

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOAND OULHADJE-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

Mémoire fin de cycle

Présenté par :

Kerfouf Youcef et Merabti Hocine Ali

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : génie mécanique

Option : énergétique

Thème :

**Évaluation technico-économique d'un miro réseau PV/éolienne, connecté
et non connecté au réseau .**

Devant le jury composé de :

Dr. Merzouk	Grade	UAMOB	Président
Dr. Baghdadi	Grade	UAMOB	Encadrante
Dr. Lakhal	Grade	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2022/2023




نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) قورقوني يوسف.....الصفة: طالب، استاذ، باحث طالب
الحامل(ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 120391671 والصادرة بتاريخ 2016/4/4
المسجل(ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم التطبيقية قسم قسم ميكانيك
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث(مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Evaluation technique économique d'un micro-
réseau PV / éolienne connecté au réseau
تحت إشراف الأستاذ(ة): بجنادي
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 2023 / 12 / 11


توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

Turnitin

% 25

النسبة:

الامضاء:





نموذج التصريح الشرفي الخاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز بحث.

انا الممضي اسفله،

السيد(ة) م. ر. ب. ل. ج. ح. س. ع. م. ا. ط. ب. علي الصفة: طالب، اسكاذ، باحث طالب
الحامل (ة) لبطاقة التعريف الوطنية: 4.033.86.82.3 والصادرة بتاريخ 2022/10/23
المسجل (ة) بكلية / معهد العلوم والعلوم التطبيقية قسم هندسة ميكانيكية
والمكلف(ة) بإنجاز اعمال بحث (مذكرة، التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، اطروحة دكتوراه).
عنوانها: Evaluation technique - économique d'un micro
réseau PV/Eolienne connecté et non connecté
تحت إشراف الأستاذ(ة): ب. ع. د. ب.
أصرح بشرفي اني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية الاخلاقيات المهنية والنزاهة الاكاديمية المطلوبة
في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ: 11/11/23

توقيع المعني(ة)

رأي هيئة مراقبة السرقة العلمية:

النسبة:

% 25

الامضاء:



Remerciement

Tout d'abord, Dieu merci, qui nous a donné la force et la patience pour terminer ce Travail.

Nous remercions nos familles qui nous ont toujours encouragés Et soutenu tout au long de nos études.

Nous adressons notre reconnaissance et nos remerciements à notre promotrice Madame Baghdadi, pour avoir accepté de nous guider sur le bon chemin du travail.

De cette façon, nous apprécions profondément membres du jury d'accepter de recevoir notre manuscrit et pour soulever les critiques nécessaires pour enrichir nos connaissances Et en plus de notre travail, sans parler des remerciements.

Remercier tous les enseignants qui nous ont formés. Ils ont fourni leur aide précieuse. Nous remercions également les personnes qui nous soutiennent. Nous encourageons ceux qui sont prêts ou éloignés.

Je dédie ce mémoire

*A mon père et ma très chère maman, qui m'ont
Eclaires le chemin en me donnant la main tout au*

Long de mes années d'étude

A mes frères

A sœurs

A tous mes amis sans exception

A tous mes profs de département de génie mécanique

A tous ceux qui me sont chers

Signé Merabti Hocine Ali

*« Je dédie ce travail à toute l'humanité, à tous les misérables et
les damnés de la terre »*

L'espoir est permis !

*Et comme le dit le poète Mahmoud Darwish : « sur cette terre, il
y'a ce qui vaille la peine qu'on vive »*

Signé Kerfouf Youcef

Résumé

Dans cette étude, nous avons réalisé une simulation d'un système hybride connecté au réseau électrique de la wilaya d'Adrar, en Algérie, en utilisant le logiciel HOMER Pro. Nous avons effectué une analyse comparative sur six scénarios afin de déterminer le scénario le plus avantageux. Le site choisi est également pourvu de données météorologiques telles que le rayonnement solaire et la température ambiante, qui ont été prises en compte dans notre analyse.

Mots clés : PV, éolienne, système HOMER Pro, simulation, système hybride.

Abstract

In this study, we carried out a simulation of a hybrid system connected to the electrical network of the wilaya of Adrar, in Algeria, using the HOMER Pro software. We performed a comparative analysis on six scenarios in order to determine the most advantageous scenario. The chosen site is also provided with meteorological data such as solar radiation and ambient temperature, which were taken into account in our analysis.

Keywords: PV, wind turbine, HOMER Pro system, simulation, hybrid system.

ملخص

قمنا في هذه الدراسة بإجراء محاكاة لنظام هجين متصل بشبكة الكهرباء لولاية أدرار، الجزائر، باستخدام برنامج HOMER Pro. لقد أجرينا تحليلاً مقارناً لستة سيناريوهات لتحديد السيناريو الأكثر فائدة. ويتم تزويد الموقع المختار أيضاً ببيانات الأرصاد الجوية مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة، والتي تم أخذها بعين الاعتبار في تحليلنا.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، توربينات الرياح، نظام هومر برو، المحاكاة، النظام الهجين

Sommaire

Introduction générale	Erreur ! Signet non défini.
Chapitre I Généralité et recherche bibliographique	4
I. 1 Contexte	4
I. 2 Définition des ressources énergétique	6
I. 3 Les typologies des ressources naturelles	6
I. 4 Les Ressource Naturelle non renouvelables (épuisable)	6
I. 5 Les Ressource Naturelle Renouvelables	13
I. 6 La consommation énergétique mondiale	18
I. 7 Conclusion	24
Chapitre II L'énergie éolienne	26
II. 1 INTRODUCTION	26
II. 2 Génération d'électricité à partir des sources d'énergie renouvelable	27
II. 3 L'Histoire de l'énergie éolienne	27
II. 4 Données Chiffrées sur l'éolien	28
II. 5 Structure de base d'une Éolienne « Classique »	31
II. 5. 1 Le mât	31
II. 5. 2 La nacelle	31
II. 5. 3 Le Rotor	32
II. 5. 4 Classification des éoliennes	32
II. 5. 4. 1 Taille des aérogénérateurs	32
II. 5. 4. 2 L'organe capteur	32
II. 5. 4. 3 Principe de Fonctionnement	34
II. 6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne	35
II. 6. 1 Avantages	35
II. 6. 2 Inconvénients	35

Sommaire

II. 7	Énergie éolienne en Algérie	35
II. 8	Conclusion	37
Chapitre III	L'énergie photovoltaïque	
	39	
III. 1	Introduction sur photovoltaïque	39
III. 2	Rayonnement solaire dans l'espace	40
III. 3	Capture solaire	42
III. 4	La photopile	43
III. 5	Effet photovoltaïque	43
III. 6	Installation	43
III. 7	Différents types de systèmes photovoltaïques	46
III. 7. 1	Systèmes autonomes	46
III. 7. 1. 1	Systèmes avec accumulateurs	46
III. 7. 1. 2	Système sans accumulateurs	46
III. 7. 2	Systèmes hybrides	47
III. 7. 3	Systèmes connectés au réseau	47
III. 8	Avantages et inconvénients des systèmes PV	49
III. 8. 1	Avantages	49
III. 8. 2	Inconvénients	49
III. 9	Mode de fonctionnement de la cellule PV	49
III. 10	Types de cellules photovoltaïques	49
III. 11	Composition d'un module photovoltaïque	52
III. 12	Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque	55
III. 13	Modèle de la cellule PV	56
III. 14	Conclusion	59
Chapitre IV	Modélisation d'un système hybride et discussion technico-économique	
	61	
IV. 1	Introduction	61

Sommaire

IV. 2	Système hybride	61
IV. 2. 1	Le but de systèmes hybride	61
IV. 3	Installation des systèmes hybrides autonomes	61
IV. 4	Les modèles mathématiques	63
IV. 5	Étude économique	66
IV. 6	Détermination de la configuration optimale selon l'analyse économique	69
IV. 7	Présentation du logiciel HOMER Pro	70
IV. 7. 1	Utilisation générale de HOMER Pro	70
IV. 8	Évaluation des ressources en énergies renouvelables et demande de charge.	72
IV. 8. 1	Estimation de la charge	73
IV. 9	Conception du système	75
IV. 10	Composants du modèle	76
IV. 10. 2	Résultats et discussion	78
IV. 11	Perspectives	87
IV. 12	Conclusion	88
	Conclusion générale	

Liste des figures

Figure 1 : Le charbon.....	8
Figure 2 : Les composants moléculaires « chimiques » de gaz naturel.....	8
Figure 3 : Schéma des gaz associé au pétrole.....	10
Figure 4 : Schéma de plusieurs catégories de sources géologiques du gaz naturel.....	11
Figure 5 : Centrale nucléaire.....	12
Figure 6 : Schéma de la fission.....	12
Figure 7 : Schéma de la fusion.....	13
Figure 8 : Mode de fonctionnement de l'énergie hydraulique .	14
Figure 9 : Différent types de l'hydraulique.	15
Figure 10 : Une source d'énergie géothermique.....	15
Figure 11 : Une description d'une éolienne .	17
Figure 12 : L'énergie solaire.	Erreur ! Signet non défini.
Figure 13 : La consommation d'énergie par habitant en 2019.	18
Figure 14 : Évolution de la consommation d'énergie primaire dans le monde.	19
Figure 15 : Evolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO2.	20
Figure 16 : Monde la consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2020.....	21
Figure 17 : Évolution des capacités électriques renouvelables dans le monde.	22
Figure 18 : Production d'électricité au 1 er semestre 2022 dans le monde.	23
Figure 19 : Production renouvelable d'électricité « évolution du cout de production et de facteur de charge moyen des différentes entre 2010 et 2021.	23
Figure 20 : Utilisation initiale d'énergie à l'échelle mondiale et projections.....	26
Figure 21 : La génération mondiale d'électricité à partir de sources renouvelables.	27
Figure 22 : Photographie de trois moulins à vent.	28
Figure 23 : Evolution des nouvelles installations éoliennes dans le monde.	29
Figure 24 : Répartition par zone géographique des éoliennes dans le monde.....	30
Figure 25 : Principaux composants d'une éolienne.....	31
Figure 26 : Schéma Eolienne à axe horizontal.	33
Figure 27 : Éolienne disposés verticalement.	34
Figure 28 : Carte des chants de vent en Algérie .	36

Liste des figures

Figure 29 : Étude de la composition spectrale du rayonnement solaire	41
Figure 30 : Composantes du rayonnement solaire au sol.	42
Figure 31 : Capture thermique.	43
Figure 37 : Les constituants d'un système PV.....	44
Figure 38 : Illustration schématique d'un système solaire photovoltaïque autonome incluant une batterie	46
Figure 39 : Système photovoltaïque connecté directement au réseau.	48
Figure 40 : Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.....	48
Figure 41 : Cellule poly cristalline et monocristalline.....	50
Figure 42 : Cellule Amorphe.	51
Figure 43 : Ruban métallique d'une cellule.....	52
Figure 44 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.	53
Figure 45 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.	54
Figure 46 : Modèle de la cellule photovoltaïque.	55
Figure 48 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.....	57
Figure 49 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.	58
Figure 50 : Circuit équivalent simple de la cellule PV.	58
Figure 51 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle de Bishop.	59
Figure 52 : Structure DC d'un système hybride	62
Figure 53 : Structure à bus AC d'un système hybride	62
Figure 54 : Structure à bus mixte (DC& AC) d'un système hybride	63
Figure 56 : L'interface de logiciel HOMER Pro.....	71
Figure 57 : Les équipements.....	71
Figure 58 : Le schéma de système et les ressources.	71
Figure 59 : Irradiation solaire pour la zone étudiée.....	73
Figure 60 : Profil de température ambiante annuelle.....	73
Figure 61 : Profil de la vitesse de vent annuelle.....	73
Figure 62 : Profil de charge horaire.	74
Figure 63 : Profil de charge mensuel.....	74
Figure 64 : Schémas pour six scénarios.....	76
Figure 65 : La production d'électricité pour le 1 er scenario.....	78
Figure 66 : Le prix de chaque élément de système hybride.....	79
Figure 67 : La production d'électricité pour le 2 -ème scenario.....	79
Figure 68 : Le cout de chaque élément de 2 -ème scenario de système hybride.....	79

Liste des figures

Figure 69 : La production électrique pour le 3 -ème scenario.	80
Figure 70 : Le cout de chaque élément de 3 -ème scenario de système hybride.	80
Figure 71 : La production électrique pour le 4 -ème scenario de système hybride.	80
Figure 72 : Le cout de chaque élément de 4 -ème scenario de système hybride.	81
Figure 73 : La production électrique pour le 5 -ème scenario de système hybride.	81
Figure 74: Le cout de chaque élément de 5 -ème scenario de système hybride.	82
Figure 75 : La production électrique pour le 6 -ème scenario de système hybride.	82
Figure 76 : Le cout de chaque élément de 6 -ème scenario de système hybride.	83
Figure 77 : Système architecture.	85
Figure 78 : La production annuelle d'énergie pour le système proposé.....	85
Figure 79 : Les moyennes mensuelles solaires d'Adrar.	85
Figure 80 : Le profil quotidien solaire d'Adrar.	86
Figure 81 : Rendement quotidien de l'énergie solaire photovoltaïque.....	86
Figure 82 : Les résultants sous la forme graphique '1' (grid connected).	86
Figure 83 : Les résultats sous forme graphique '2' (Grid connected).	87
Figure 84 : Les résultats sous forme graphique '01' (renouvelables).....	87
Figure 85 : Les résultats sous forme graphique '2'(renouvelables).....	87

Liste des tableaux

Tableau 1 : Dimensions des éoliennes	32
Tableau 2: Les avantages et inconvénients d'une cellule photovoltaïque.....	51
Tableau 3 : Données météorologiques pour la wilaya d'Adrar.	72
Tableau 4 : Profil de charge horaire.....	75
Tableau 5 : Des caractéristiques pour PV, éolienne, batterie et convertisseur.	77
Tableau 6 : Résultants techniques et économiques.....	83

Liste des symboles

AIE	Agence internationale de l'énergie.
GWEC	Global Wind Energy Council.
CC	Courant continue.
AC	Courant alternatif.
UV	Ultraviolet.
IR	Infrarouge.
On grid	Connecte au réseau électrique
Off grid	Déconnecté au réseau électrique
PV	Panneaux photovoltaïques
Wt	Wind turbine « turbine éolienne, l'énergie éolienne ».
Btr	Batteries du stockage.
Vco Ns	La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.
Icc Ns	Courant de court-circuit de Ns cellules en série.
Icc Np	Le courant de court-circuit de Np cellules en parallèle
Vco Np	Tension de circuit ouvert d'un panneau solaire à NP cellules en parallèle.
$V_t = \frac{KTc}{q}$	potentielle thermodynamique
Icc	Courant de court-circuit.
Ico	Tension de circuit ouvert.
I	Production d'électricité par la cellule [A].
V	Tension de fonctionnement de la cellule [V].
Ip	courant [A]
Is	Courant de saturation de la diode [A].
Rs	Résistance série [ohm].
Rsh	Résistance shunt [ohm]
q	Charge unitaire est de $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb.
R	Constante de Boltzmann = $1,38. 10^{-19}$ J/k.
A	Taux de qualité de la diode.

