière produite par unité d'énergie consommée, mesurée en lumens par watt (lm/W). Les lampes LED atteignent généralement une efficacité lumineuse de 80-100 lm/W ou plus, alors que les ampoules à incandescence ont une efficacité lumineuse moyenne de 10-17 lm/W. Cela signifie que les LED fournissent plus de lumière en utilisant moins d'électricité. La figure 2.11 montre le schéma simplifié illustrant l'efficacité énergétique des lampes LED par rapport aux ampoules à incandescence traditionnelles.

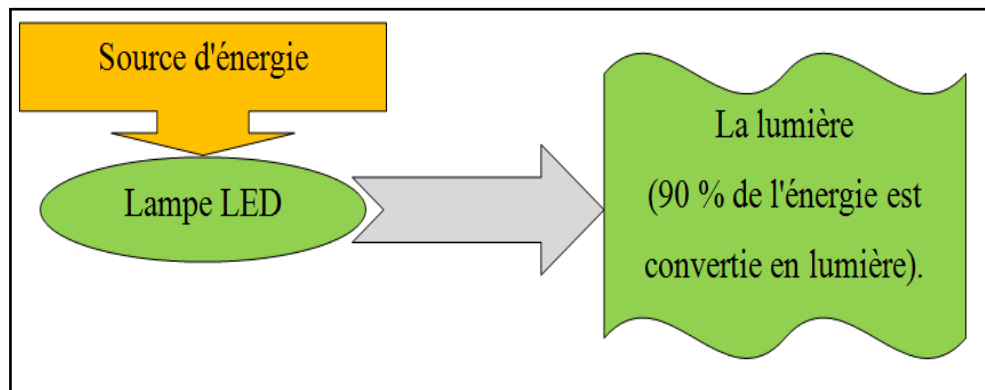


Figure 2.11. Schéma de l'efficacité de conversion des lampes LED.

- **Avantages**

- ✓ Rendement élevé: Les lampes LED sont extrêmement efficaces sur le plan énergétique et convertissent un pourcentage plus élevé d'électricité en lumière que les technologies d'éclairage traditionnelles telles que les lampes à incandescence ou les lampes fluorescentes.
- ✓ Longue durée de vie: Les lampes LED sont connues pour leur durée de vie nettement plus longue que les autres types d'éclairage. Elles peuvent souvent durer entre 25000 et 50000 heures, ce qui réduit la nécessité de remplacements fréquents et la consommation d'énergie au fil du temps.
- ✓ Démarrage instantané: Les LED atteignent leur pleine luminosité instantanément lorsqu'elles sont allumées, ce qui élimine le temps de préchauffage nécessaire à d'autres types de lampes.

- ✓ Excellent rendu des couleurs: Les LED peuvent produire de la lumière sur l'ensemble du spectre visible, offrant ainsi un meilleur rendu des couleurs que de nombreuses autres technologies d'éclairage.
- ✓ Lumière directionnelle: Les LED émettent de la lumière dans une direction spécifique, ce qui permet une utilisation plus efficace de la lumière et une réduction de la pollution lumineuse [74].

- **Inconvénients**

- ☒ Coût initial plus élevé: Les lampes à LED ont généralement un coût initial plus élevé que les technologies d'éclairage traditionnelles, bien que ce coût ait diminué au fil du temps.
- ☒ Sensibilité à la température: Les températures extrêmes peuvent affecter les performances et la durée de vie des lampes LED, bien que les progrès technologiques aient permis d'atténuer ce problème dans une certaine mesure.
- ☒ Risque d'éblouissement: Certains luminaires à LED peuvent éblouir en raison de la nature directionnelle de la lumière LED, bien qu'une conception appropriée et des diffuseurs puissent aider à minimiser ce problème [74].

Notez que pour la simulation, nous avons pris en considération deux profils de charge correspondant aux deux types de lampes, avec 100 lampes fonctionnant pendant une période de 12 heures par jour, de 18h00 à 6h00. Les lampes SHP ont une puissance nominale de 250 watts par luminaire, tandis que les lampes utilisant la technologie LED ont une puissance de 100 watts. Cela permet une comparaison entre les deux scénarios en termes techniques et économiques. Le profil de charge utilisé pour les scénarios SHP (figure 2.12) et LED (2.13) est présenté à la figure 2.12, avec la consommation journalière est estimée à 298 kWh et 119 kWh respectivement.

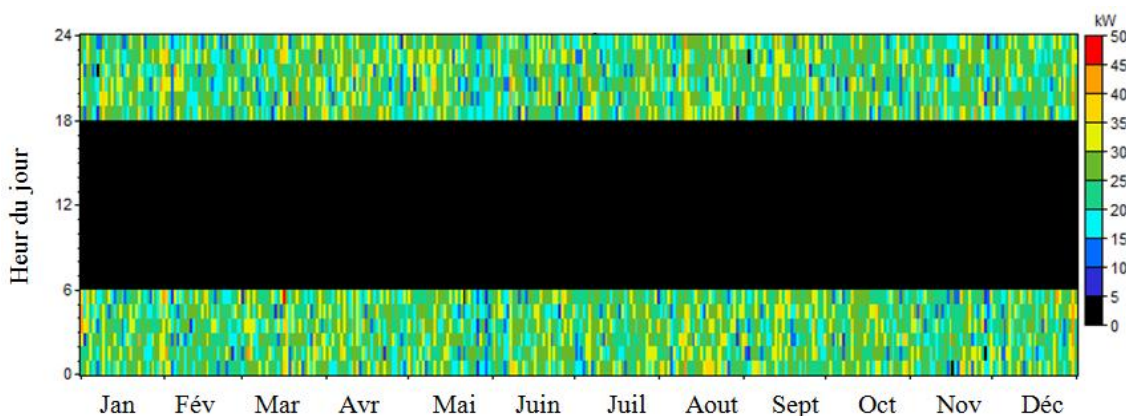


Figure 2.12. Profil de charge pour les lampes HPS.

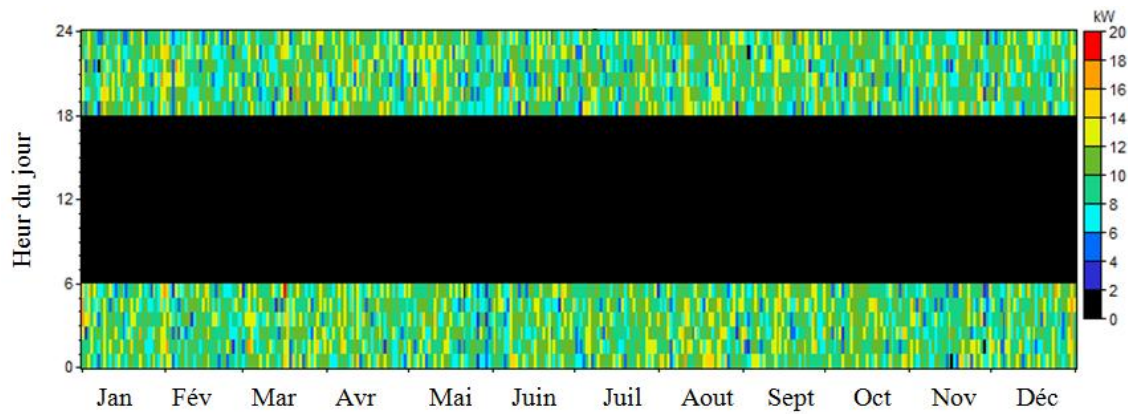


Figure 2.13. Profil de charge pour les lampes LED .

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous explorons le développement d'un système énergétique hybride qui combine l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne, et les batteries de stockage afin d'optimiser l'approvisionnement en énergie pour l'éclairage d'un campus universitaire à l'aide de sources renouvelables. Notre approche comprend une évaluation détaillée du site d'étude, une analyse des ressources énergétiques disponibles et la modélisation des composants du système à l'aide du logiciel HOMER. Cette méthodologie nous permet d'évaluer la performance énergétique du système dans différentes conditions et d'optimiser sa configuration pour un bon rapport coût-efficacité et une utilisation maximale des énergies renouvelables.

En outre, nous comparons deux technologies d'éclairage, SHP et LED, en soulignant leurs avantages et inconvénients respectifs. Le troisième chapitre présente une analyse et une discussion approfondies des résultats de l'optimisation, en mettant l'accent sur le dimensionnement du système, la performance énergétique et la faisabilité technico-économique, sur la base des critères décrits dans cette section.

Chapitre 3

Analyse et discussion des résultats - cas du SHP

Chapitre 3

Analyse et discussion des résultats - cas du SHP

1. Introduction

Ces dernières années, l'intégration des sources d'énergie renouvelables dans les systèmes électriques a suscité un intérêt considérable en raison de la demande mondiale croissante d'énergie propre et durable. Les systèmes hybrides (ex. PV, éolienne) sont apparus comme des solutions prometteuses pour répondre à cette demande tout en réduisant la dépendance aux sources traditionnelles.

Le système d'éclairage extérieur des campus universitaires représente un élément essentiel de l'infrastructure énergétique globale, car il assure la sûreté et la sécurité tout en améliorant l'esthétique et la fonctionnalité de l'environnement du campus. Cependant, les technologies d'éclairage traditionnelles, telles que les lampes SHP, sont souvent gourmandes en énergie et contribuent aux émissions de carbone. Dans ce contexte, l'adoption de solutions basées sur les énergies renouvelables devient impérative pour atténuer les impacts environnementaux et réduire les coûts opérationnels.

Ce chapitre se concentre sur l'analyse des résultats de simulations pour évaluer la performance d'un système hybride PV/éolien pour l'alimentation de l'éclairage extérieur de l'université Dr Moulay Tahar de Saida. L'objectif principal de cette analyse est d'évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, notamment photovoltaïques et éoliennes, pour alimenter l'éclairage basé sur les lampes SHP existantes. L'analyse se concentre sur plusieurs aspects clés, notamment le dimensionnement du système, la production d'énergie, le surplus d'électricité, la capacité du système à répondre à la demande d'éclairage extérieur et la viabilité économique du système hybride, en tenant compte du coût unitaire et de la facture d'électricité.

2. Analyse et discussion des résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats des simulations pour évaluer la performance du système hybride PV/éolien destiné à l'alimentation de l'éclairage extérieur. L'évaluation repose sur plusieurs critères clés, permettant de juger de la faisabilité technico-économique et environnementale ainsi que de l'efficacité énergétique.

2.1. Architecture optimale du système

Le système d'énergie renouvelable se compose de plusieurs éléments, chacun ayant des capacités et des fonctions spécifiques. Les résultats de l'optimisation ont montré l'architecture optimale du système présentée dans la figure 3.1. L'un de ces composants est le système photovoltaïque, dont la taille optimale est de 62 kW. Un autre composant est le modèle d'éolienne WES 5 Tulipo, d'une capacité nominale de 2.5 kW. Le dimensionnement optimal utilise 21 turbines (unités) pour produire de l'électricité à partir de l'énergie éolienne, ce qui complète la production d'énergie du système PV. La capacité combinée du système est de 114.5 kW, soit la capacité totale du générateur photovoltaïque et de l'éolienne.