Liste des Symboles

T	Température de référence de la cellule [Kelvin].
Nmod	Le nombre des modules
Pmod	La puissance d'un module.
Nbranche	le nombre des onduleurs.
Pmod	la puissance d'un onduleur.
Comd	Coût des modules PV.
Cond	Coût des onduleurs.
Cb	Coût des batteries.
Cent/main	Coût annuel d'entretien et de maintenance.
C rempl	Coût de remplacement éventuel de certains sous-systèmes.
Ci -w	Coût initial du système éolien, DA/W.
Ci -pv	Coût initial du système photovoltaïque, DA/W.
Ci – bat	Coût initial du système de stockage, DA/W.
Ci-ond	Coût initial de l'onduleur, DA/W.
Sond	Puissance apparente de l'onduleur, VA.
mw	Pourcentage de maintenance annuel du système éolien (%).
mpv	Pourcentage de maintenance annuel du système photovoltaïque (%).
mbat	Pourcentage de maintenance annuel du système de stockage(%).
mmod	Pourcentage de maintenance annuel de l'onduleur (%).
dv sys	Durée de vie du système (année).

Introduction générale

La demande globale en énergie continue de croître, soulevant des questions cruciales concernant le réchauffement climatique attribuable aux gaz à effet de serre, ainsi que sur l'épuisement imminent des ressources fossiles. À la lumière de cette prise de conscience, il devient impératif de promouvoir un développement économique qui soit respectueux de l'environnement.

La transition énergétique revêt une importance cruciale pour la préservation de la planète terre, de la nature et des vies humaines. Dans cette perspective, nous avons entrepris la simulation d'un système hybride visant à parvenir à une solution plus durable, tout en garantissant l'approvisionnement électrique de la population et en soutenant les besoins énergétiques des zones industrielles pour favoriser la production industrielle nationale.

Notre étude a consisté à mettre en place un système hybride intégrant des éoliennes, des panneaux solaires, des batteries de stockage, des réseaux électriques et des convertisseurs. En utilisant le logiciel HOMER Pro, nous avons ensuite simulé six scénarios afin de sélectionner la solution la plus durable et économiquement rentable, tout en répondant aux exigences techniques.

Structure du mémoire

Notre travail de recherche est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une recherche bibliographique et quelques généralités sur les énergies fossiles et renouvelables ainsi que des données mondiales sur la production et la consommation d'énergies, en se concentrant spécifiquement sur l'énergie électrique.

Le deuxième chapitre se focalise sur la description et la présentation de l'énergie éolienne.

Le troisième chapitre est également dédié à la description et à la présentation de l'énergie photovoltaïque.

En ce qui concerne le quatrième chapitre, il est axé sur la modélisation d'un système hybride, ainsi que sur l'analyse des résultats et la discussion techno-économique. Pour conclure

Introduction générale

notre travail, nous présenterons une conclusion générale, suivie de quelques perspectives et recommandations pour l'avenir.

Chapitre I
Généralité et
recherche
bibliographique

Chapitre I Généralité et recherche bibliographique

I. 1 Contexte énergétique mondial

Au fil des années, la planète terre a subi des changements climatiques et géologiques très importants, d'abord selon de nombreuses sources telles que le magazine Encyclopedia of World History, qui propose un article intitulé « The Ice Age », et le magazine Histoire de la Terre avec l'article les Glaciaires Guaténarines la planète bleue a traversé une phase appelée l'ère glaciaire, qui est une phase très ancienne dans laquelle une grande partie de notre terre a été gelée et congelée et passe par de nombreuses étapes. Nous franchissons une étape importante dans la sécurité mondiale, après la révolution industrielle de 1850, le théoricien communiste Vladimir Lénine observe dans son livre l'impérialisme, stade suprême du capitalisme que l'énergie est devenue un enjeu économique et stratégique important et se présente comme un véritable moteur développement. Pendant des deux derniers siècles, la consommation d'énergie a connu une croissance exponentielle. Mais les chocs pétroliers des années 1970 se sont manifestés à plusieurs niveaux, notamment économique et politique.

La disponibilité limitée des combustibles fossiles était également connue. Le gouvernement mondial reconnaissait que la surconsommation de ces derniers conduirait à leur raréfaction et à une augmentation de leur coût, mais surtout que la concentration des ressources les plus importantes dans certaines zones géographiques pouvait conduire à de graves crises économiques et politiques.

D'une part, la demande d'énergie augmente avec la croissance de la population mondiale, d'autre part, les émissions de gaz à effet de serre associées à la consommation croissante d'énergie risquent une évolution néfaste pour la planète entière.

Cette consommation irrationnelle a eu un impact négatif sur le climat, les humains et la nature en général, et nous a coûté de graves pertes de pollution atmosphérique en libérant de grandes quantités de monoxyde de carbone provenant des usines, des voitures et des machines associées à l'exploitation minière, au pétrole, à l'électricité et au gaz (énergie fossile). travailler et mettre l'humanité devant le fait accompli, se retirer de ce génome consumériste ou le condamner pour tous, conformément à la conférence de Paris sur le changement climatique de 2015, l'Union européenne et tous ses membres se sont réunis et ont signé l'accord de Paris sur

le climat et sont fortement engagés dans sa mise en œuvre, et conformément à cet engagement, les pays de l'UE, conformément au Conseil de l'Union européenne rapport «Accord de Paris sur le changement climatique» pour mettre l'UE sur la bonne voie pour devenir la première économie et société climatiquement neutre au monde d'ici 2050.

UE a présenté une stratégie actualisée de réduction des émissions à long terme et des plans climatiques de la date de congrès à la fin de 2020, et s'est engagée à réduire les émissions d'au moins 55 % d'ici 2030 par rapport aux niveaux de 1990.

Ces dernières années, le monde a également été témoin de changements très importants à des niveaux multiples et différents, le début de la pandémie de Covid-19, qui a provoqué une grande vague de panique dans le monde, et ses conséquences ont été très catastrophiques, car elle a secoué le système de santé mondial et causé plusieurs décès, selon les rapports de l'Organisation mondiale de la santé, créant des maladies respiratoires, des maladies cardiovasculaires, même des maladies psychologiques et mentales terriblement chez de nombreuses personnes, et ses restes ont dépassé beaucoup l'un des domaines et secteurs sensibles, qui est considéré comme le nerf pulsant, et la bouée de sauvetage de la population mondiale, y compris la sécurité énergétique, selon le compte rendu de la banque mondial qui intitule le titre « ralentissement des progrès vers l'accès universel à l'énergie sous l'effet de la pandémie de COVID-19 » qui daté 01 juin 2022, c'est-à-dire que le monde a connu une pénurie de ressources énergétiques (en particulier le pétrole brut, le gaz naturel et le GNL), Et lorsque la taille de la propagation du virus a diminué, le monde a connu une autre crise plus violente, qui est la guerre russo-ukrainienne, en février 2022, selon le rapport de l'organisation mondiale de l'énergie, l'Union européenne a soutenu l'Ukraine dans cette guerre, la Russie a pris une décision souveraine, qui est de cesser de vendre du gaz naturel aux européens, cette décision a mis les européens dans une spirale existentielle, de sorte qu'une véritable crise énergétique a été créée, et les prix du gaz et du pétrole ont augmenté de manière très significative par rapport à la hausse de 2008.

Cette flambée des prix de l'énergie a contribué à accélérer l'inflation à des niveaux sans précédent, mettant les familles dans des situations précaires, et a également touché de nombreuses petites et moyennes usines, les obligeant à réduire, voire à arrêter leur production. , incitant l'union européenne et les États-Unis d'Amérique à rechercher une autre alternative au gaz naturel liquéfié russe, en provenance d'Algérie et de Norvège, ainsi que d'Azerbaïdjan et

d'autres pays impliqués dans la production d'électricité utilisant du charbon et d'autres pays ont été introduits portant sur l'allongement de la durée de vie des centrales nucléaires.

Nous n'avons peut-être pas abordé beaucoup de choses, mais nous nous sommes concentrés sur deux facteurs importants et fondamentaux, la première est la crise environnementale et le réchauffement climatique, la seconde est la crise énergétique résultant du virus Covid-19 et de la guerre russo-ukrainienne. Ces deux éléments sont importants, selon l'organisation mondiale de l'énergie, car ils sont des facteurs clés pour accélérer les travaux de mise en œuvre du projet des énergies renouvelables et se concentrer sur l'indispensable transition énergétique, notamment l'énergie photovoltaïque et l'énergie de vent « éolienne ».

I. 2 Définition des ressources énergétique

Les ressources énergétiques sont des éléments naturels que l'on trouve à l'état brut, tels que le bois, le gaz naturel, le pétrole brut, l'uranium, le charbon, le rayonnement solaire, ainsi que l'énergie mécanique issue de la force humaine et animale, ou encore sous forme de la vitesse du vent et la chute de l'eau. Ces ressources peuvent être transformées en d'autres formes d'énergie, telles que la chaleur, l'électricité et l'énergie cinétique [1].

I. 3 Les typologies des ressources naturelles

Les ressources naturelles englobent les éléments et services fournis par la nature sans intervention humaine, présents dans l'atmosphère, le sol, le sous-sol et l'eau. Elles comprennent les matières premières, les produits sauvages, les habitats naturels, les matières organiques fossiles et les sources d'énergie. Ces ressources sont principalement mises à disposition de l'homme dans un contexte économique, agricole et industriel.

. Les ressources ce sont les moyens de production d'énergie et la seule source de nourriture pour l'homme. Ils servent également les besoins fondamentaux de tous les êtres. Cependant, les besoins sans fin de l'homme l'ont amené à abuser de la générosité de la nature. Les ressources sont classées en deux grandes catégories, tel que les ressources « épuisables » et les ressources « inépuisables ».

I. 4 Les Ressource Naturelle non renouvelables (épuisable)

Les ressources naturelles présentent une quantité fixe, mais leur durée d'utilisation peut être prolongée grâce à une utilisation, une réutilisation ou un recyclage plus ou moins efficace [2].

(Minéraux, pétrole, charbon, etc.) Sachant qu'elles mettent des milliers d'années à se constituer sont des énergies « non renouvelables » sont ressources finies. Elles sont également connues sous le nom d'énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) car elles proviennent de la terre et sont formées sur des échelles géologiques de temps. Pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux d'aujourd'hui, il faudra des efforts sans frontières en exploitant des sources d'énergie puissantes, notamment les énergies non renouvelables. Environ 80 % de l'énergie consommée dans le monde provient de sources fossiles. Les combustibles fossiles trouvent principalement leur utilisation dans le chauffage urbain, les transports et l'industrie. Cependant, leur combustion engendre une pollution et des émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement climatique [3].

Dans ce contexte, toutes les sources d'énergie non renouvelables seront épuisées en moins de deux siècles, certaines même en quelques décennies. Les ressources non renouvelables englobent :

I. 1. 1. Le charbon

Le charbon a joué un rôle crucial en alimentant la révolution industrielle en Europe au XIXe siècle en tant que principale source d'énergie. Cependant, son importance en tant que ressource future est remise en question. Sa formation a nécessité des millions d'années. Il présente diverses variétés et provient de diverses origines, mais toutes sont liées à l'accumulation de matière végétale sur des périodes extrêmement étendues [4]. Le charbon est une roche sédimentaire stratifiée, composée d'au moins 50 % de carbone organique et d'autres atomes supplémentaires tels que l'hydrogène, l'oxygène, l'azote et le soufre. Cette roche présente également des phases minérales qui forment la "cendre" après la combustion. Sa couleur varie du brun au noir, et il s'est formé à partir de matière organique qui a subi des transformations complexes lors de son dépôt et de son enfouissement dans des couches de sédiments. Au fil du temps, ces processus ont abouti à la création de cette ressource énergétique d'importance capitale [5].



Source : révolution

Figure 1 : Le charbon

I. 4. 1 Le gaz

Le gaz naturel est un gaz d'hydrocarbures naturel composé principalement de méthane. Son processus de formation implique l'exposition de couches de matière végétale et animale en décomposition à une chaleur et à une pression extrême, Il se forme au sein des profondeurs de la Terre sur des périodes s'étendant sur des millions d'années [6].

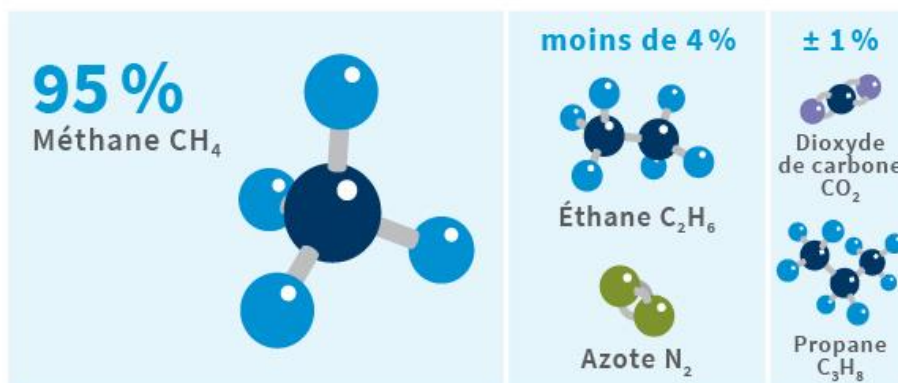


Figure 2 : Les composants moléculaires « chimiques » de gaz naturel.

I. 4. 1. 1 Les différents types de gaz naturel

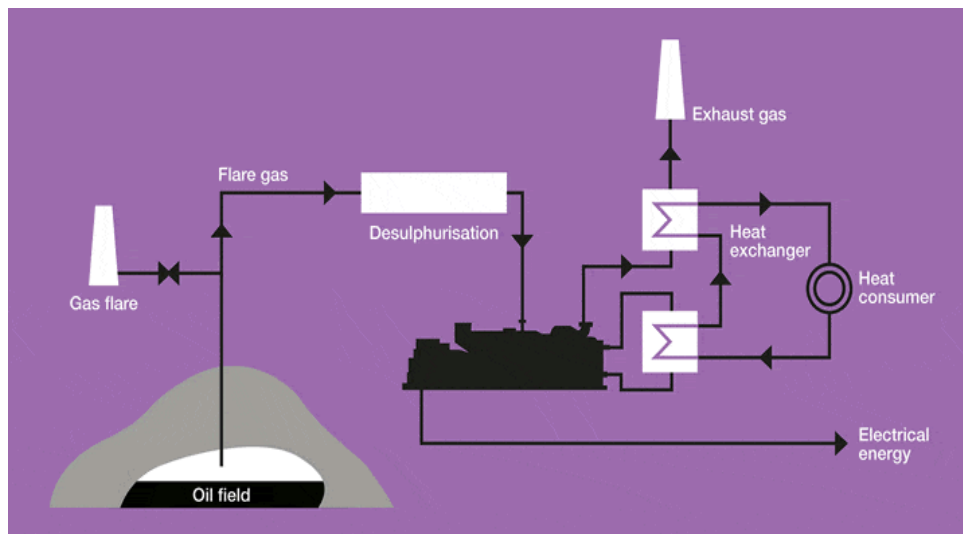
I. 4. 1. 1. 1 Gaz naturel non associé conventionnel.

Le gaz naturel conventionnel non associé représente la forme la plus fréquemment exploitée du gaz naturel. L'adjectif "non associé" indique qu'il n'est pas lié à un gisement pétrolier, bien que le processus de formation soit assez similaire.

I. 4. 1. 1. 2 Gaz naturel associé (à une réserve de pétrole)

Il est également possible de nommer les gaz associés au pétrole en tant que gaz torchère. Par ailleurs, il est envisageable de transformer les APG (L'acide 3-phosphoglycérique) en énergie avec une efficacité remarquable grâce à l'utilisation de moteurs à gaz. Grâce à cette forme d'énergie, il devient envisageable de fournir de l'électricité ainsi que Grâce à cette forme d'énergie, il devient envisageable de fournir de l'électricité ainsi que de chauffer ou de refroidir diverses installations déjà en place. Cela permettant de supprimer les dépenses liées à la fourniture de diesel dans les régions éloignées ou isolées. Utiliser les gaz associés au pétrole comme carburant pour un générateur est une bonne façon de diminuer les gaz qui polluent, comme le CO₂, qui viennent de l'usage de diesel et des torchères [7].

Peu importe d'où vient le gaz naturel, une fois qu'il est séparé du pétrole brut, il est souvent mélangé avec d'autres substances comme l'éthane, le propane, le butane et le pentane. De plus, le gaz naturel brut contient de la vapeur d'eau, du sulfure d'hydrogène (H₂S), du dioxyde de carbone (CO₂), de l'azote (N₂) et d'autres choses. Les gaz qui contiennent ces déchets ne peuvent pas être facilement utilisés ou transportés sans traitement, soit parce qu'ils ne sont pas de bonne qualité, soit parce qu'il y en a trop [7].



Source : Clarke Energy

Figure 3 : Schéma des gaz associé au pétrole.

I. 4. 1. 1. 3 Gaz naturel issu du charbon

Le gaz de charbon, connu sous le nom de méthane de gaz de charbon ou méthane houiller, est principalement du gaz qui se trouve emprisonné dans les couches de charbon qui n'ont pas été exploitées. Pour le récupérer, on perce ces couches de charbon afin de libérer le gaz, qui peut ensuite être utilisé pour produire de l'électricité. Le gaz de charbon, constitué à plus de 90% de méthane, peut être utilisé de manière autonome dans certains endroits, sans nécessiter l'exploitation du charbon. De plus, sa composition en gaz reste généralement stable, ce qui permet de l'intégrer directement dans le réseau de gaz naturel ou de l'utiliser comme carburant dans des moteurs à gaz [8].

I. 4. 1. 1. 4 Gaz de roche-mère « Gaz de schiste »

Le gaz de roche-mère appartient au gaz naturel dit non conventionnel au même titre que le gaz de charbon, le roche-mère « le schiste » appartient à la catégorie des roches sédimentaires qui renferment de l'argile, du quartz et divers autres minéraux. Une grande partie du gaz et/ou du pétrole produite dans le schiste se déplace ensuite vers des roches poreuses et perméables, telles que le grès [9].

La figure 4 nous permet d'identifier diverses origines géologiques du gaz naturel, chacune appartenant à une catégorie distincte :

- A) Le gaz qui se trouve près des réserves de pétrole.
- B) Le gaz ordinaire, indépendant d'autres substances.
- C) Le gaz naturel issu du charbon.
- D) Le gaz fortement comprimé dans un réservoir souterrain.
- E) Le gaz contenu dans les roches-mères, également connu sous le nom de "gaz de schiste".

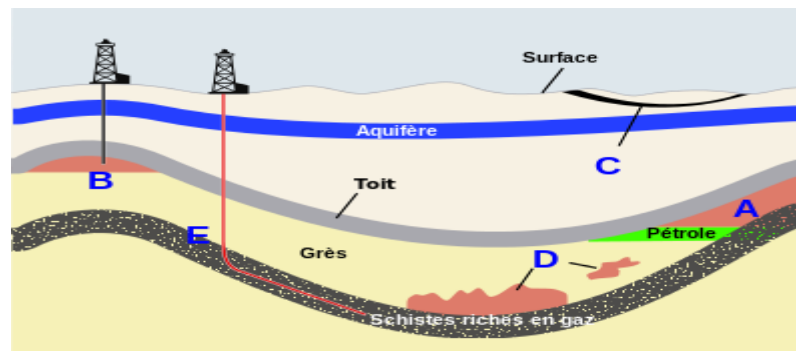


Figure 4 : Schéma de plusieurs catégories de sources géologiques du gaz naturel.

I. 4. 2 Le pétrole

Le pétrole est une huile naturelle qui se forme à partir de matière organique accumulée pendant longtemps et transformée. Il est composé d'un mélange compliqué d'hydrocarbures. On utilise principalement le pétrole comme source d'énergie. Le "pétrole brut" ou simplement "brut" est du pétrole qui n'a pas été traité par raffinage. Le kérosène, les essences, le gazole et les paraffines sont des produits obtenus en distillant le pétrole. Le "G.P.L." ou gaz de pétrole liquéfié est une forme de gaz provenant du pétrole.

Dans l'industrie pétrolière, on parle de nappes de pétrole, de puits de forage et de raffineries. Le pétrole est importé et exporté, et l'unité de mesure courante est le "baril de pétrole" [10].

I. 4. 3 Le Nucléaire

En général, l'énergie nucléaire provient de l'énergie stockée à l'intérieur du noyau d'un atome, qui forme la partie centrale de l'atome lui-même. Les atomes représentent les plus petites unités de matière qui peuvent être décomposées. Le noyau atomique se compose de deux composants : les protons et les neutrons, qui restent ensemble grâce à des liaisons énergétiques.

Lorsque ces liaisons subissent des modifications, une immense quantité d'énergie thermique est libérée sous forme de chaleur [11].



Figure 5 : Centrale nucléaire

Dans le domaine nucléaire, il y a deux types de réactions : la fusion nucléaire et la fission nucléaire.

I. 4. 3. 1 Fission nucléaire

Se produit quand le noyau d'un gros atome instable se casse en deux noyaux plus petits ou plus. Quand cela se passe, beaucoup d'énergie est libérée. On utilise les atomes d'uranium ou de plutonium car ils sont instables et bien adaptés pour cela. Ce principe est utilisé pour créer de l'énergie dans les centrales nucléaires et aussi pour fabriquer des armes nucléaires [11].

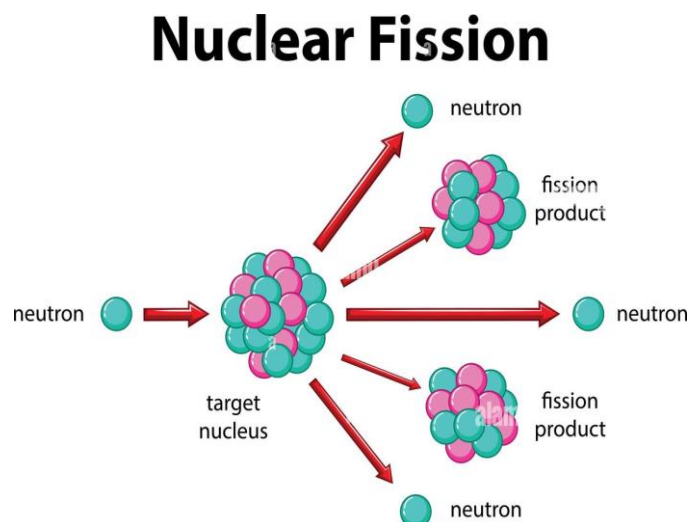


Figure 6 : Schéma de la fission.

I. 4. 3. 2 La fusion nucléaire

C'est un processus où les noyaux de plusieurs atomes se combinent pour former un noyau plus lourd, tout en étant confinés magnétiquement. Lorsque des atomes légers comme l'hydrogène fusionnent, cela libère de l'énergie. La fusion nucléaire est une source d'énergie très prometteuse. Sur Terre, il y a beaucoup d'atomes légers, ce qui signifie que son carburant est inépuisable. De plus, contrairement à la fission atomique, la fusion nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre ni de déchets radioactifs importants. Cependant, la fusion nucléaire est utilisée dans de nombreux types d'armes nucléaires, fournissant une grande quantité d'énergie pour leur fonctionnement [11].

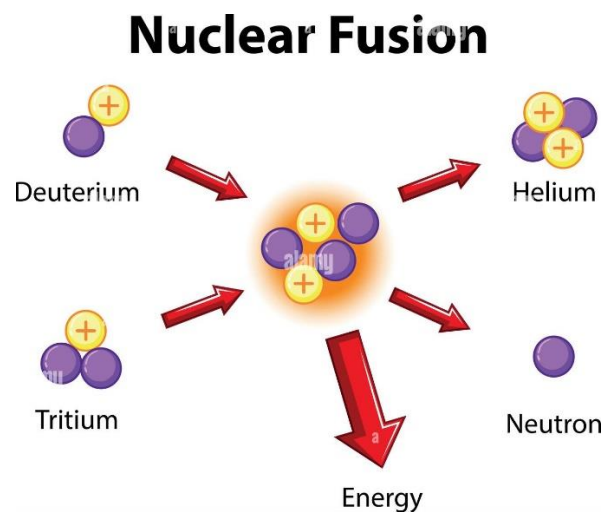


Figure 7 : Schéma de la fusion.

I. 5 Les Ressource Naturelle Renouvelables

De nos jours, le développement et l'utilisation des ressources renouvelables ont beaucoup augmenté récemment. Cela devient l'une des bases principales pour que notre pays grandisse de manière durable. Les énergies renouvelables, comme le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau et les marées, sont très différentes des énergies fossiles. Elles sont obtenues et utilisées sans nuire à la nature, ce qui aide à protéger l'environnement en combattant les gaz qui causent l'effet de serre et les changements climatiques.

Ces énergies renouvelables nous donnent de l'électricité, de la chaleur, du froid, du gaz et du fioul. Elles sont considérées comme inépuisables à l'échelle de notre vie humaine. En plus, elles ne produisent que peu ou pas de déchets ni de pollution, ce qui les distingue des énergies fossiles qui sont polluantes et rares. En plus, en période de difficultés, les énergies renouvelables sont plus solides et résistantes.