Le système énergétique utilise 520 batteries (Hoppecke 6 OPzS 600) d'une capacité de 600 Ah (1.2 kWh) pour stocker l'énergie excédentaire provenant des sources photovoltaïques et éoliennes. Cette énergie stockée peut être utilisée pendant les périodes de faible production d'énergie ou de forte demande, ce qui permet d'équilibrer l'offre et la demande d'énergie et contribue à la stabilité et à la fiabilité du réseau. L'intégration de batteries permet de résoudre efficacement les problèmes d'intermittence liés aux sources d'énergie renouvelables.

L'onduleur, d'une capacité de 48 kW, joue un rôle crucial dans le système. Il convertit le courant continu produit par le générateur photovoltaïque en courant alternatif utilisable par les lampes du système. Le redresseur, qui a également une capacité de 48 kW, est chargé de convertir le courant alternatif en courant continu utilisé pour charger les batteries de stockage. Globalement, le système d'énergie renouvelable s'appuie sur une combinaison de technologies et de composants pour produire et stocker l'énergie de manière efficace.

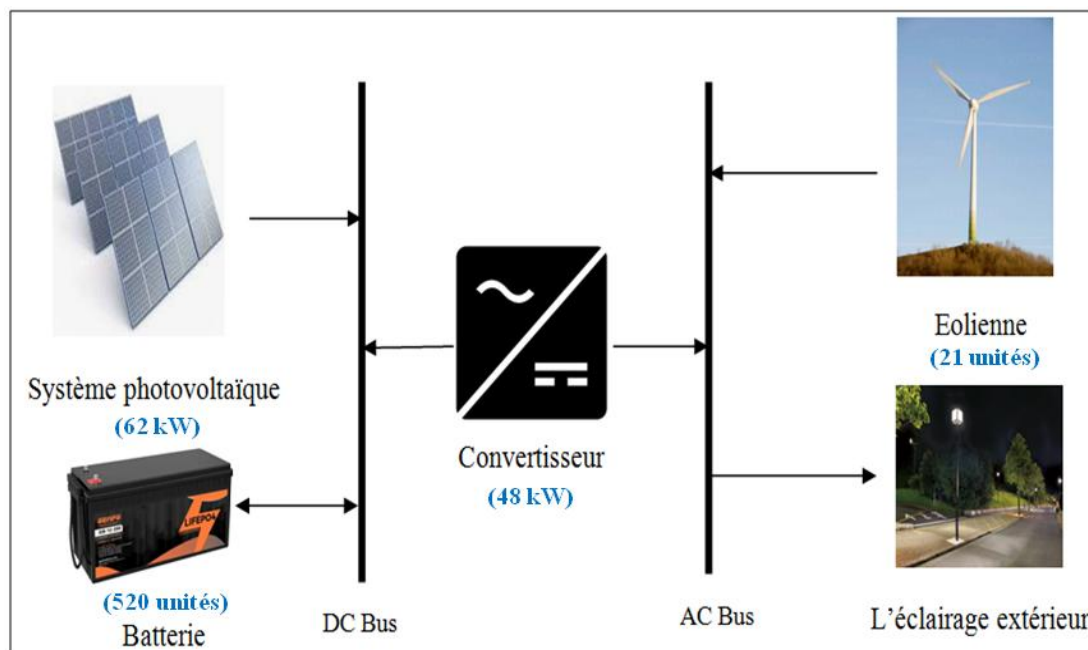


Figure 3.1. Architecture optimale du système.

2.2. Performance énergétique

L'analyse de la performance énergétique et de la production d'énergie est un indicateur clé de la performance du système hybride. Les simulations ont permis d'estimer la production annuelle d'énergie des panneaux photovoltaïques et des éoliennes. L'efficacité du système est évaluée en comparant la production d'énergie aux besoins énergétiques de l'éclairage extérieur, ainsi que par le taux de couverture, la complémentarité entre les sources photovoltaïques et éoliennes, et le stockage d'énergie. La Figure 3.2 montre la comparaison de la productivité des sources sur une base mensuelle.

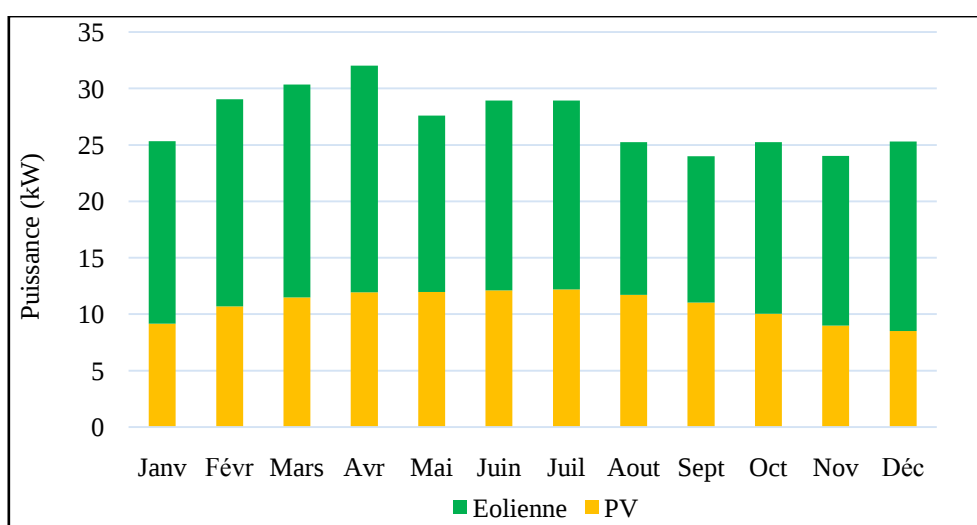


Figure 3.2. Profil mensuel de la production électrique par source.

Les éoliennes contribuent davantage (60%) à la production totale d'énergie que les panneaux photovoltaïques 40%. Cela indique que les éoliennes sont la principale source d'énergie du système. La plus grande contribution des éoliennes à la production totale d'énergie suggère qu'elles peuvent avoir une capacité ou un rendement supérieur à celui des panneaux photovoltaïques. Cependant, cette répartition peut être influencée par des facteurs externes tels que l'emplacement, le régime des vents et l'efficacité de la technologie.

Le cercle de pourcentage dans la figure 3.3. indique la répartition de la production annuelle d'énergie à partir de deux sources renouvelables, à savoir les panneaux photovoltaïques et les éoliennes. Sur la production totale d'énergie, les panneaux photovoltaïques génèrent 40% de la production annuelle, soit 94,777 kWh, tandis que les éoliennes génèrent 60% de la production totale d'énergie, soit 143,081 kWh/an.

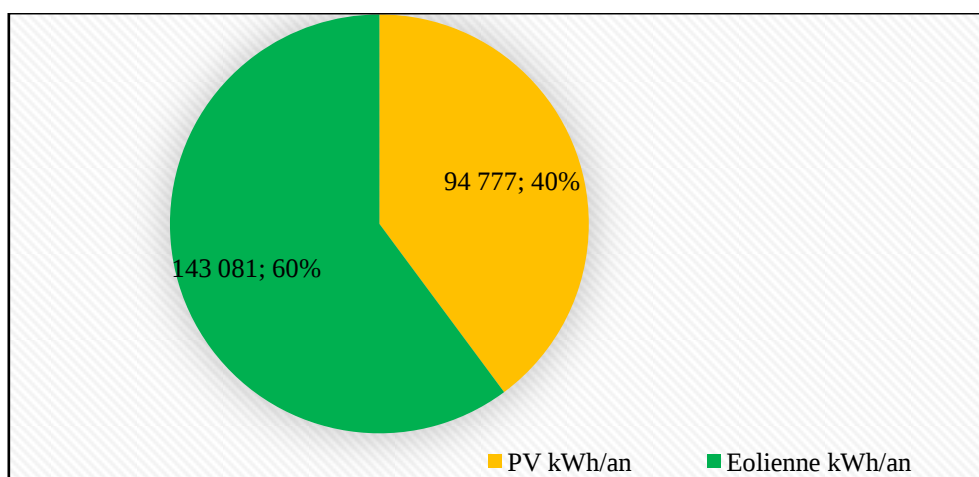


Figure 3.3. Production annuelle d'électricité par source d'énergie.

En terme de fiabilité et de disponibilité, il convient de noter que la totalité de la demande énergétique, soit 108,697 kWh, est satisfaite par le système. Il a été constaté qu'il existe un excédent de 109,130 kWh par an, ce qui représente 45.9% de l'électricité totale produite. La charge électrique non satisfaite est très faible, seulement de 73.4 kWh par an, ce qui est insignifiant puisqu'elle ne représente que 0.1% de la demande totale. En outre, il existe un déficit de capacité de 109 kWh par an, soit 0.1% de la demande totale (Figure 3.4).

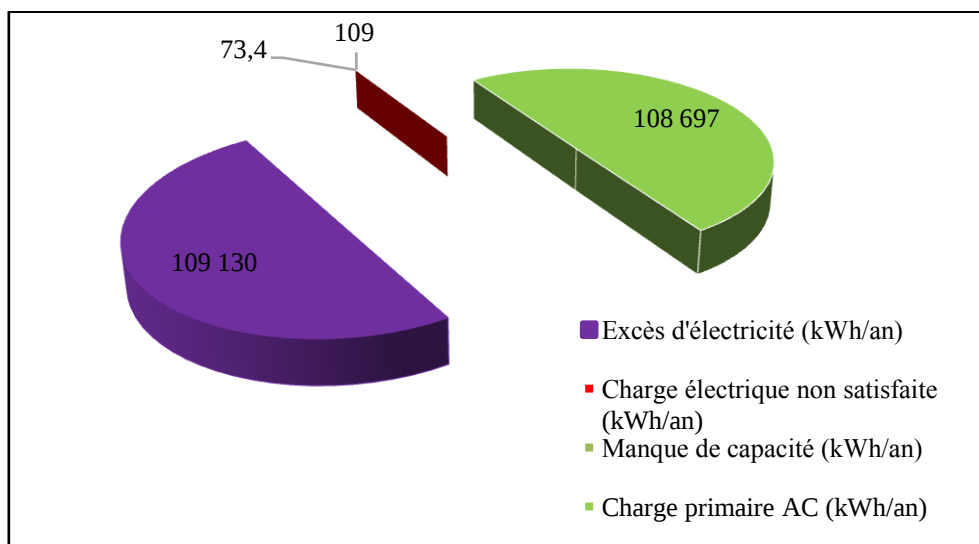


Figure 3.4. Analyse de l'offre et de la demande d'électricité (kWh/an).

La figure 3.5 montre la répartition annuelle du surplus d'électricité.

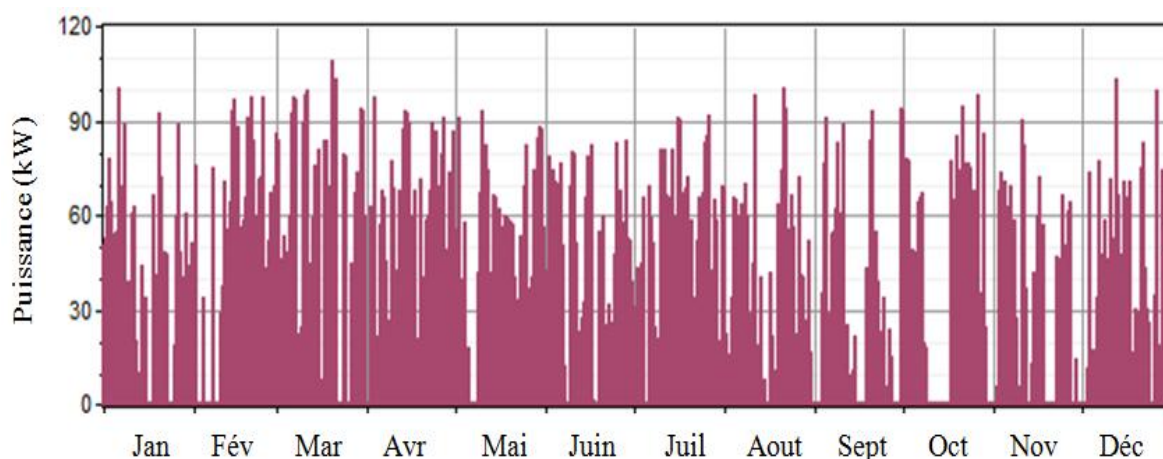


Figure 3.5. Profil du surplus d'électricité du système.

2.2.1. Productivité du système photovoltaïque

Le tableau 3.1 présente les données de performance d'un panneau photovoltaïque avec une capacité nominale optimale de 62.0 kW. Le système de production d'énergie photovoltaïque a une puissance de sortie minimale de 0.0 kW, résultant d'une absence totale de production, par exemple pendant la nuit. Sa capacité maximale de production est estimée à 58.5 kW, avec une pénétration photovoltaïque de 87.1%. La puissance moyenne du système est évaluée à 10.8 kW. Le système fonctionne 4,387 heures par an pour générer un total de 94,777 kWh par an, avec un facteur de capacité de 17.5%, qui est le rapport entre sa production d'énergie réelle et sa production maximale possible. Le coût moyen de la production d'électricité sur sa durée de vie est de 0.0494 \$/kWh, indiquant sa rentabilité.

Tableau 3.1. Principaux paramètres de performance du système photovoltaïque.

Quantité	Valeur	Unités
Puissance minimale	0.0	(kW)
Puissance maximale	58.5	(kW)
Puissance moyenne	10.8	(kW)
Production d'énergie moyenne	260	(kWh/j)
Pénétration PV	87.1	(%)
Heures de fonctionnement	4,387	(heur/an)
Facteur de capacité	17.5	(%)
Production totale d'énergie	94 777	(kWh/an)
Coût	0.0494	(\$/kWh)

Le profil de la production photovoltaïque tout au long de l'année est montré dans la figure 3.6.

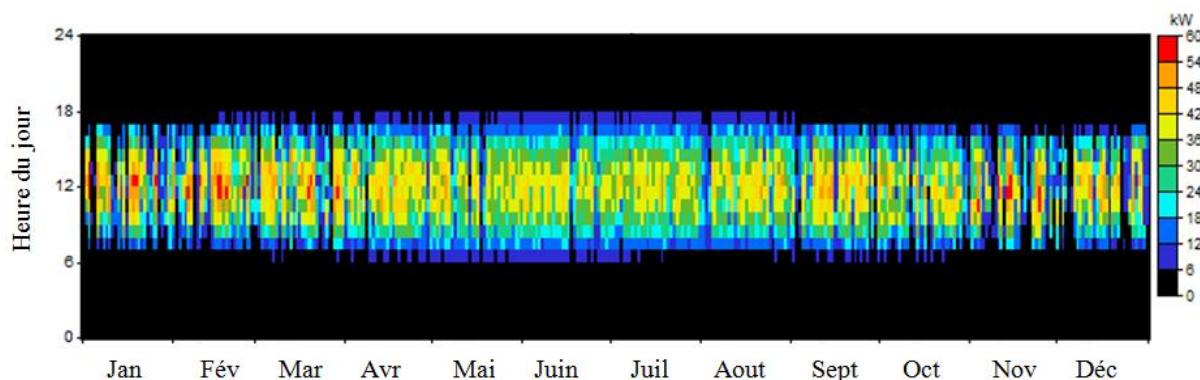


Figure 3.6. Dmap de la production d'énergie PV au cours de l'année.

2.2.2. Fonctionnement de l'éolienne

Les mesures de performance et les caractéristiques de l'éolienne sont présentées dans le tableau 3.2, qui offre un résumé de l'efficacité et de la productivité énergétique du composant.

Tableau 3.2. Caractéristiques de fonctionnement de l'éolienne.

Quantité	Valeur	Unités
Puissance minimale	0.0	(kW)
Capacité nominale totale	52.5	(kW)
Puissance moyenne	16.3	(kW)
Puissance maximale	55.1	(kW)
Facteur de capacité	31.1	(%)
Heures de fonctionnement	7,697	(heur/an)
Coût	0.0341	(\$/kWh)
Production totale	143,081	(kWh/an)

La puissance minimale de l'éolienne est de 0.0 kW, ce qui signifie qu'elle ne peut pas produire d'électricité. Ces cas se produisent lorsque la vitesse du vent est trop faible ou trop élevée, entraînant l'arrêt de l'éolienne pour des raisons de sécurité. La puissance moyenne de l'éolienne est de 16.3 kW, indiquant que le système fonctionne en moyenne à un niveau inférieur à sa capacité maximale. La puissance maximale de l'éolienne est de 55.1 kW, représentant sa capacité maximale dans des conditions de vent optimales. Le système éolien, avec une capacité nominale de 52.5 kW, peut produire un total de 143,081 kWh d'énergie par an sur une période de fonctionnement de 7,697 heures par an, ce qui indique sa disponibilité

et la durée pendant laquelle il produit activement de l'électricité. Le profil de production d'électricité du système éolien est illustré à la figure 3.6.

Le facteur de capacité de la turbine est de 31.1 %, signifiant que le système fonctionne à environ un tiers de sa capacité maximale. Un facteur de capacité plus élevé reflète une utilisation optimale du système. Le coût de l'électricité produite par l'éolienne est de 0.0341 \$ par kWh, ce qui correspond au coût total de construction et d'entretien de l'éolienne pendant sa durée de vie, divisé par la quantité totale d'électricité produite.

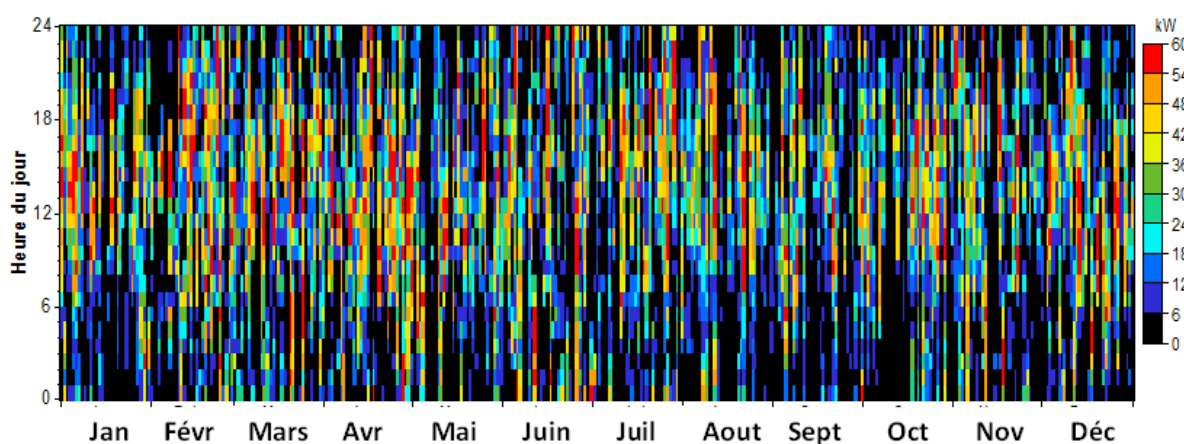


Figure 3.7. Dmap de la production d'énergie éolienne au cours de l'année.

2.2.3. Batteries de stockage

Les informations sur les performances et les caractéristiques de la batterie de stockage sont montrées dans le tableau 3.3.

Tableau 3.3. Performance et caractéristiques du système de batteries.

Quantité	Valeur	Unités
Capacité nominale	624	(kWh)
Énergie entrante	84,374	(kWh/année)
Énergie sortante	72,859	(kWh/année)
Capacité nominale utilisable	437	(kWh)
Épuisement du stockage	266	(kWh/année)
Pertes	11,250	(kWh/année)
Débit annuel	78,565	(kWh/année)
Autonomie	35.2	(Heur)
Débit total sur la durée de vie	1,083,160	(kWh)
Durée de vie attendue	13.8	(Années)

La banque de batteries a une capacité nominale de 624 kWh, mais sa capacité utilisable nominale est de 437 kWh, ce qui signifie que seule une partie de la capacité nominale peut être utilisée efficacement sans compromettre les performances ou la longévité de la batterie. L'autonomie de la batterie est de 35.2 heures, ce qui indique pendant combien de temps elle peut supporter une certaine charge sans avoir besoin d'être rechargée. Le débit de la batterie sur toute sa durée de vie est de 1,083,160 kWh, ce qui indique sa durabilité et sa longévité.

Au cours d'une année, 84,374 kWh d'énergie ont été chargés dans le système de batteries, tandis que 72,859 kWh ont été déchargés. L'épuisement progressif des réserves d'énergie au fil du temps se traduit par une diminution annuelle de 266 kWh de la capacité de stockage. Le système de batteries subit une perte annuelle d'énergie de 11,250 kWh due à des inefficacités ou à des résistances internes pendant la charge et la décharge. La quantité totale d'énergie transférée dans et hors de la batterie au cours de l'année est de 78,565 kWh. Enfin, la durée de vie prévue du système de batterie est de 13.8 ans dans des conditions de fonctionnement normales, ce qui est un facteur important pour évaluer la durabilité et la fiabilité à long terme de la solution de batterie.

L'histogramme de la Figure 3.8 montre la distribution de l'état de charge (%) pour notre système PV/éolien. L'axe des x représente l'état de charge (%) allant de 0% à 100%, tandis que l'axe des y représente la fréquence (%). Chaque pourcentage d'état de charge correspond à une fréquence particulière.