Il y a différents genres d'énergies renouvelables, notamment :

I. 5. 1 La biomasse

La biomasse regroupe toutes les matières organiques qui peuvent être utilisées comme sources d'énergie. On peut les utiliser directement, comme le bois énergie, ou les transformer en biogaz par méthanisation, ou encore les convertir en biocarburants par des processus chimiques. La biomasse peut également être utilisée pour le compostage.

La biomasse provenant des forêts et/ou de l'agriculture possède un potentiel énergétique important, ce qui en fait une alternative réaliste aux combustibles fossiles. Dans la plupart des cas, l'énergie obtenue à partir de la biomasse peut être considérée comme une énergie renouvelable [12] [13].

I. 5. 2 L'hydraulique

C'est une branche de la science qui se concentre sur l'étude des caractéristiques mécaniques des liquides et des fluides.

I. 5. 2. 1 L'électricité hydraulique

L'hydroélectricité est employée pour générer de l'électricité dans des centrales hydroélectriques qui tirent profit de la puissance de l'eau. Cette puissance est déterminée par la hauteur de la chute d'eau (dans les systèmes de haute ou moyenne chute) ou par le débit des rivières et des cours d'eau (dans les systèmes fluviaux) [14].

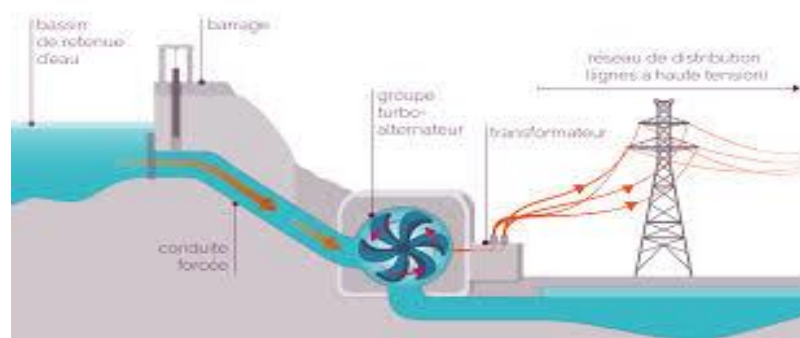


Figure 8 : Mode de fonctionnement de l'énergie hydraulique [14].

- Diverses catégories d'énergie hydraulique sont présentes, comme démontré dans le schéma ci-dessous [14].

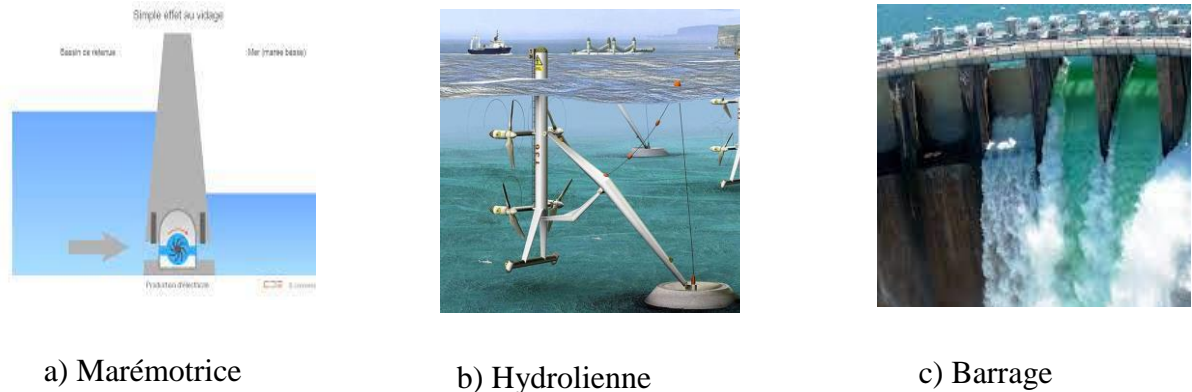


Figure 9 : Différent types de l'hydraulique.

I. 5. 3 La géothermie

La géothermie implique l'exploitation des températures variées présentes en profondeur dans le sol.

Les couches profondes du sol sont naturellement chaudes, particulièrement en grande profondeur. À mesure que l'on creuse plus profondément dans la terre, la température augmente, augmentant généralement de 3 à 5°C tous les 100 mètres. Cette eau chaude est utilisée pour chauffer les maisons et d'autres bâtiments [15].

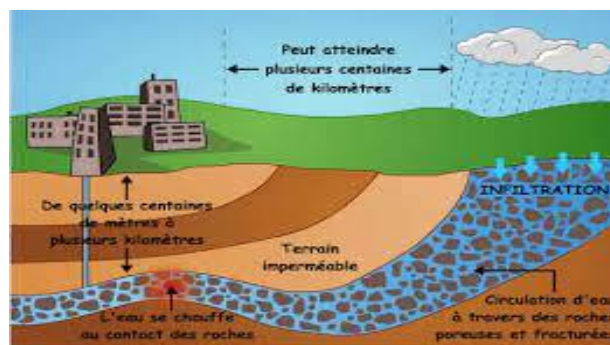


Figure 10 : Une source d'énergie géothermique.

I. 5. 4 L'hydrogène vert

L'hydrogène pourrait devenir la source d'énergie du futur. Et aussi il est bien meilleur pour l'environnement que le moteur à essence car il ne produit pas de CO₂. Le moteur à hydrogène fonctionne grâce à une pile à combustible au cœur de l'appareil, cette pile à combustible agit comme une centrale électrique. Quand l'hydrogène rencontre l'oxygène, ils se mélangent et créent de l'eau qui libère de l'énergie du moteur sous forme d'électricité, qui alimente ensuite le moteur [16].

I. 5. 5 Eolienne

Une éolienne est un appareil qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique, qui est ensuite convertie en énergie électrique. Lorsque plusieurs éoliennes sont placées ensemble à un endroit, cela forme une "ferme" ou un parc éolien. Les toutes premières éoliennes génératrices d'électricité ont été conçues dans les années 1970.

L'énergie éolienne naît de la pression exercée par le vent sur les pales de l'hélice.

Habituellement, le rotor est composé de deux ou trois pales qui tournent autour d'une ligne horizontale. La distance qu'elles parcourent peut varier entre 80 et environ 200 mètres. Si les pales sont longues, cela permet de créer davantage d'énergie.

Quand les pales tournent, elles font bouger un appareil « générateur » qui fabrique de l'électricité. Dans les éoliennes normales, cet appareil doit tourner vite, de 1 000 à 2 000 tours par minute, alors que les pales tournent plus lentement, seulement de 5 à 25 tours par minute. Pour que tout fonctionne, il y a un outil spécial entre les pales et l'appareil qui fait accélérer la vitesse. Il existe aussi des éoliennes plus modernes qui n'ont pas besoin de cet outil et qui peuvent fonctionner à différentes vitesses, de 5 à 2 000 tours par minute. Tout ce groupe, avec les pales, l'outil qui accélère la vitesse, l'appareil qui fabrique l'électricité et tout, s'appelle une "nacelle".

La "nacelle" est placée en haut d'un mât qui peut mesurer entre 50 et plus de 200 mètres de hauteur. Ce dispositif permet de la tourner de manière à ce que les pales et le rotor soient toujours dans la même direction que le vent. En général, les éoliennes marchent quand le vent souffle entre 10 et 90 km/h. Si le vent devient plus fort que cette vitesse maximale, elles s'arrêtent toutes seules pour éviter tout problème.

L'électricité fabriquée par le générateur est envoyée par des fils jusqu'à un transformateur dans un endroit spécial, puis elle est ajoutée au réseau électrique en passant par des câbles sous terre.

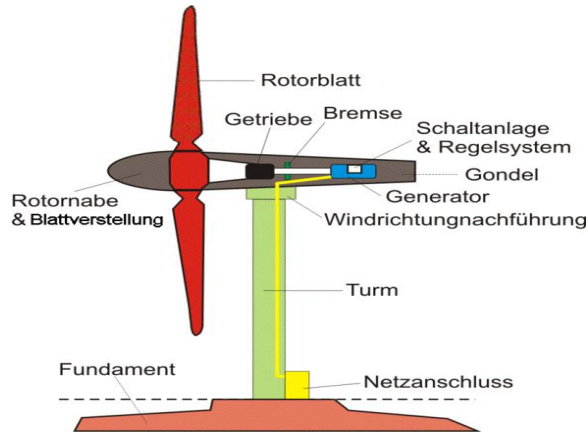
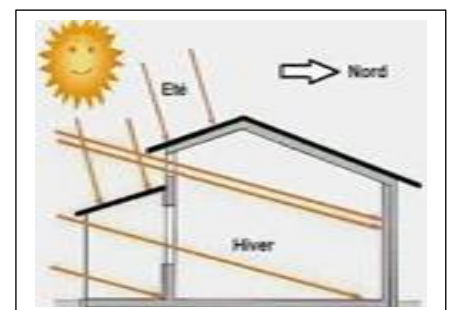
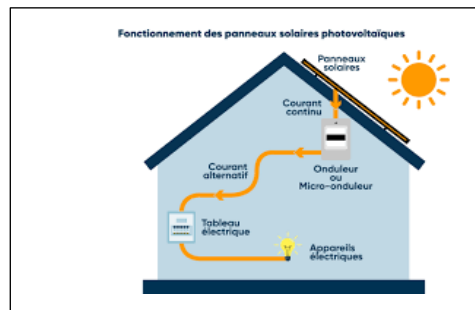
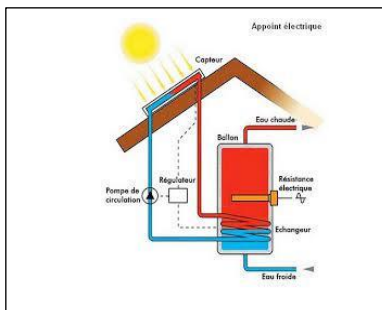


Figure 11 : Une description d'une éolienne [17].

I. 5. 6 Solaire

Les rayonnements solaires constituent une source d'énergie presque inépuisable, Ces rayonnements émettent des radiations vers la surface terrestre. [17].

Le rayonnement solaire est mis en œuvre et exploitée à travers divers procédés. Parmi ceux-ci, le solaire thermique, qui convertit la chaleur du soleil en énergie utile, et le solaire photovoltaïque, il transforme la lumière solaire directement en électricité, jouent des rôles prépondérants. En outre, il existe également l'approche de l'énergie solaire « passive », qui exploite la conception intelligente des bâtiments pour tirer parti de la chaleur et de la lumière solaire naturelle sans nécessiter de mécanismes complexes.



A : l'énergie solaire « thermique »

B : L'énergie solaire, « photovoltaïque »

C : L'énergie solaire, « passive »

Figure 12 : L'énergie solaire

I. 6 La consommation énergétique mondiale

D'après les plus récentes informations de l'Agence internationale de l'énergie en 2019, les deux plus grands utilisateurs d'énergie à l'échelle mondiale sont la Chine et les États-Unis, contribuant respectivement à 23,5 % et 15,3 % de la consommation totale d'énergie primaire dans le monde. Cependant, ce classement des états qui consomment le plus d'énergie change beaucoup lorsque l'on prend en compte la taille de leur population [18] [19].

En 2019, la consommation moyenne mondiale d'énergie par personne était de 79,1 giga joules (GJ). En 2019, les pays développés de l'OCDE ont consommé en moyenne deux fois plus d'énergie par personne dans le monde, soit 165,6 giga joules (GJ) par habitant [20].

Dans le monde, deux pays se démarquent notablement en consommant une grande quantité d'énergie par personne : l'Islande (697,4 GJ/habitant en 2019, environ neuf fois la moyenne mondiale) et le Qatar (avec une consommation de 611,3 GJ par habitant en 2019) [21].

Dans le schéma ci-dessous, nous avons également inclus les informations sur la consommation d'énergie par personne.