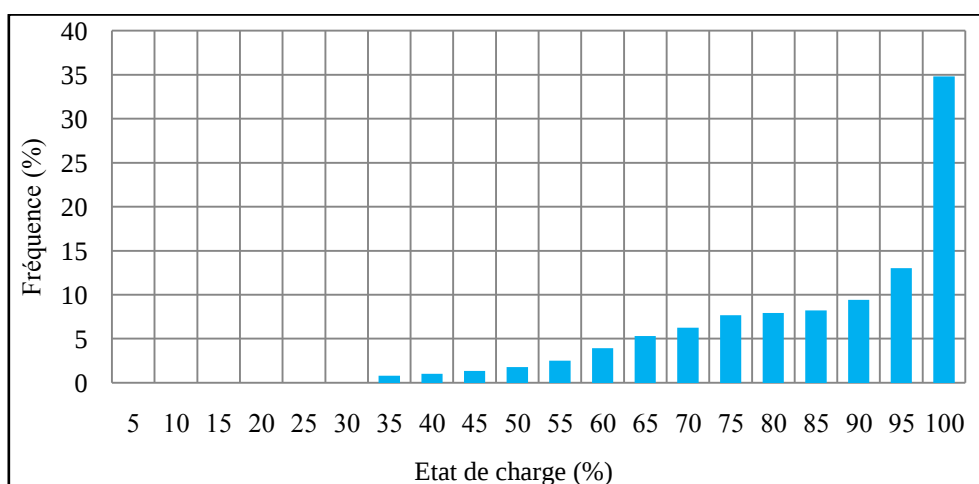


Figure 3.8. Histogramme de la fréquence des états de charge des batteries.

L'histogramme révèle que la fréquence la plus élevée est observée à un état de charge de 100%, ce qui indique que cet état de charge se produit le plus fréquemment, notamment entre

12h et 18h. Cette observation pourrait suggérer que les batteries sont dans la majorité des cas bien chargées.

En outre, le graphique de la Figure 3.9 donne un aperçu de la variation de l'état de charge de la batterie au cours des différentes heures et des mois de l'année, en mettant en évidence les valeurs les plus élevées et les plus basses correspondant aux états de charge et de décharge selon la période d'utilisation des batteries pour alimenter la charge.

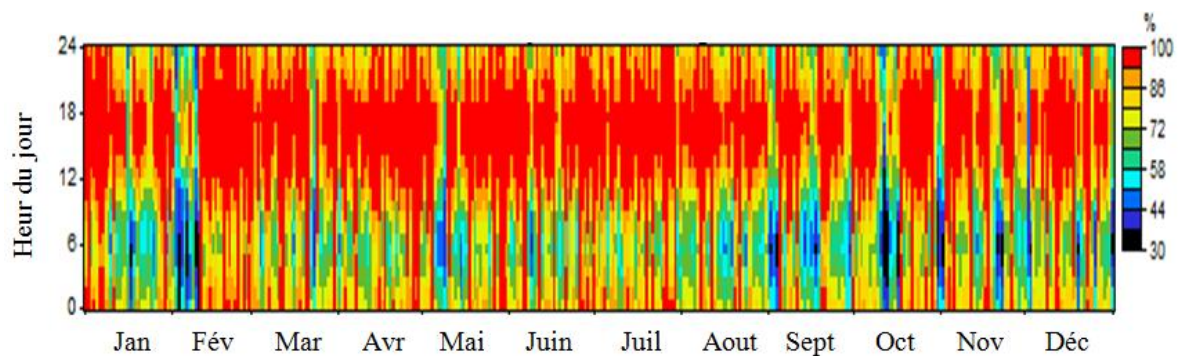


Figure 3.9. État de charge des batteries au cours de l'année.

2.2.4. Convertisseur

Le tableau 3.4 présenté ci-dessous offre les caractéristiques opérationnelles et les spécifications du convertisseur (onduleur et redresseur). Leurs performances opérationnelles sont évaluées sur la base de leur efficacité énergétique, en analysant des paramètres clés tels que les heures de fonctionnement, la conversion d'énergie et les pertes.

Tableau 3.4. Caractéristiques opérationnelles du convertisseur.

Quantité	Onduleur	Redresseur	Unités
Capacité	48.0	48.0	(kW)
Énergie entrante	73,077	32,405	(kWh/année)
Énergie sortante	69,423	27,544	(kWh/année)
Pertes	3,654	4,861	(kWh/année)
Heures de fonctionnement	3,523	2,974	(heurs/année)

La capacité nominale optimale du convertisseur est estimée à 48.0 kW, ce qui implique la puissance maximale qu'il peut convertir. De plus, l'onduleur et le redresseur fonctionnent respectivement 3,523 et 2,974 heures par an, tandis que l'énergie entrante de l'onduleur et du redresseur est respectivement de 73,077 kWh et 32,405 kWh par an. L'énergie sortante de l'onduleur et du redresseur est respectivement de 69,423 kWh et 27,544 kWh par an, et les

pertes d'énergie sont estimées respectivement à 3,654 kWh et 4,861 kWh par an en raison d'inefficacités ou de pertes de conversion.

2.3. Analyse économique

La configuration optimale montre les résultats financiers suivants: le coût total net actuel (TNPC) du système est de 207,292\$, ce qui comprend l'investissement initial nécessaire pour l'équipement et l'installation. Ce coût représente la somme totale nécessaire pour mettre en place le système et le faire fonctionner. Le coût unitaire de l'énergie (COE), qui prend en compte les dépenses d'investissement et d'exploitation et représente le coût moyen de l'électricité produite par le système pendant sa durée de vie, est estimé à 0.179\$ par kilowattheure. Le coût d'exploitation annuel du système est de 5,165\$. Il comprend toutes les dépenses récurrentes liées au fonctionnement du système, telles que l'entretien annuel. Note: Le taux de change 1 \$ = 134,487 DA [77].

La Figure 3.10 montre les coûts totaux associés à chaque composant du système (coût total net actuel par type de coût), y compris l'investissement initial, les coûts de remplacement, les dépenses d'opération et de maintenance (O&M), les coûts de carburant et le coût de récupération.

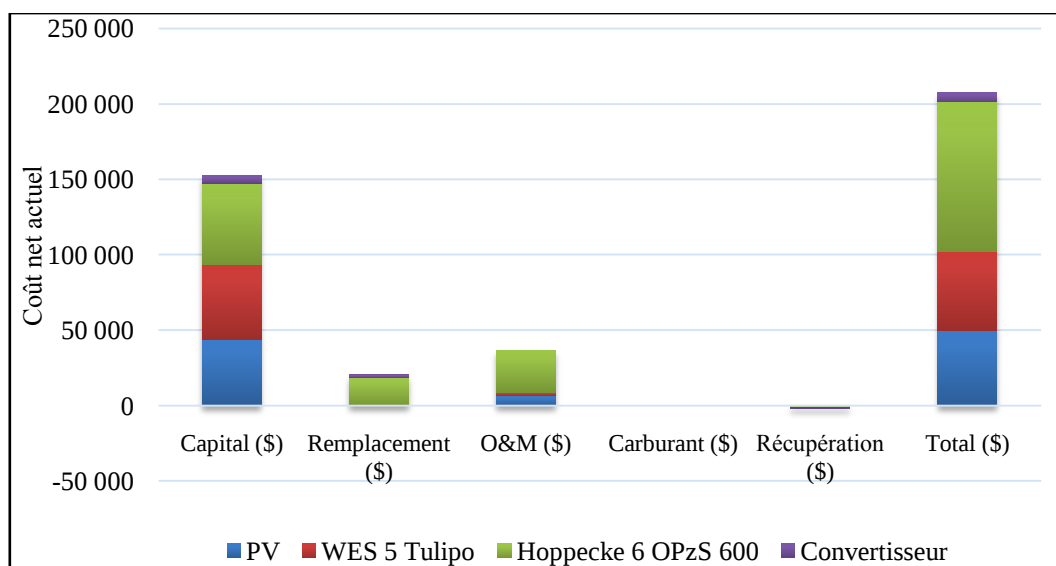


Figure 3.10. Coût total net actuel par type de coût.

L'analyse identifie les batteries de stockage «Hoppecke 6 OPzS 600» comme le composant le plus cher, avec un coût total de 99,077\$, suivies de près par l'éolienne «WES 5 Tulipo» à

52,117\$. En revanche, les composants photovoltaïques et le convertisseur ont des coûts totaux relativement moins élevés, respectivement 50,018\$ et 6,080\$.

En comparant le rapport coût-efficacité des composants, les coûts totaux des composants PV et convertisseur sont inférieurs à ceux des autres composants, ce qui indique un rapport coût-efficacité potentiellement plus élevé. En revanche, les composants de stockage et l'éolienne présentent des coûts totaux nettement plus élevés, ce qui indique un rapport coût-efficacité potentiellement plus faible.

L'analyse donne également un aperçu de la structure des coûts des composants. Les batteries nécessitent un investissement initial substantiel (54,080\$) et des coûts d'exploitation et de maintenance importants (27,754\$), ce qui contribue à leur coût total élevé. En outre, elles comprennent un coût de remplacement important (18,717\$) et une valeur de récupération (-1,474\$). L'éolienne se caractérise également par un investissement initial élevé (49,875\$) et des coûts d'exploitation et d'entretien relativement faibles (2,242\$), ce qui explique son coût total considérable.

La facture de consommation des lampes SHP reflète l'aspect financier de leur consommation d'énergie. Elle quantifie les dépenses annuelles nécessaires pour alimenter ces lampes, déterminées en multipliant la consommation annuelle (en kilowattheures) par le prix du kilowattheure (coût de l'énergie). Le coût de la facture de consommation (FC) est calculé par la formule de l'équation (3.1).

$$FC = \text{Consommation}_{\text{ann}} * COE \quad (3.1)$$

Le coût de la facture de consommation des lampes SHP est estimé à 19,456.763\$ par an.

2.4. Analyse environnementale

Les avantages des systèmes hybrides combinant l'énergie solaire et éolienne sont qu'ils permettent de réduire la dépendance aux combustibles fossiles. Par conséquent, leur émission totale de gaz toxiques est effectivement nulle, ce qui entraîne une réduction de 100% des émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre toxiques.

Les économies de CO₂ réalisées par le système hybride sont calculées en multipliant la production annuelle d'énergie par le coefficient d'émission (490 gCO₂e/kWh), comme indiqué par l'équation (3.2).

$$\text{Economie de CO}_2 = \text{Production d'énergie} * FE \quad (3.2)$$

Alors, le système étudié permet d'éviter la production de 116.550 tonnes de CO₂ dans l'environnement.

3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté et analysé les résultats d'optimisation de l'efficacité et de la faisabilité d'un système combiné photovoltaïque et éolien pour l'alimentation d'un système d'éclairage utilisant des lampes sodium haute pression, en l'analysant sous différents aspects techniques, économiques et environnementaux. Les résultats ont montré que cette configuration hybride permet de répondre aux besoins énergétiques tout en minimisant l'impact environnemental.