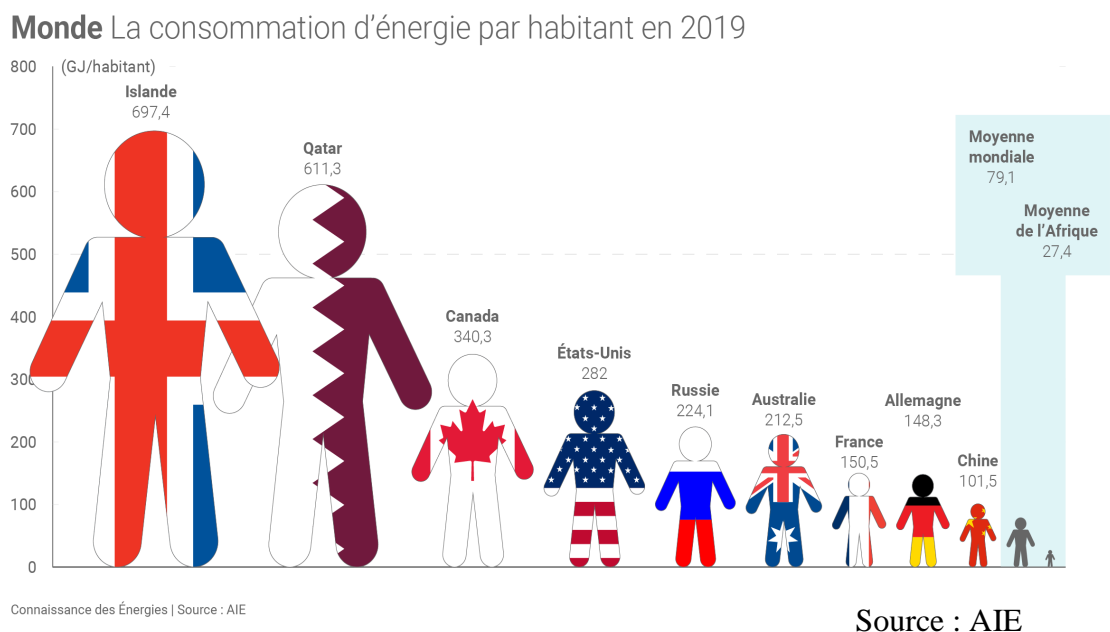
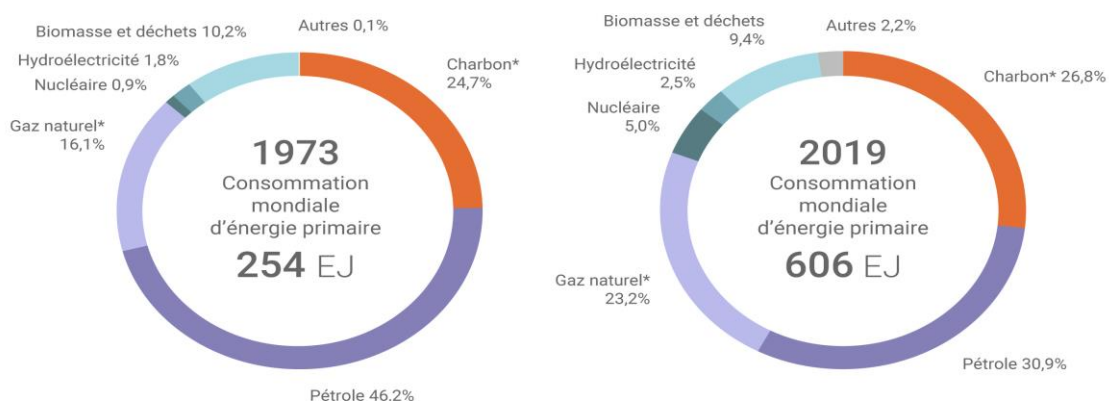


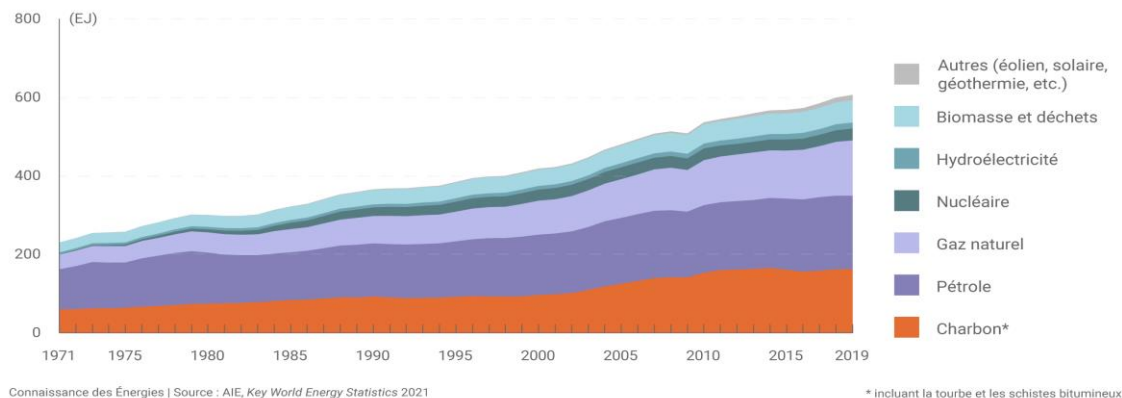
Figure 12 : La consommation d'énergie par habitant en 2019.

D'après les données statistiques énergétiques mondiales de AIE pour l'année 2021, la part des combustibles fossiles dans la consommation mondiale d'énergie primaire était de 80,9 % en 2019, comparé à 87 % en 1973 [21].

Monde Évolution de la consommation d'énergie primaire



Évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire par type



Source : AIE, Statistics report Key World Energy Statistics

Figure 13 : Évolution de la consommation d'énergie primaire dans le monde.

I. 6. 1 Les statistiques essentielles de la production énergétique mondiale

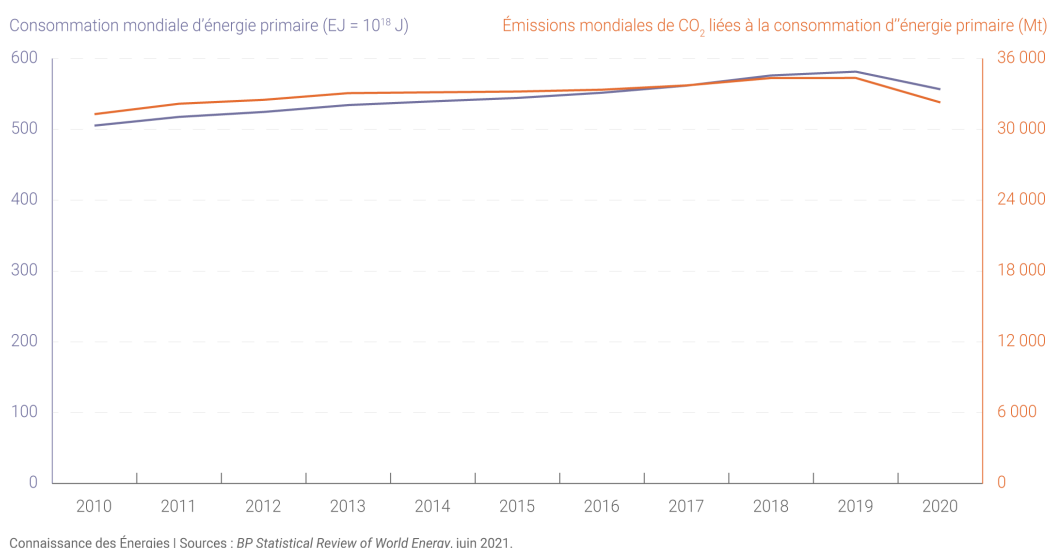
Le 8 juillet, la compagnie majeure BP a dévoilé son rapport annuel renfermant les données énergétiques mondiales les plus cruciales (1). Ce rapport présente de manière graphique certains indicateurs clés pour l'année 2020, une période fortement impactée par la pandémie de Covid 19.

I. 6. 2 Une diminution historique s'est produite tant au niveau de la consommation mondiale d'énergie que des émissions de CO₂

En 2020, la consommation globale d'énergie primaire a enregistré une diminution de 4,5 % par rapport à 2019, marquant ainsi la plus importante réduction depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. En comparaison, une augmentation de 1,3 % avait été constatée en 2019, suivie d'une hausse de 2,8 % en 2018. Cette variation découle principalement de la "chute exceptionnelle de la demande de pétrole" (-9,3 % en 2020), résultant de la mise à l'arrêt de nombreuses formes de transport en raison de la crise sanitaire due à la Covid-19.

Les émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) issues de la consommation énergétique ont enregistré une baisse allant jusqu'à 6 % en 2020, marquant ainsi la plus importante réduction depuis 1945 (après une augmentation de 0,5 % en 2019). BP souligne que "ce niveau de diminution des émissions équivaut à ce que la planète devrait réaliser en moyenne chaque année au cours des trois décennies à venir pour maintenir le cap vers l'atteinte des objectifs de l'Accord de Paris" [22].

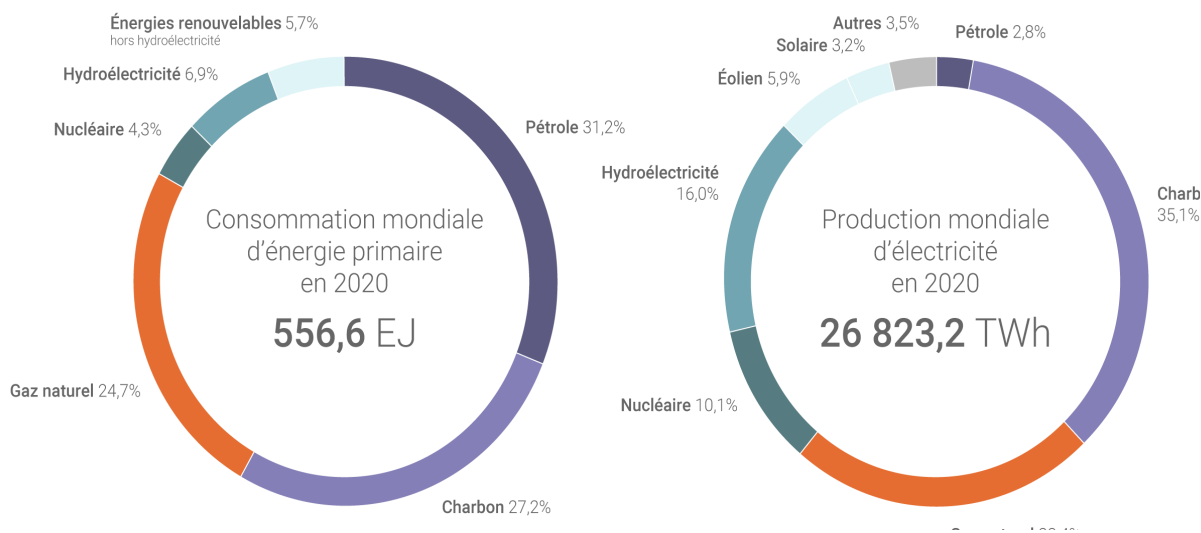
Monde Évolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂



Source : BP statistical review of world Energy, Juin

Figure 14 : Evolution de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂

Monde La consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2020



Source : BP statistical review of world Energy, Juin 2021

Figure 15 : Monde la consommation d'énergie totale et la production d'électricité en 2020.

I. 6.3 Les Statistiques 2023 sur les Capacités Mondiales d'Énergie Renouvelable

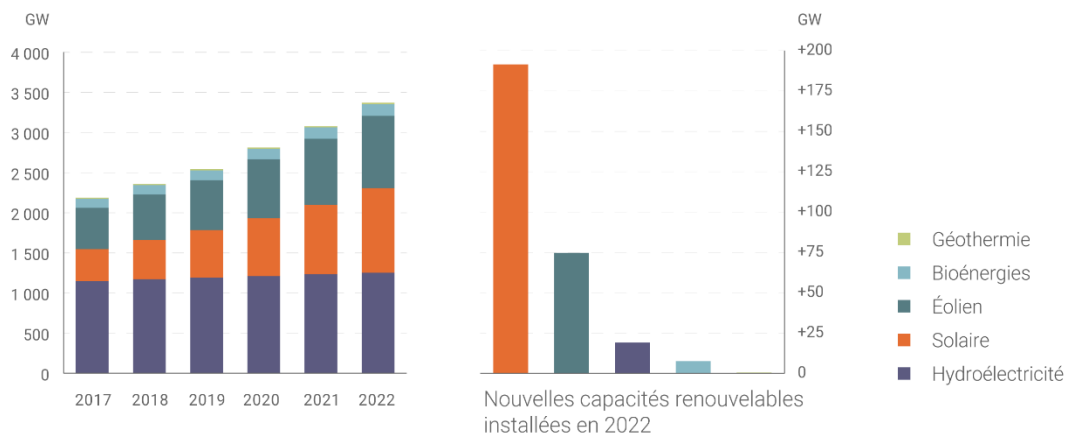
Selon l'IRENA (International Renewable Energy Agency), fin 2022, la capacité mondiale en énergie renouvelable – tous secteurs confondus – était de près de 3 372 GW, soit 9,6 % de plus qu'à fin 2021. Bien que l'hydroélectricité demeure la principale source de génération électrique renouvelable, près de 90 nouvelles capacités renouvelables solaires et éoliennes ont été mises en place à travers le monde au cours de l'année 2022.

L'IRENA souligne que "la croissance significative des énergies renouvelables demeure principalement concentrée dans un nombre restreint de pays et de régions, à savoir l'Europe, l'Asie et les États-Unis " (notamment avec près de 59 nouvelles installations renouvelables en Asie en 2022).

Dans le rapport qui a été mis en ligne en mars 2023, l'Irena a rassemblé diverses données concernant le développement des capacités d'électricité renouvelable dans le monde pour la période 2013-2022, secteur par secteur (y compris l'hydraulique avec des statistiques

segmentées par centrales de traitement, les énergies éoliennes terrestre et offshore, le photovoltaïque et le solaire thermique, la géothermie, la biomasse, etc.) dans chaque pays [23].

Monde Évolution des capacités électriques renouvelables



Connaissance des Énergies | Source : Renewable Capacity Statistics 2023, Irena.