Sur le plan technique, l'analyse des performances a révélé que le système est capable de générer une quantité d'énergie suffisante pour répondre à la demande énergétique du système d'éclairage tout au long de l'année.

Du point de vue économique, l'étude a montré que le coût moyen de la production d'électricité sur la durée de vie du système est compétitif, ce qui en fait une option économiquement viable.

Sur le plan environnemental, l'utilisation de sources d'énergie renouvelables permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de minimiser l'empreinte carbone du système d'éclairage.

L'utilisation des lampes sodium haute pression SHP présente plusieurs aspects négatifs, notamment une consommation d'énergie élevée et une durée de vie limitée. Ces lampes sont moins efficaces sur le plan énergétique par rapport aux solutions plus modernes comme les LED. Dans le chapitre suivant, nous examinerons en détail les avantages de l'éclairage LED, notamment sur le dimensionnement du système hybride PV éolien avec stockage, la faisabilité économique en termes de TNPC, et le coût de la facture d'électricité.

Chapitre 4

Analyse comparative et discussions

1. Introduction

Ces dernières années, les lampes LED ont révolutionné l'industrie de l'éclairage grâce à leur efficacité énergétique exceptionnelle et à leur longue durée de vie. Contrairement aux lampes à incandescence et fluorescentes traditionnelles, les LED offrent de nombreux avantages qui en font le choix privilégié pour les applications d'éclairage résidentielles, commerciales et extérieures.

L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer la faisabilité et l'efficacité de l'utilisation de sources d'énergie renouvelables hybrides photovoltaïque/éolien en combinaison avec les nouvelles technologies des lampes LED. En outre, ce chapitre propose une comparaison détaillée des performances de l'éclairage à LED par rapport à l'éclairage à sodium haute pression (SHP) afin de mettre en évidence les améliorations et les avantages de cette transition en termes techno-économiques.

2. Analyse et discussion des résultats - Cas LED

Cette section a pour objectif de fournir une analyse complète des performances du système d'énergie renouvelable pour l'éclairage LED, détaillant les résultats obtenus en tenant compte des différents aspects techniques, énergétiques et économiques.

2.1. Architecture optimale du système

L'architecture optimale du système est présentée dans la figure 4.1. La taille du système PV est de 24 kW avec 9 unités d'éoliennes WES 5 Tulipo, d'une capacité nominale de 2.5 kW chacune. La capacité combinée de l'ensemble du système est de 46.5 kW, comprenant la capacité du générateur photovoltaïque et des éoliennes. Le système énergétique est équipé de 204 batteries pour stocker l'énergie excédentaire générée par les sources renouvelables. La taille optimale de l'onduleur et du redresseur est de 19 kW.

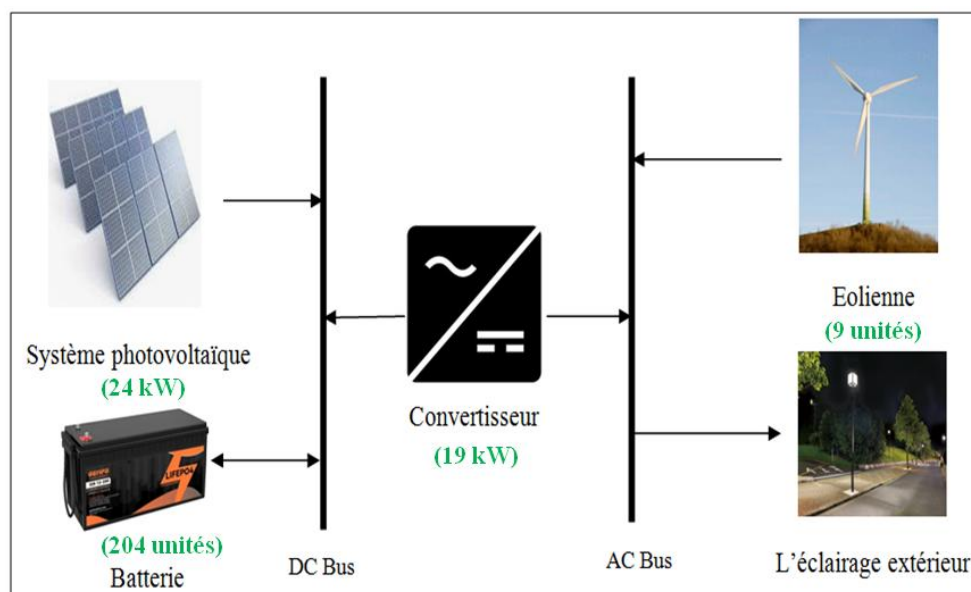


Figure 4.1. Architecture optimale du système - Cas LED.

2.2. Production d'énergie

La figure 4.2 montre un aperçu complet de la production mensuelle d'électricité éolienne et photovoltaïque au cours de l'année. La production combinée des deux sources est estimée à 98,008 kWh annuellement pour couvrir la charge primaire de l'éclairage de 43,405 kWh/an.

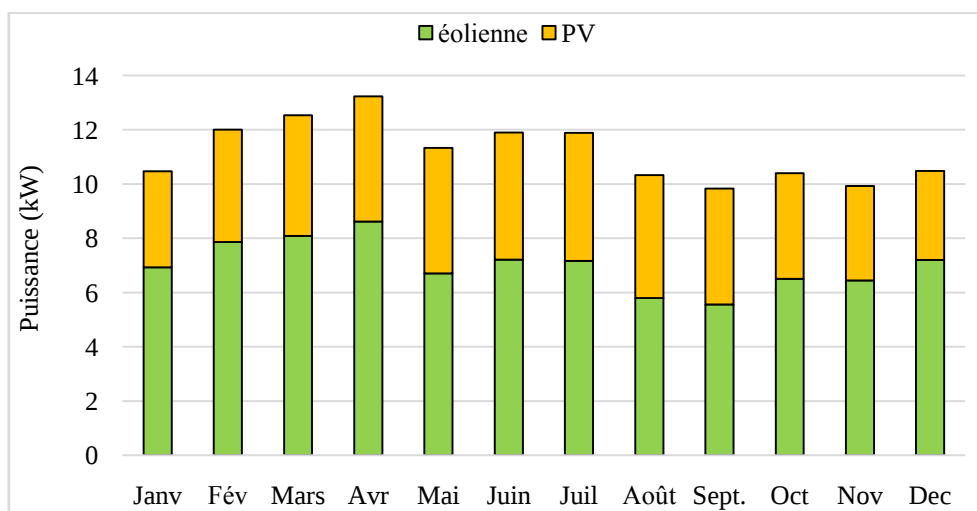


Figure 4.2. Production électrique mensuelle moyenne.

La puissance générée par l'éolienne fluctue tout au long de l'année, allant d'environ 5.56 kW en septembre à 8.62 kW en avril. Il est à noter qu'il y a un pic en avril, ce qui indique des conditions de vent favorables pendant ce mois. La puissance produite par le générateur photovoltaïque varie d'environ 3.29 kW en décembre à 4.73 kW en juillet. Contrairement à l'énergie éolienne, la production d'énergie solaire suit généralement un schéma saisonnier,

avec une production plus élevée pendant les mois les plus ensoleillés et une production réduite pendant l'hiver.

Comme présenté dans la figure 4.3, la production totale du système PV contribue à hauteur de 37%, soit l'équivalent de 36,688 kWh par an. Le tableau 4.1 contient des données essentielles concernant le fonctionnement et les caractéristiques du système photovoltaïque.

Tableau 4.1. Paramètres clés de performance du système photovoltaïque.

Quantité	Valeur	Unités
Capacité nominale	240	(kW)
Puissance moyenne	42	(kW)
Energie moyenne de sortie	101	(kWh/jour)
Puissance maximale	22.6	(kW)
Facteur de capacité	175	(%)
Coût de production	0.0494	(\$/kWh)
Heures de fonctionnement	4,387	(heur/an)
Production totale	36,688	(kWh/an)

De plus, l'électricité totale produite par l'éolienne est de 61,320 kWh par an, avec une contribution dans le mix énergétique estimée à 63%. Les données énergétiques relatives à l'opération du système éolien sont résumées dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Paramètres et caractéristiques associées à la performance de l'éolien.

Quantité	Valeur	Unités
Capacité nominale totale	22.5	(kW)
Puissance moyenne	7.0	(kW)
Puissance maximale	23.6	(kW)
Facteur de capacité	31.1	(%)
Heures de fonctionnement	7,697	(heur/an)
Production totale	61,320	(kWh/an)
Coût	0.0341	(\$/kWh)

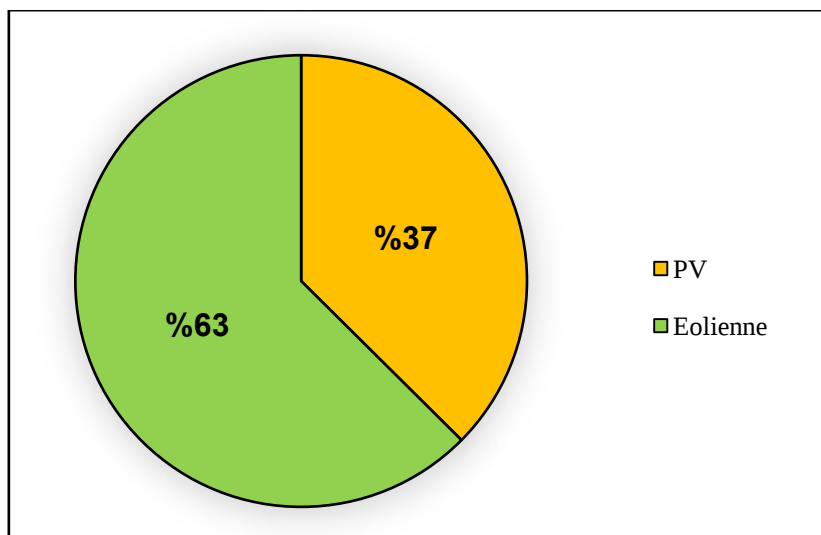


Figure 4.3. Contribution énergétique par source d'énergie.

La quantité d'électricité excédentaire produite est de 46,660 kWh/an (47.6%), ce qui indique un surplus d'énergie au-delà de ce qui est nécessaire pour répondre à la charge électrique. La charge électrique non satisfaite est très faible, avec une quantité de 30.5 kWh/an (0.1%), représentant le déficit de l'offre d'électricité par rapport à la demande. Toutefois, ce déficit est négligeable par rapport à l'excédent d'électricité et à la charge totale. De plus, la capacité manquante du système est estimée à 42.6 kWh/an (0.1%), reflétant le déficit de capacité pour répondre à la demande de la charge électrique.

En termes de stockage, le système hybride nécessite une capacité nominale optimale de 245 kWh. Le tableau 4.3 fournit plus de détails et des informations sur le flux d'énergie des batteries de stockage.

Tableau 4.3. Caractéristiques d'opération des batteries de stockage.

Quantité	Valeur	Unités
Capacité nominale	245	(kWh)
Flux de vie utile	424,932	(kWh)
Énergie entrante	33,031	(kWh/an)
Énergie sortante	28,513	(kWh/an)
Pertes	4,422	(kWh/an)
Débit annuel	30,746	(kWh/an)

La capacité optimale du convertisseur est de 19.0 kW. Les informations sur les performances opérationnelles de l'onduleur et du redresseur sont résumées dans le tableau 4.4,

y compris la capacité optimale, l'énergie entrante et sortante, les pertes et les heures de fonctionnement.

Tableau 4.4. Caractéristiques de fonctionnement des convertisseurs.

Quantité	Onduleur	Redresseur	Unités
Capacité	19.0	19.0	(kW)
Heures de fonctionnement	3,472	2,977	(heur/an)
Énergie entrante	28,597	13,311	(kWh/an)
Énergie sortante	27,167	11,314	(kWh/an)
Pertes	1,430	1,997	(kWh/an)

2.3. Résultats économiques

Le coût total net actuel du système d'énergie renouvelable est de 82,940\$. Cette valeur reflète la valeur actuelle des dépenses futures et englobe les coûts des équipements tels que les panneaux solaires, les éoliennes, les batteries, le convertisseur, ainsi que l'installation et les autres coûts associés. Les détails du NPC pour différents composants sont montrés dans la figure 4.4. Le coût moyen de production d'un kilowattheure d'électricité pendant la durée de vie du système est d'environ 0.179\$, avec un coût d'exploitation annuel du système d'énergie renouvelable estimé à 2,028\$.

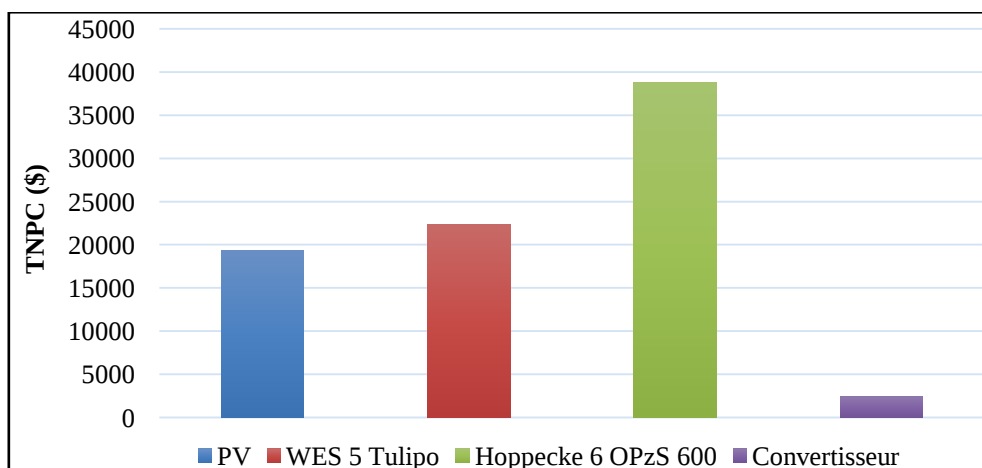


Figure 4.4. TNPC des composants du système hybride.

Les batteries nécessitent un investissement substantiel de 38,836\$. Les dépenses totales du système PV s'élèvent à 19,362 dollars, comprenant les coûts combinés de l'investissement initial, du remplacement des composants au fil du temps, de l'opération et de l'entretien continu. Le coût total de l'éolienne WES 5 Tulipo est en deuxième position avec 22,336\$.

Enfin, le convertisseur présente un TNPC estimé à 2,406\$. Le détail du coût total net actuel par type de coût est illustré dans la figure 4.5.

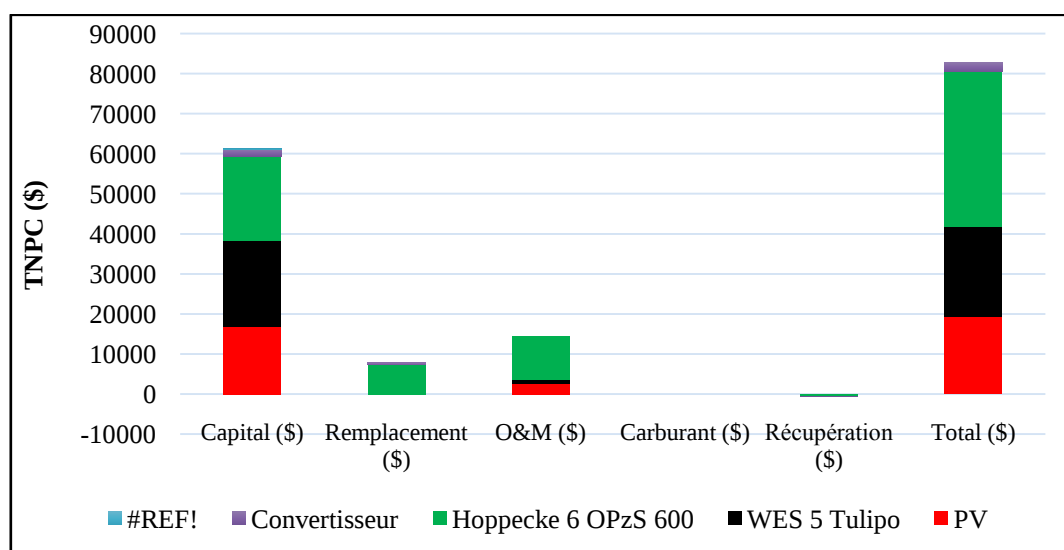


Figure 4.5. TNPC par type de coût.

Enfin, le coût de la facture de consommation dans le cas d'utilisation des technologies LED est estimé à 7,769.495\$. De plus, les économies réalisées en termes d'émissions sont estimées à 48,023.920 tonnes de CO₂.

3. Comparaison des résultats

Cette section a pour objectif de présenter une analyse comparative détaillée entre les deux systèmes d'éclairage à base de lampes SHP et LED, en examinant leurs attributs techniques et leur viabilité économique.

3.1. Comparaison technique

La comparaison des systèmes d'éclairage SHP et LED nécessite de prendre en compte le dimensionnement des composants du système hybride, la consommation, et le surplus d'électricité. Dans le cas du système d'éclairage HPS, il faut un système PV/éolien robuste qui génère 237,858 kWh/an pour alimenter l'ensemble des lampes. La taille optimale du système est composée de 62 kW de panneaux photovoltaïques, 20 unités d'éoliennes de 2.5 kW, 500 batteries et un convertisseur de 45 kW.

Bien qu'elles fournissent un éclairage suffisant, les lampes SHP ont l'inconvénient de consommer plus d'électricité que les lampes LED pour le même niveau d'éclairage.

Comparativement, les lampes LED, qui consomment moins d'énergie, offrent une efficacité énergétique supérieure. Par conséquent, la technologie LED nécessite moins d'électricité pour produire la même quantité de lumière que les lampes SHP. Le système d'éclairage LED nécessite un système photovoltaïque/éolien hybride pour produire un total annuel de 43,405 kWh consommé par les lampes. Les résultats obtenus montrent une diminution considérable dans la taille des différents composants du système, comme illustré dans la figure 4.6. L'avantage de la configuration associée au système d'éclairage SHP est la grande quantité d'électricité excédentaire qui peut être utilisée pour alimenter d'autres charges.

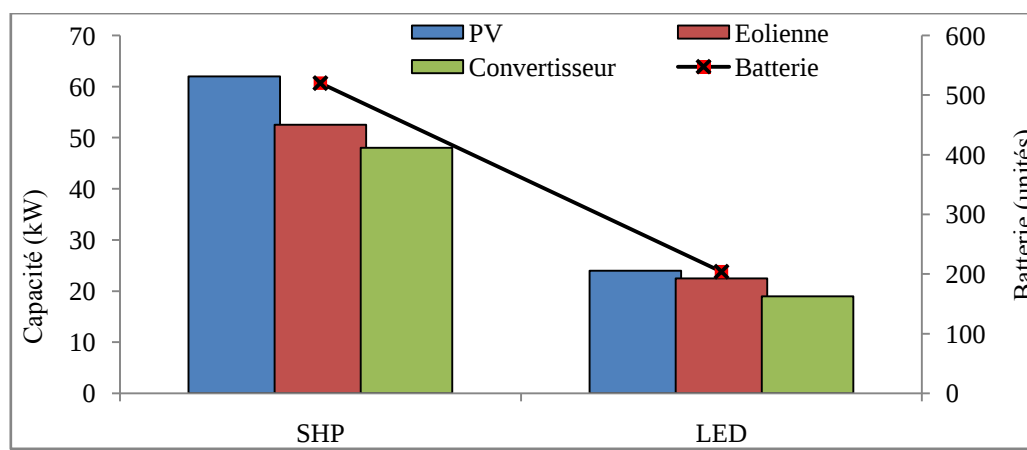


Figure 4.6. Dimensionnement du système pour les deux cas: SHP et LED.

3.2. Comparaison économique

La comparaison entre les lampes SHP et les lampes LED alimentées par le système hybride PV/éolien permet de mieux apprécier la viabilité économique, notamment en termes de TNPC et de coût de la facture d'électricité. Tout d'abord, si l'on examine le coût total net actuel, le système SHP exige un investissement substantiel avec un TNPC de 207,292\$. En revanche, le système à LED présente un coût total net actuel nettement inférieur de 82,940\$. Cela est dû à la diminution de la taille des composants dans le système. Les mêmes observations s'appliquent aux différents coûts, y compris les coûts d'exploitation, d'entretien et de réparation. De plus, la faible consommation d'énergie de la technologie LED se traduit par un faible coût de la facture d'électricité par rapport aux anciennes lampes SHP (figure 4.7).

Si l'on considère l'ensemble de ces facteurs, l'investissement initial pour le système HPS est substantiel, mais le système LED offre une solution financièrement plus durable à long terme. Non seulement il entraîne des coûts d'exploitation plus faibles, mais son efficacité énergétique, sa longévité, ses exigences minimales en matière d'entretien et sa durabilité

peuvent permettre de réaliser des économies importantes pendant toute la durée de vie du système.