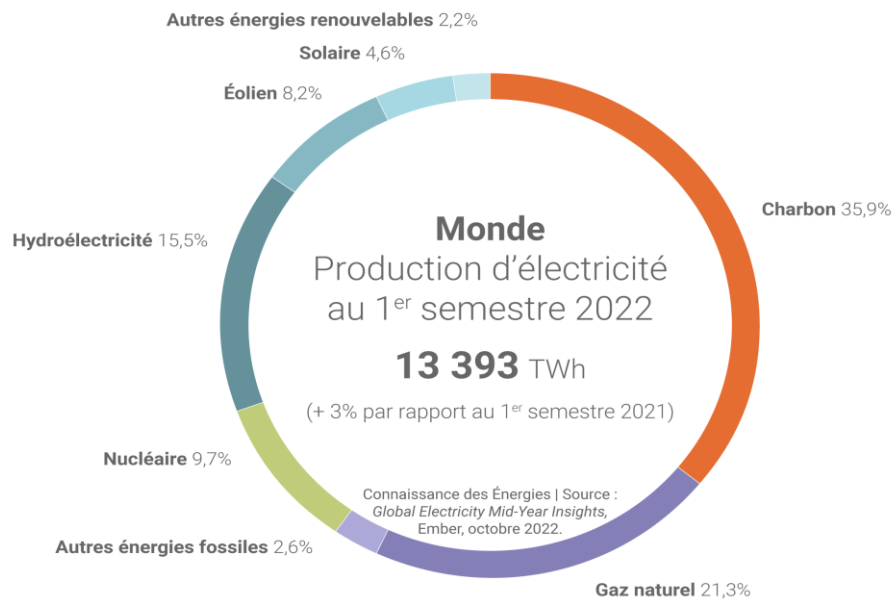
Source : Renewable capacity statistics

Figure 16 : Évolution des capacités électriques renouvelables dans le monde.

Il est important de noter que toutes les données concernant les capacités installées doivent être contextualisées en fonction des taux d'utilisation, lesquels diffèrent significativement d'un secteur à l'autre, ainsi que d'une installation à l'autre et évoluent en fonction des ressources disponibles, tout comme au fil du temps.

Pour déterminer au final la production associée, il convient de noter que le rapport détaillé de l'Irena n'intègre pas encore les informations sur la production (ou les divers facteurs de charge moyens pour chaque secteur), mais ces données sont accessibles sur le site web de l'agence jusqu'à l'année 2020.

Au cours du premier semestre 2022, les sources d'énergie renouvelable représentaient 30,5 % de la production totale mondiale d'électricité (comparativement à 28,3 % en 2021) [24].



Global Electricity Mid-Year Insights, Ember, 5 octobre

Figure 17 : Production d'électricité au 1^{er} semestre 2022 dans le monde.

Les énergies renouvelables "permettent aux économies de sortir de la volatilité des prix et des importations de combustibles fossiles, de réduire les coûts énergétiques et de renforcer la résilience du marché, d'autant plus que la crise énergétique actuelle s'aggrave", a déclaré Francesco La Camera, PDG d'Irena, lors de la présentation de ce rapport [25][26].

Production renouvelable d'électricité Évolution du coût de production et du facteur de charge moyen des différentes filières entre 2010 et 2021

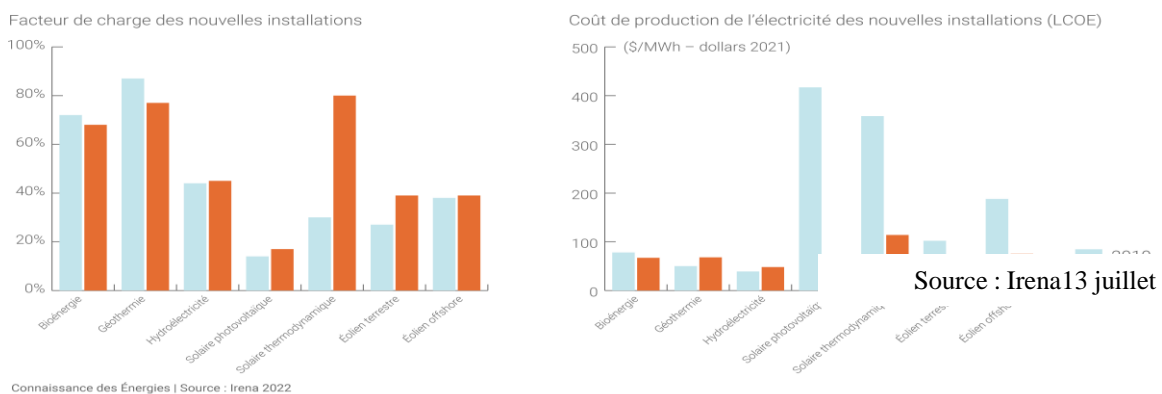


Figure 18 : Production renouvelable d'électricité « évolution du cout de production et de facteur de charge moyen des différentes entre 2010 et 2021.

I. 7 Conclusion

Actuellement, l'énergie est devenue un enjeu majeure dans le développement économique de chaque pays, ainsi qu'il joue un rôle primordial dans les relations politiques et géopolitiques entre les grandes puissances mondiales.

Dans ce chapitre nous avons abordés le contexte énergétique mondiale, ensuite nous avons découverts les différentes sources d'énergies renouvelables et non renouvelables...etc., et d'illustrer le taux de la consommation énergétique mondiale, et Les statistiques essentielles de la production énergétique mondiale, aussi Les Statistiques 2023 sur les Capacités Mondiales d'Énergie Renouvelable et d'autres détails sur les énergies non épuisables.

Chapitre II

L'énergie

éolienne

Chapitre II L'énergie éolienne

II. 1 INTRODUCTION

Face à la double problématique planétaire résultant de la prochaine diminution des ressources énergétiques issues des combustibles fossiles et des préoccupations liées à la préservation de l'environnement, il est de plus en plus pressant d'encourager le développement des sources d'énergie renouvelable dans le cadre du développement durable. Le domaine des énergies renouvelables peut être regroupé en trois principales catégories : les formes d'énergie dérivées du mouvement (énergie marémotrice et éolienne), celles produisant de l'électricité (comme le photovoltaïque), et enfin celles générant de la chaleur (telle que la géothermie et le solaire thermique). Toutes ces sources d'énergie ont pour origine le soleil et subissent des processus environnementaux une fois émises vers la Terre.

Cependant, malgré la croissance continue de la demande mondiale en énergie, des questions cruciales se posent quant aux effets du réchauffement climatique et à l'épuisement inéluctable des réserves énergétiques traditionnelles [27].

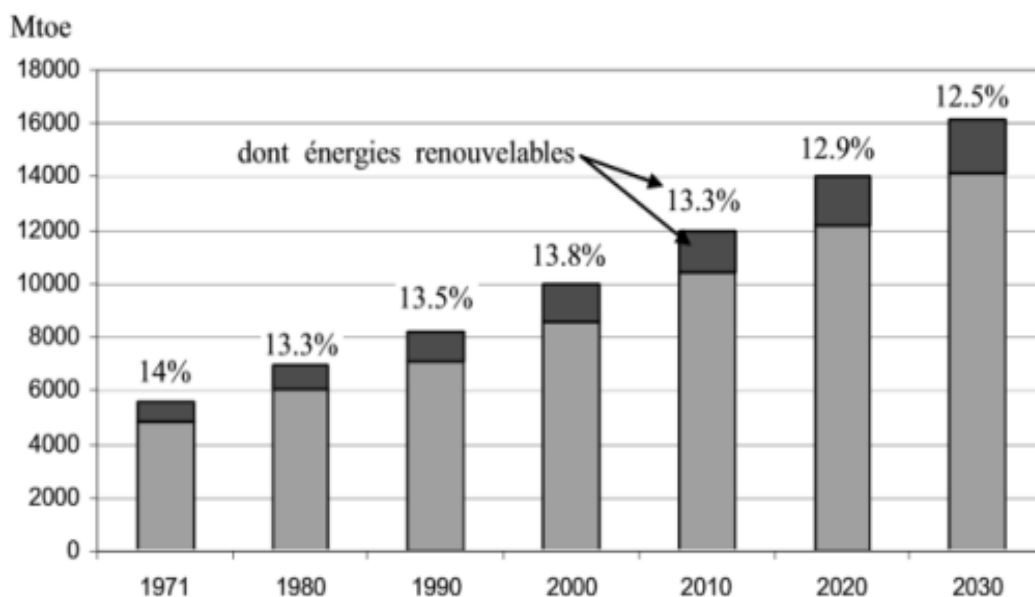


Figure 19 : Utilisation initiale d'énergie à l'échelle mondiale et projections.

II. 2 Génération d'électricité à partir des sources d'énergie renouvelable

La plupart des sources traditionnelles sont extraites des gisements puis expédiées à marchands ou usines, qui peuvent être éloignés, ce qui affecte les coûts. Tandis que le lieu « d'extraction » de l'énergie renouvelable détermine le lieu de conversion. Cela restreint l'emploi des énergies renouvelables pour générer de l'électricité. (Voir Figure II.1.) La Figure II.1 offre un aperçu de comment la production d'électricité est répartie entre diverses sources renouvelables, avec des prévisions jusqu'en 2030 [28].

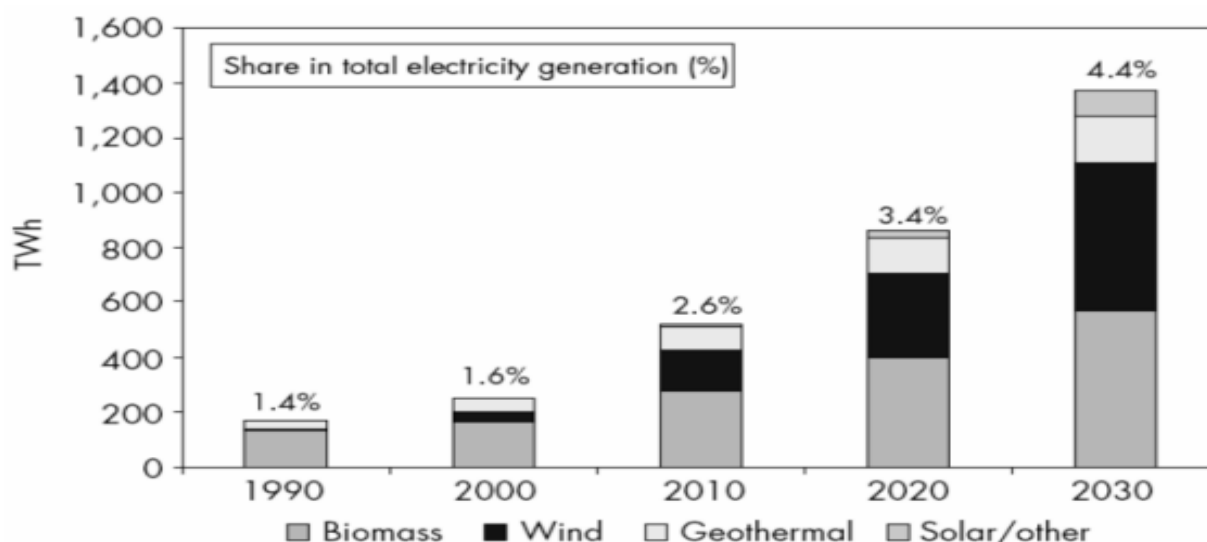


Figure 20 : La génération mondiale d'électricité à partir de sources renouvelables.

II. 3 L'Histoire de l'énergie éolienne

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie éolienne a été l'une des premières utilisées par les humains, en plus du bois comme source d'énergie. Depuis très longtemps, les gens ont utilisé le vent pour propulser des bateaux, Faire fonctionner des moulins à blé tout en extrayant de l'eau. L'utilisation initiale du vent comme source d'énergie remonte à environ 4000 ans, dans la région de la Mésopotamie., une ancienne région du Moyen-Orient. Hammourabi, un dirigeant de Babylone, a eu l'idée d'utiliser le vent pour irriguer les terres de cette région.

Ensuite, au fil des siècles, les moulins à vent sont apparus en Inde, en Europe et dans d'autres régions. En Europe, ces moulins à vent ont été largement utilisés pour moudre le grain et pomper l'eau, notamment aux Pays-Bas pour vider les zones inondées.

C'est vers la fin du XIXe siècle que l'électricité est devenue importante, et un inventeur danois nommé Poul La Cour a eu l'idée de combiner une éolienne avec un générateur électrique en 1891. Cela a permis de redécouvrir et de réutiliser l'énergie éolienne. Dans les années 1940, il y avait déjà plus de 1 300 éoliennes en fonctionnement au Danemark. [28].



Figure 21 : Photographie de trois moulins à vent.

II. 4 Données Chiffrées sur l'éolien

II. 4. 1 Énergie éolienne à l'échelle mondiale

D'après les nouveaux systèmes mis en place illustrés en graphique 23, l'année 2021 a été la "deuxième meilleure année de son histoire" pour l'industrie éolienne en termes de nouvelles installations dans le monde (Post-2020) : Une capacité de 93,6 gigawatts (GW) de nouvelle puissance éolienne ont été mis en service, portant la capacité totale du parc à 837 GW à fin 2020 par an (soit 12 % de plus qu'à fin 2020).

Cela inclut 72,5 gigawatts (GW) de nouvelles installations éoliennes sur terre, représentées par le GWEC (Conseil Mondial de l'Énergie Éolienne), en baisse de 18 % par

rapport à 2020. Cette diminution reflète un ralentissement dans les deux principaux pays de croissance du secteur, c'est-à-dire la Chine et les États-Unis. En effet, la Chine a mis fin à certaines installations en 2021, ce qui a conduit à une réduction de 39 installations dans ce pays par rapport à l'année précédente (2020).

Éolien offshore a connu une année exceptionnelle, atteignant un record historique avec 21,1 gigawatts (GW) de nouvelles installations, soit près de trois fois plus que l'année précédente. Cela a abouti à une capacité totale cumulée de 57 GW d'éoliennes D'ici la fin de l'année 2021 dans le contexte mondial [29].

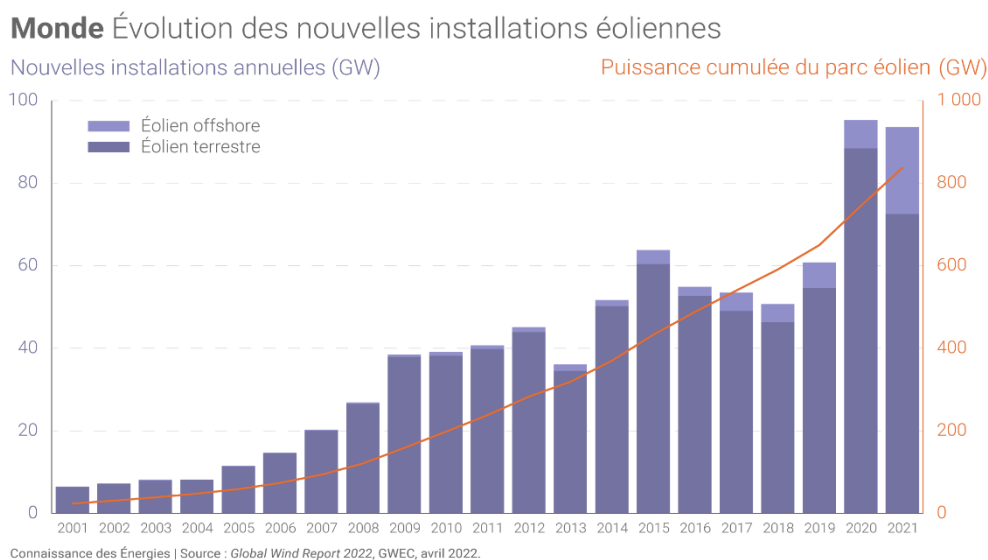


Figure 22 : Evolution des nouvelles installations éoliennes dans le monde.

II. 4. 2 La Croissance des éoliennes en Chine

Malgré le ralentissement de la croissance des éoliennes terrestres en Chine en 2021, ce pays conserve incontestablement sa position de leader dans le développement de cette industrie. En cette année, la Chine a contribué à elle seule avec 42 nouvelles installations éoliennes sur terre et 80 parcs éoliens en mer à l'échelle mondiale, consolidant ainsi sa position prédominante dans le secteur.

Monde Répartition par zone géographique des éoliennes

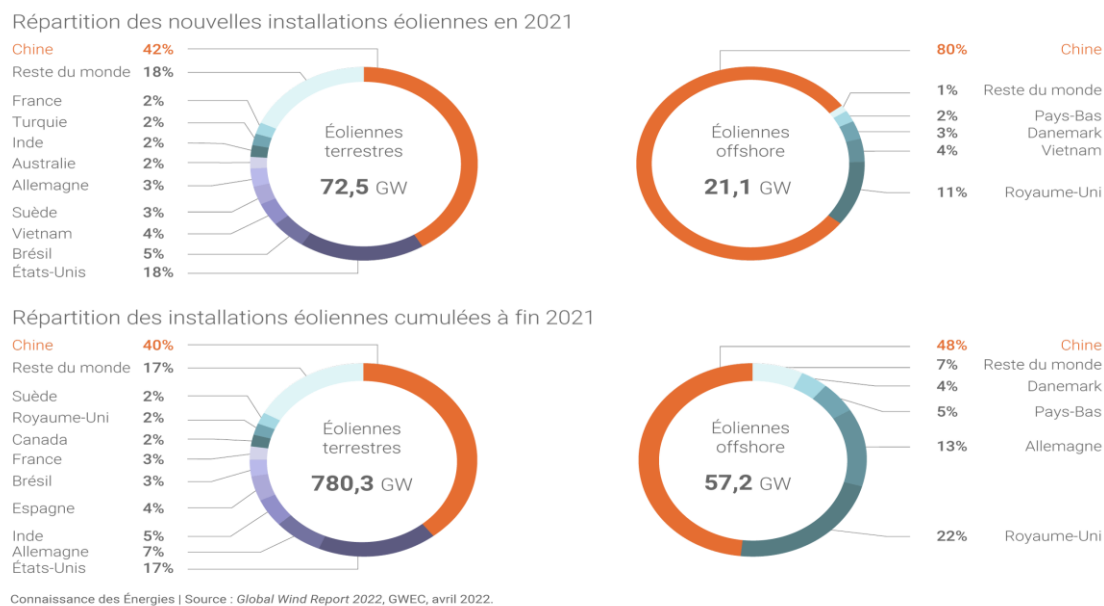


Figure 23 : Répartition par zone géographique des éoliennes dans le monde.

Malheureusement, bien que le rapport annuel du GWEC fournisse de nombreuses informations détaillées sur les éoliennes (en termes de capacité), il ne comporte pas de données sur la production mondiale des parcs éoliens [30].

II. 4. 3 Evolution des couts de production d'énergie éolienne

La génération d'énergie éolienne est-elle coûteuse ? Si cela avait été le cas au début des années 2000, Les frais liés à la génération d'énergie éolienne et des autres sources renouvelables continueraient de baisser d'année en année. L'énergie éolienne utilisée actuellement en France rivalise avec les sources d'énergie conventionnelles, y compris le nucléaire historique.

Le coût de production est désormais très compétitif. Pour l'éolien terrestre, selon l'ADEME, le coût moyen de production est estimé à 60,5 €/MWh (variant entre 50 et 71 €/MWh selon les régions), ce qui représente une réduction de 18% des coûts pour les turbines installées entre 2015 et 2020. En mai 2021, la Commission de régulation de l'énergie (CRE) a annoncé le huitième appel d'offres pour l'éolien terrestre, où 404 MW (26 projets) ont été sélectionnés sur les 700 MW proposés, avec un prix moyen de 60,8 EUR/MWh.

Pour l'éolien offshore, bien que la France n'ait pas encore de parc opérationnel, le prix d'achat de 44 €/MWh pour le projet de Dunkerque, prévu pour 2019 et devant être opérationnel

en 2027, démontre que cette technologie est déjà très compétitive. L'énergie éolienne en mer est considérée comme l'une des solutions privilégiées pour une transition énergétique réussie.

En contraste, le coût de l'énergie nucléaire est d'au moins 62 €/MWh pour l'extension des centrales existantes, tandis que le prix de référence de l'EPR de Flamanville se situera entre 110 €/MWh et 120 €/MWh, comparé à la production de l'EPR Hinkley Point frais.

II. 5 Structure de base d'une Éolienne « Classique » [31]

En règle générale, une éolienne dite "classique" se compose généralement de trois composantes majeures.

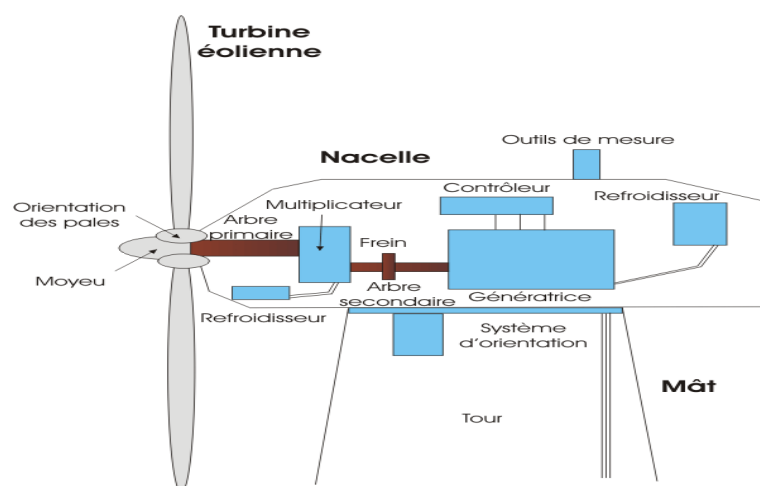


Figure 24 : Principaux composants d'une éolienne.

II. 5. 1 Le mât

Habituellement conçu à partir de tubes d'acier ou de treillis métallique, le mât est érigé à une hauteur optimale afin de minimiser les interférences au niveau du sol. Cependant, il est crucial de prendre en compte que l'utilisation excessive de matériaux entraîne des coûts significatifs, d'où la nécessité de restreindre le poids de la structure.

II. 5. 2 La nacelle

Contient toutes les pièces qui font fonctionner ensemble l'éolienne et le générateur électrique : il y a des parties qui tournent vite et d'autres plus lentement, des supports pour les maintenir en place, et un frein à disque spécial pour arrêter le tout si cela devient trop fort. Il y a aussi une machine spéciale appelée génératrice qui crée de l'électricité, ainsi que des systèmes qui utilisent de l'électricité ou des liquides pour ajuster les pales de l'éolienne (comme des freins

dans l'air) et faire tourner la partie principale (la nacelle) pour que l'éolienne puisse attraper le vent correctement.

II. 5. 3 Le Rotor

Fabriqué avec des pales fixées dans un moyeu central. Dans Les turbines éoliennes employées dans la production d'électricité, il y a généralement de 1 à 3 pales (appelé rotor tripale). Ces pales sont spéciales en raison de leur forme qui influencent comment elles se déplacent dans l'air, et du matériau utilisé pour les fabriquer.

II. 5. 4 Classification des éoliennes

Cette partie, nous introduisons divers types d'éoliennes destinées à la production d'électricité. À cette fin, Nous avons la possibilité de les classer en fonction des catégories suivantes :

II. 5. 4. 1 Taille des aérogénérateurs

La demande croissante en électricité a motivé les chercheurs et les fabricants à développer des éoliennes de plus en plus puissantes. La capacité d'une éolienne est directement liée à la taille de ses pales. Pour simplifier, les éoliennes sont généralement classées en trois catégories en fonction de leur taille : petites, moyennes et grandes [31].

Tableau 1 : Dimensions des éoliennes

Dimensions des éoliennes	Diamètre de l'hélice	Puissance
Petite	≤ 12 m	≤ 40 KW
Moyenne	[12 m à 45 m]	[40KW à 1MW]
Grande	45 m \geq	1 MW \geq

II. 5. 4. 2 L'organe capteur

Le rôle fondamental du composant de détection consiste à Convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, généralement sous forme de rotation, dans le but ultime de réaliser une conversion d'énergie électromécanique. Il existe deux principales classifications d'éoliennes en fonction de la configuration de l'axe autour duquel les pales sont installées [31].

II. 5. 4. 2. 1 Capteurs disposés horizontalement

Les éoliennes à axe horizontal sont conçues de manière à avoir leur rotor aligné parallèlement au sol, perpendiculairement à la direction du vent. Ce type d'éolienne est largement privilégié dans les installations commerciales.

L'atout majeur des éoliennes à axe horizontal réside dans leur efficacité énergétique. Du fait de leur conception, elles parviennent à capturer une quantité substantielle d'énergie éolienne et à la convertir en électricité de façon plus performante que les éoliennes à axe vertical. Cette performance est en partie due à la flexibilité qu'elles offrent pour optimiser la taille et la forme des pales, permettant ainsi de maximiser la capture du vent.

Les éoliennes à axe horizontal sont généralement déployées dans des parcs éoliens commerciaux en raison de leur rendement élevé et de leur aptitude à générer de l'électricité à grande échelle. Il est cependant important de souligner que les éoliennes à axe vertical existent également, apportant leurs propres avantages et trouvant des applications spécifiques.

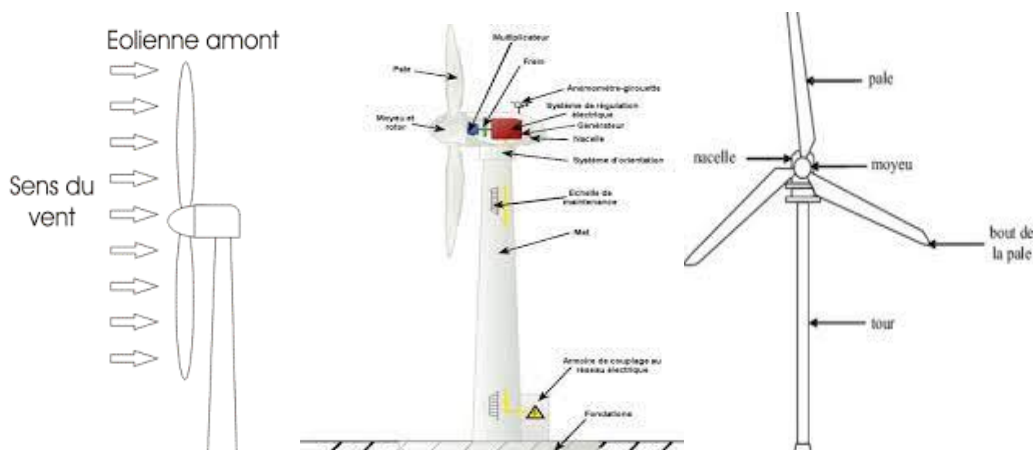
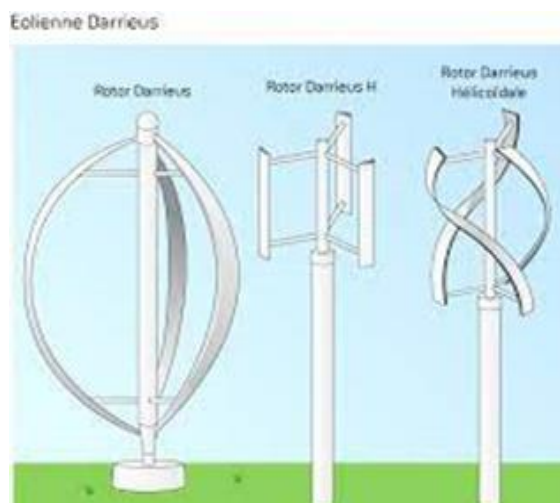


Figure 25 : Schéma Eolienne à axe horizontal.