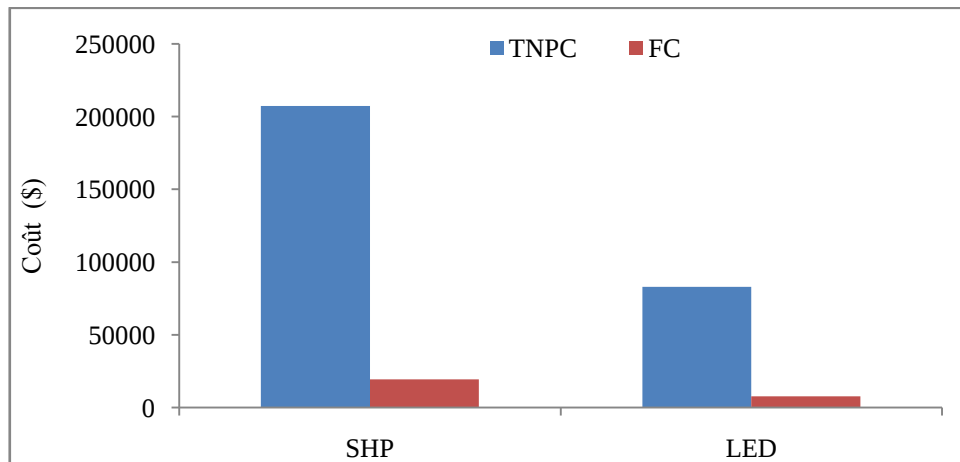


Figure 4.7. Comparaison économique pour le cas LED et SHP.

En termes de comparaison globale, les systèmes d'éclairage à LED s'avèrent être le meilleur choix en raison de leur efficacité énergétique supérieure, ce qui se traduit par une consommation d'énergie et des coûts d'électricité moindres.

En outre, les systèmes à LED ont une empreinte environnementale plus faible que les systèmes HPS, contribuant moins aux émissions de carbone dans le cas où les ressources fossiles sont utilisées.

Bien que l'investissement initial requis pour la technologie LED puisse être plus élevé, les économies réalisées à long terme grâce à la réduction de la consommation d'énergie et de la facture d'électricité compensent cet investissement. En outre, les lampes LED ont une durée de vie plus longue et nécessitent moins d'entretien, ce qui réduit les interruptions et les coûts de maintenance au fil du temps.

Pour notre cas, l'utilisation des technologies LED permet de réaliser plusieurs avantages et réductions, tels que:

- La consommation énergétique est réduite d'environ 60.07%.
- Par conséquent, la taille totale de la source de production diminue de 59.39%.
- Économiquement, la réduction du TNPC est d'environ 60.00%.
- Le coût de la facture d'électricité chute d'environ 60.09%.

4. Stratégies et pratiques

En plus de la transition vers l'éclairage renouvelable avec l'intégration de la technologie LED, qui offre des économies substantielles en termes d'énergie, de coûts et d'impact environnemental par rapport à l'éclairage traditionnel, plusieurs autres aspects peuvent contribuer à atteindre ces objectifs.

- **Commandes d'éclairage**

- ✓ Détecteurs de présence: Ces dispositifs détectent les mouvements dans un espace et allument ou éteignent automatiquement les lumières, garantissant ainsi que les lumières ne sont utilisées que lorsque c'est nécessaire.
- ✓ Gradateurs: Les gradateurs permettent aux utilisateurs de régler la luminosité en fonction de leurs préférences et des tâches à accomplir, réduisant ainsi la consommation d'énergie pendant les périodes où un éclairage complet n'est pas nécessaire.
- ✓ Minuteries: Les minuteries peuvent programmer les opérations d'éclairage en fonction des schémas d'occupation et de la disponibilité de la lumière du jour, optimisant ainsi encore plus la consommation d'énergie.

- **Entretien des appareils d'éclairage**

- ✓ Nettoyage régulier: Le nettoyage régulier des appareils permet d'éliminer la poussière et les débris qui peuvent obstruer la lumière et réduire l'efficacité.
- ✓ Remplacement des composants défectueux: Le remplacement des ampoules et des composants défectueux permet d'éviter le gaspillage d'énergie dû à l'inefficacité ou au mauvais fonctionnement de l'équipement d'éclairage.
- ✓ Maintenance des connexions électriques: Le maintien de connexions électriques correctes et la résolution de tout problème lié au câblage ou aux commandes permettent de maximiser l'efficacité et la longévité du système d'éclairage.

- **Sensibilisation et formation**

- ✓ Pratiques d'efficacité énergétique: La sensibilisation aux pratiques d'efficacité énergétique et aux avantages de la réduction de la consommation d'éclairage peut entraîner des changements de comportement qui contribuent aux économies d'énergie.

- ✓ Formation continue: Former régulièrement le personnel sur l'utilisation optimale des systèmes d'éclairage et sur les dernières technologies disponibles peut renforcer l'efficacité des pratiques d'économie d'énergie.

En mettant en œuvre ces stratégies et pratiques, on peut non seulement maximiser les avantages de la technologie LED, mais aussi assurer une gestion et une utilisation optimales de l'éclairage, conduisant à des économies d'énergie encore plus significatives et à une réduction de l'impact environnemental.

5. Conclusion

Notre analyse dans ce chapitre se concentre sur la présentation des résultats de simulation obtenus avec l'utilisation des lampes LED, qui offrent une efficacité énergétique supérieure à celle des lampes à sodium haute pression traditionnelles. Ensuite, nous avons présenté l'analyse comparative entre les deux scénarios en termes de dimensionnement du système hybride et également d'un point de vue économique. Les résultats montrent que la technologie LED permet de réduire la consommation, les tailles des composants, le TNPC, et le coût de la facture d'environ 60 %. En conclusion, la mise en œuvre du système d'éclairage à LED, soutenu par une infrastructure sophistiquée d'énergie renouvelable, représente une avancée significative dans le secteur de l'éclairage extérieur. L'adoption généralisée des systèmes d'éclairage à LED à l'avenir recèle un immense potentiel de réduction de la consommation d'énergie, de diminution des émissions de carbone et de contribution à un avenir plus durable.

Conclusion Générale

L'éclairage extérieur représente une part significative de la consommation énergétique des universités. Cette forte demande en énergie électrique accroît notre dépendance aux ressources énergétiques classiques, ce qui entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre et contribue au changement climatique. Notre sujet de mémoire s'aligne avec les objectifs de lutte contre le réchauffement climatique et de réduction des émissions établis par les gouvernements nationaux et internationaux, ainsi qu'avec les stratégies de notre pays visant à promouvoir et intégrer les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique pour la transition énergétique.

L'objectif principal de ce mémoire est d'explorer les possibilités d'introduire un éclairage extérieur respectueux de l'environnement au sein des campus universitaires comme moyen de la transition énergétique de notre pays, en mettant l'accent sur l'efficacité énergétique pour encourager l'autoconsommation. Dans ce sens, nous avons analysé la faisabilité technique, économique et environnementale, en mettant l'accent sur l'optimisation de l'utilisation de sources d'énergie renouvelable telles que le solaire, l'éolien et le stockage, pour répondre de manière efficace et écologique aux besoins d'éclairage extérieur universitaire. Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi plusieurs étapes présentées dans quatre chapitres.

D'après les statistiques détaillées du paysage énergétique actuel dans les contextes mondial et algérien, sur la production et la consommation d'énergie, ainsi que sur les émissions de CO₂, présentées dans le premier chapitre, nous avons compris les défis associés aux combustibles fossiles, tels que l'épuisement des ressources et les émissions de gaz à effet de serre, ce qui nous oblige à envisager une transition nécessaire vers les sources d'énergie renouvelables et l'efficacité énergétique.

Dans le deuxième chapitre, nous avons présenté la modélisation du système hybride PV-éolien-batterie destiné à l'éclairage extérieur de l'université. C'est une étape importante dans l'étude des systèmes énergétiques, car elle nous permet de comprendre la fonctionnalité, le comportement et le rôle de chaque composant du système, y compris les panneaux solaires, les éoliennes, les batteries de stockage et le convertisseur, ainsi que le flux d'énergie entre eux. De plus, nous avons exploré la fonctionnalité du logiciel HOMER comme outil de simulation et d'optimisation, ainsi que les différents critères utilisés pour évaluer la faisabilité technico-environnementale et économique du système.

Ensuite, dans le troisième chapitre, nous avons analysé et discuté les résultats d'optimisation obtenus pour le système hybride appliqué à l'éclairage au sodium haute pression (SHP) existant. Nous avons évalué les performances du système en termes de dimensionnement, d'efficacité énergétique, de faisabilité économique et de réduction potentielle des émissions de carbone.

Les résultats de la simulation montrent que la taille optimale globale du système est de 114.5 kW avec 520 unités de batteries de stockage et un convertisseur de 48 kW, capable de produire 237,858 kWh par an pour répondre aux besoins d'éclairage du campus estimés à 108,697 kWh. Le système montre également un surplus d'électricité considérable estimé à 45.9%, soit 109,130 kWh, avec un pourcentage négligeable de charge électrique non satisfaite de 0.1% (73.4 kWh). Économiquement, le système montre un coût total net actuel (TNPC) de 207,292\$ et un coût unitaire d'énergie de 0.179\$. De plus, le coût de la facture d'électricité est estimé à 19,456.763\$ par an, et le système permet une économie de 116.55 tonnes de CO₂ annuellement.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté une analyse comparative détaillée entre l'éclairage traditionnel à HPS et l'éclairage à LED proposé. De plus, l'analyse comparative montre que l'utilisation des technologies LED permet de réaliser plusieurs avantages et réductions, tels que : la consommation énergétique est réduite d'environ 60.07%. Par conséquent, la taille totale de la source de production diminue de 59.39%. Économiquement, la réduction du TNPC est d'environ 60.00%. Le coût de la facture d'électricité chute d'environ 60.09%.

En conclusion, la technologie LED, avec ses multiples avantages, permet de réduire la consommation d'énergie avec une durée de vie plus longue que le HPS, ce qui permet de réduire les coûts d'entretien et de remplacement. L'analyse comparative des technologies d'éclairage HPS et LED met en évidence les avantages des LED, ce qui en fait le choix privilégié pour un éclairage économe en énergie et respectueux de l'environnement. L'adoption et la combinaison du système hybride photovoltaïque/éolien/stockage et de la technologie d'éclairage LED entraîneront des avantages techniques, économiques et environnementaux substantiels par rapport à l'éclairage HPS, tels que: la réduction de la consommation, et par conséquent le dimensionnement des composants du système, la diminution ou l'évitement de la dépendance au réseau électrique, la maximisation de l'autoconsommation, et par conséquent, la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

En conclusion, l'intégration des énergies renouvelables pour les campus universitaires, notamment l'éclairage extérieur, représente une étape importante dans la réalisation des objectifs de développement durable, de transition énergétique et de dé-carbonisation du secteur énergétique dans le pays. Le soutien politique et financier est essentiel pour faciliter la transition énergétique.

Références Bibliographiques

- [1] EDF: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/jeunes-enseignants/pour-les-jeunes/lenergie-de-a-a-z/produire-de-lelectricite/quest-ce-que-naturels%20biomasse>.
- [2] CLIMAMAISON: <https://www.climamaison.com/lexique/energie-bois.htm>.
- [3] YOU MATTER: <https://youmatter.world/fr/definition/energies-fossiles-definition-exemples/>.
- [4] CONNAISSANCE DES ENERGIES: <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/gaz-effet-de-serre-dou-proviennent-les-emissions-de-methane>.
- [5] WEFORUM: <https://www.weforum.org/agenda/2022/12/these-countries-achieved-net-zero-emissions/>.
- [6] YOU MATTER: <https://youmatter.world/fr/definition/transition-energetique-definition-transition-rendre%20plus%20%C3%A9cologique>.
- [7] BRITANNICA: <https://www.britannica.com/>.
- [8] Forbes: <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/solar-energy-pros-and-cons/>.
- [9] SOLARGROUP: <https://la-solargroup.com/alternative-energy-vs-fossil-fuels/>.
- [10] IMF: <https://www.imf.org/-/media/Files/Publications-Notes/2023/English/CLNEA2023.ashx>.
- [11] NES FIRCROFT: How Is The Energy Landscape Changing: <https://www.nesfircroft.com/>.
- [12] NESFIRCROFT: <https://www.nesfircroft.com/resources/blog/how-is-the-energy-landscape-changing>.
- [13] NES Fircroft: <https://www.nesfircroft.com/resources/blog/how-is-the-energy-landscape-changing-Hydrogen,Currently>.
- [14] WOODMAC: <https://www.woodmac.com/>.
- [15] ASEAN: <https://asean.org/wp-content/uploads/2023/04/ASEAN-Plan-of-Action-for-Energy.pdf>.
- [16] IEA: <https://www.iea.org/news/world-energy-outlook-2022-shows-the-global-energy-crisis-can-be-a-historic-turning-point-towards-a-cleaner-and-more-secure-future>.
- [17] IRENA: <https://www.irena.org/Digital-Report/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>.
- [18] IEA: <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2023/overview-and-key-findings>.
- [19] MCKINSEY: <https://www.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2023>.
- [20] CARBONBRIEF: <https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-could-peak-as-soon-as-2023-iea-data-reveals/>.
- [21] RECHARGE NEWS: <https://www.rechargenews.com/energy-transition/record-breaker-world-s-largest-green-hydrogen-project-with-150mw-electrolyser-brought-on-line-in-china/2-1-1160799>.
- [22] SAPIENS: <https://journals.openedition.org/sapiens/823>.
- [23] UTILITIES ONE: <https://utilitiesone.com/tidal-energy-potential-a-renewable-answer-for-coastal-power-demands>.
- [24] Gray Group International: <https://www.graygroupintl.com/blog/tidal-energy>.
- [25] Hassan Q. Azzawi I.D.J, Sameen A.Z, Salman, H.M. Hydrogen fuel cell vehicles: Opportunities and challenges. Sustainability, 15, 11501. 2023.
- [26] ENERGY.GOV: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>.

- [27] Amer A, Attar H, As'ad S, et al. Floating photovoltaics: assessing the potential, advantages, and challenges of harnessing solar energy on water bodies. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 324-339. 2023.
- [28] ENERGY VOICE: <https://www.energyvoice.com/renewables-energy-transition/384813/china-starts-up-worlds-largest-green-hydrogen-plant/>.
- [29] WORLD NUCLEAR ASSOCIATION: <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/renewable-energy-and-electricity.aspx>.
- [30] TESLA: https://www.tesla.com/en_eu/blog/introducing-megapack-utility-scale-energy-storage.
- [31] FULD: <https://www.fuld.com/tesla-energy-the-green-energy-storage-giga-disrupter/>.
- [32] Carrasco Ortega P, Durán Gómez P, Mérida Sánchez J.C et al. Battery energy storage systems for the new electricity market landscape: modeling, state diagnostics, management, and viability-A review. *Energies*, 16, 6334. 2023.
- [33] Prasad K.A, Chand A.A, Kumar, N.M, et al. A critical review of power take-off wave energy technology leading to the conceptual design of a novel wave-plus-photon energy harvester for island/coastal communities' energy needs. *Sustainability*, 14, 2354. 2022.
- [34] NATIONALGEOGRAPHIC: <https://www.nationalgeographic.com/science/article/150116-floating-solar-power-japan-yamakura>.
- [35] Gray Group International: <https://www.graygroupintl.com/blog/tidal-energy>.
- [36] Schrank S, Schwable C, Weil, et al. Germany's CoradiaiLint hydrogen train and Japan's green hydrogen strategy: A comparative study. *Sustainability*, 14, 5627. 2022.
- [37] POWER-TECHNOLOGY: <https://www.power-technology.com/projects/hellisheidi-geothermal-power-plant/>.
- [38] Schmidt O, Melchior S, Hawkes, et al. Role of lithium-ion batteries and pumped hydro storage in future energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110053. 2022.
- [39] Brown L, Green J, Smith T, et al. Optimizing energy consumption with artificial intelligence: applications in smart grid systems. *Sustainability*, 15, 4532. 2023.
- [40] ALBIOMA: <https://www.com/magazine/quest-ce-que-lintermittence-energetique>.
- [41] TRADE.GOV: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/algeria-renewable-energy>.
- [42] TRADE.GOV: <https://www.trade.gov/country-commercial-guides/algeria-oil-and-gas-hydrocarbons>.
- [43] WORLDDATA: https://www.worlddata.info/africa/algeria/energy-consumption.php#google_vignette
- [44] COUNTRYECONOMY: <https://fr.countryeconomy.com>.
- [45] COUNTRYECONOMY: <https://fr.countryeconomy.com/emissions-co2/Algerie>.
- [46] Bouraiou A, Necaibia A, Boutasseta N, et al. Status of renewable energy potential and utilization in Algeria. *Journal of Cleaner Production*, 246,119011. 2020.
- [47] Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique CEREFÉ: <https://www.cerefe.gov.dz/fr/accueil/>.

- [48] Nixon JD, Bhargava K, Halford A, et al. Analysis of standalone solar streetlights for improved energy access in displaced settlements. *Renewable Energy*, 177, 895-914. 2021.
- [49] Rajab Z, Khalil A, Amhamed M, et al. Economic feasibility of solar powered street lighting system in Libya. 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC), Amman, Jordan. pp. 1-6. 10.1109/IREC.2017.7926027. 2017.
- [50] Haffaf A, Lakdja F, Meziane R, et al. Solar energy and LED technologies for street lighting demand side management SLDSM. *Przegląd Elektrotechniczny*, 96(5). 2020.
- [51] Masoud M I. Street lighting using solar powered LED light technology: Sultan Qaboos University Case Study. 2015 IEEE 8th GCC Conference & Exhibition, Muscat, Oman, 2015, pp. 1-6. 10.1109/IEEEGCC.2015.7060015. 2015.
- [52] Boulmrharj S, Bakhouya M, Khaidar M. Green hydrogen for public transportation fueling and street lighting electrification: Towards more sustainable Moroccan cities. *Sustainable Production and Consumption*, 36, 217-232. 2023.
- [53] Haffaf A, Lakdja F, Meziane R, et al. Sustainable and cost-effective configuration of street lighting system. *Electrotehnica, Electronica, Automatica (EEA)*, 67(1), 98-106. 2019.
- [54] Wadi M, Shobole A, Tur M R, et al. Smart hybrid wind-solar street lighting system fuzzy based approach: Case study Istanbul-Turkey. 2018 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 71-75, 2018.
- [55] Yong-Sik L, Jae-Hyeon G. Development of LED street lighting controller for wind-solar hybrid power system. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 9(5), 1643-1653. 2014.
- [56] Agus U, Gunawan A, Septian D P. A hybrid photovoltaic-wind electricity generation for street lighting. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(5), 2020.
- [57] Jahangir H, Nasir A. Algeelani A, et al. Solar-wind power generation system for street lighting using internet of things. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 26(2), 639-647. 2022.
- [58] Nadwan MA, Handri A. Design of a hybrid wind-solar street lighting system to power LED lights on highway poles. *AIMS Energy*, 10(2), 177-190. 2022.
- [59] Hossein KL. Photovoltaics: Everything You Need in One Guide: <https://www.greenmatch.co.uk/solar-energy/photovoltaics>.
- [60] HOMER energy: <https://homerenergy.com/>.
- [61] Lambert T. Chapter 15: Micro power system modeling with HOMER 2006. <https://homerenergy.com/documents/MicropowerSystemModelingWithHOMER.pdf>.
- [62] HOMER software user support options: <https://homerenergy.com/support/index.html>.
- [63] Independent Statistics and Analysis EIA (U.S. Energy Information Administration), Solar explained Photovoltaic and electricity: <https://www.eia.gov/energyexplained/solar/photovoltaics-and-electricity.php>
- [64] Photovoltaic system, energy education: https://energyeducation.ca/encyclopedia/Photovoltaic_system.
- [65] e-LEE : <https://sites.uclouvain.be/elee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables>.

- [66] Haffaf A, Lakdja F, Ould Abdeslam D. Experimental performance analysis of an installed microgrid-based PV/battery/EV grid-connected system. *Clean energy*, 6(4), 599-618. 2022.
- [67] Abu-Rub H, Malinowski M, Al-Haddad K. AC–DC–AC converters for distributed power generation systems. *Power electronics for renewable energy systems. Transportation and Industrial Applications*. IEEE, 319-364, 2014.
- [68] Monolithic power systems. Introduction to DC/AC converters. <http://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-ac-converters/introduction-to-dc-ac-converters>.
- [69] Blaabjerg F, Yang Y. Converters for distributed power generation systems. *Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering*, 1-14, 2015.
- [70] Alonso JM, Calleja AJ, Gacio D, et al. A long-life high-power-factor HPS-lamp LED retrofit converter based on the integrated buck-boost buck topology. *IECON 2011 - 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Melbourne, VIC, Australia, 2860-2865, 2011.
- [71] Gil-de-Castro A, Moreno-Munoz A, Larsson A, et al. LED street lighting: A power quality comparison among street light technologies. *Lighting Research & Technology*, 45(6), 710-728, 2013.
- [72] M. Davidovic, M. Kostic, Comparison of energy efficiency and costs related to conventional and LED road lighting installations, *Energy*, 254(2), 124299, 2022.
- [73] André TQ, Rodrigo SL, Ana Carolina FB, et al. Efficiency evaluation in public lighting by using led and HPS technologies. *International Journal of Energy Science and Engineering*, 5(1), 12-21, 2019.
- [74] Cheng YK, Cheng KWE. General study for using LED to replace traditional lighting devices. 2006 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, ICPESA. 173- 177, 2006.
- [75] Yoomak S, Jettanasen C, Ngaopitakkul, A, et al. Comparative study of lighting quality and power quality FOR LED and HPS Luminaires in a roadway lighting system. *Energy and Buildings*, 159, 2017.
- [76] CEREFÉ. Eclairage public en Algérie. Référentiel National pour une Lumière de Qualité et Eco énergétique: <https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Eclairage-Public-en-Algerie.pdf>. 2021.
- [77] Capital.fr. <https://www.capital.fr/devises/cours/USD/DZD>. Accès le 10/05/2024.