II. 5. 4. 2. 2 Capteurs disposés verticalement

Ces éoliennes requièrent un mécanisme de démarrage externe, car elles ne sont pas capables de s'auto-lancer. Toutefois, à la différence des éoliennes à axe horizontal, celles à axe vertical présentent l'avantage de ne pas nécessiter la construction d'une tour pour soutenir le dispositif de production d'électricité. Celui-ci est directement installé au sol, tel qu'illustré dans la figure 27.



Éolienne Darrieus



Éolienne Savonius

Figure 26 : Éolienne disposés verticalement.

II. 5. 4. 3 Principe de Fonctionnement

Les éoliennes jouent un rôle vital dans le processus de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique, suivant un cheminement en deux étapes :

D'abord, au niveau de la turbine (ou du rotor), une fraction de l'énergie cinétique du vent est capturée grâce à l'usage de profils aérodynamiques. Ces profils induisent un flux d'air qui engendre simultanément une force de propulsion, mettant le rotor en mouvement, et une force de résistance qui génère une force secondaire.

Ensuite, au niveau de la génératrice, l'énergie mécanique ainsi générée se métamorphose en énergie électrique. Cette forme d'énergie électrique est par la suite injectée dans le réseau électrique pour son utilisation.

Ainsi, les éoliennes s'avèrent être des agents de transformation de l'énergie éolienne en une forme d'énergie plus aisément exploitable, contribuant de ce fait à la production d'électricité renouvelable [31].

II. 6 Avantages et désavantages de l'énergie éolienne

II. 6. 1 Avantages

- l'éolienne représente une source propre, fiable, économiquement avantageuse et respectueuse de l'écosystème.

- L'énergie éolienne constitue une forme d'énergie renouvelable qui est écologique, gratuite et inépuisable.

- Les éoliennes modernes sont maintenant conçues pour fonctionner durant une période de 20 à 25 ans, équivalant ainsi en longévité à de nombreux autres dispositifs conventionnels de production d'énergie [31].

II. 6. 2 Inconvénients

- Occasionnellement, le vent peut varier en intensité de manière imprévisible.

- Les éoliennes ont la capacité de générer du bruit et de modifier l'apparence du paysage local où elles sont implantées.

- La production d'énergie éolienne est influencée par la force des vents et non par les besoins en électricité.

II. 7 Énergie éolienne en Algérie

La disponibilité de l'énergie éolienne en Algérie présente une notable variabilité d'une région à l'autre, principalement attribuable à la diversité des caractéristiques topographiques et climatiques à travers le pays. Le territoire algérien peut être divisé en deux vastes zones géographiques distinctes.

La région méditerranéenne nord à une côte longue de 1200 km avec des montagnes comme l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre ces montagnes, il y a des plaines et des plateaux, avec un climat semblable à celui des terres continentales. D'un autre côté, le sud est caractérisé par un climat saharien.

La carte ci-dessous montre que les vents sont beaucoup plus forts dans le sud que dans le nord, en particulier dans le sud-ouest où ils dépassent les 4 m/s et atteignent même plus de 6 m/s dans la région d'Adrar.

En ce qui concerne le nord, les vitesses moyennes de vent tendent à être généralement modérées. Toutefois, des microclimats se manifestent sur les zones côtières, ainsi qu'à l'intérieur de la zone délimitée par Bejaïa au nord et Biskra au sud [31].

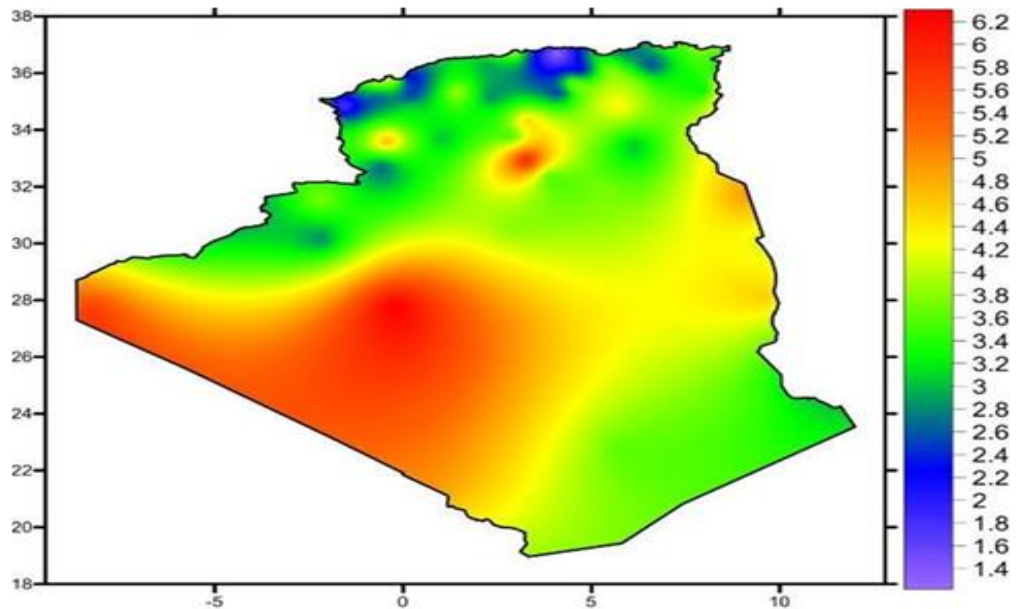


Figure 27 : Carte des vents en Algérie [31][32].

II. 8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'énergie éolienne, une source d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour générer de l'électricité. Nous avons examiné les différents types d'éoliennes, leurs composants, et leur principe de fonctionnement. Nous avons également présenté des données chiffrées sur l'énergie éolienne au niveau mondial et en Algérie.

Chapitre III

L'énergie

Photovoltaïque

Chapitre III L'énergie photovoltaïque

III. 1 Introduction sur photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque se classe parmi les sources d'énergie renouvelable significatives. Les dispositifs photovoltaïques transforment les rayons du soleil captés en énergie électrique.

De manière globale, deux catégories principales de configurations sont courantes [33] :

- Les installations photovoltaïques non autonomes, également appelées installations connectées au réseau, sont reliées au réseau électrique public. Dans ces installations, l'électricité produite par les modules photovoltaïques est convertie en courant alternatif par un onduleur (DC/AC). L'électricité produite en excès est injectée dans le réseau public, et la demande d'électricité est satisfaite par le réseau public.
- Les installations photovoltaïques autonomes, également appelées installations en îlot, ne sont pas connectées au réseau électrique. Elles doivent donc couvrir la demande de charge à tous les instants, même la nuit. Pour cela, elles sont équipées d'un système de stockage d'énergie qui permet de stocker l'électricité produite pendant la journée et de la restituer lorsque la demande est plus élevée.

Les quatre composants principaux d'une installation photovoltaïque sont les suivants [33] :

- Les modules photovoltaïques, qui convertissent la lumière du soleil en électricité.
- L'onduleur, qui convertit l'électricité de courant continu (DC) produite par les modules photovoltaïques en électricité de courant alternatif (AC) que l'on peut utiliser dans nos maisons et nos entreprises.
- Le système de câblage, qui relie les modules photovoltaïques à l'onduleur et au reste de l'installation.
- Le système de montage, qui supporte les modules photovoltaïques et les maintient en place.

III. 2 Rayonnement solaire dans l'espace

Le Soleil est une étoile de taille moyenne, d'environ 1 390 000 kilomètres de diamètre, soit 50 fois le diamètre de la Terre. Il est composé à 80 % d'hydrogène, à 19 % d'hélium et à 1 % d'éléments plus lourds. Il génère son énergie par le biais de la fusion nucléaire, un processus qui transforme 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium chaque seconde [34].

III. 2. 1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est comparable à celui d'un corps noir à 5800 kelvins. Il se situe dans la gamme des longueurs d'onde comprises entre 0,22 et 10 micromètres, et se subdivise en trois bandes spectrales :

- Les ultraviolets (UV) : ils ont une longueur d'onde inférieure à 0,4 micron. Ils sont invisibles à l'œil nu, mais ils peuvent être nocifs pour la peau et les yeux. Ils sont utilisés pour la désinfection et le traitement de certains cancers.
- Le visible : il a une longueur d'onde comprise entre 0,4 et 0,8 micron. C'est la bande spectrale que nous percevons avec nos yeux. Elle est composée de toutes les couleurs de l'arc-en-ciel.
- Les infrarouges (IR) : ils ont une longueur d'onde supérieure à 0,8 micron. Ils sont également invisibles à l'œil nu, mais ils sont ressentis comme de la chaleur. Ils sont utilisés pour la cuisson des aliments, le chauffage des maisons et la communication par infrarouge.

L'énergie solaire reçue par la Terre hors atmosphère est estimée à 1370 W/m². Cependant, elle diminue en passant dans l'atmosphère, et ne dépasse pas 1000 W/m² à la surface de la Terre. Cette perte d'intensité est due à l'absorption de la lumière par les gaz et les particules atmosphériques. L'intensité de l'énergie solaire reçue à la surface de la Terre varie également en fonction de la latitude, de la saison, de l'heure de la journée, des conditions météorologiques et de l'altitude [35].

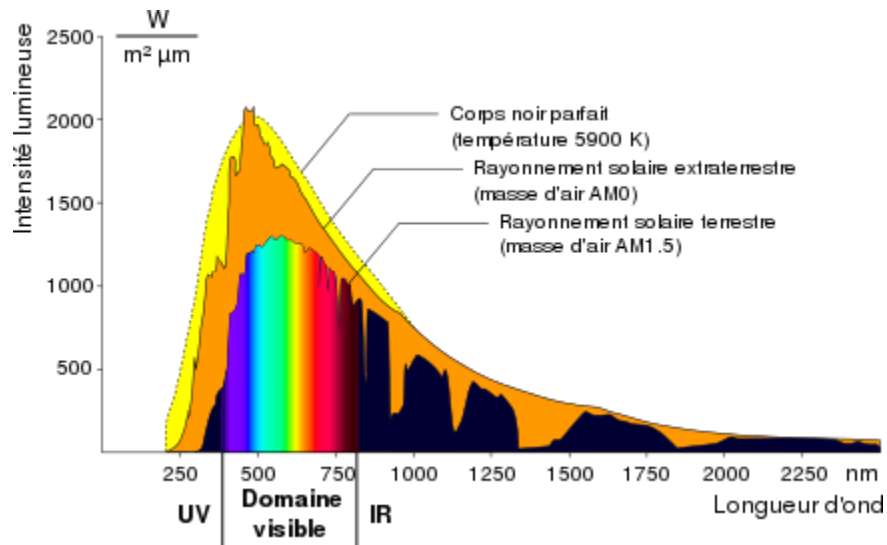


Figure 28 : Étude de la composition spectrale du rayonnement solaire

Après avoir traversé l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Seule une fraction de ce rayonnement atteint la surface de la Terre, sous forme de trois types différents :

- Rayonnement direct : Rayonnement émis par le soleil en ligne droite du disque solaire, il est nul lorsque le soleil est entièrement recouvert de nuages.
- Rayonnement diffus : Rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre après que la lumière a été déviée par les nuages et diverses molécules, il est donc nul la nuit.
- Rayonnement réfléchi (albédo) : Le rayonnement solaire incident est réfléchi par une surface.

Le rayonnement global est la somme des trois composantes du rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi. Cette somme est illustrée sur la figure ci-dessous.

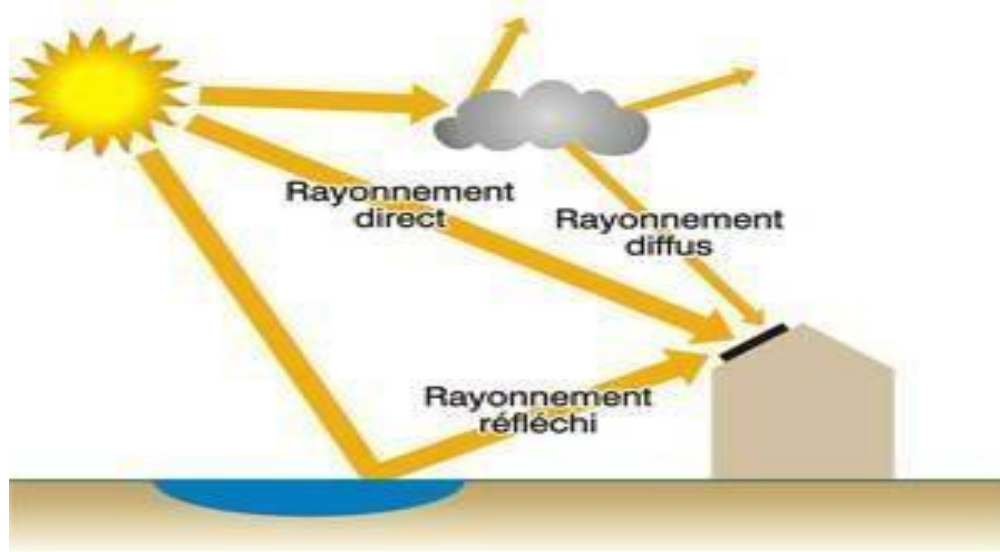


Figure 29 : Composantes du rayonnement solaire au sol.

III. 3 Capture solaire

Le besoin d'énergie solaire crée l'opportunité d'introduire un certain nombre de technologies de récupération de l'énergie solaire. Il existe principalement trois types qui utilisent l'énergie solaire directe : les capteurs thermiques, les capteurs photovoltaïques et les capteurs hybrides.

III. 3. 1 Energie solaire thermique

Le solaire thermique actif est une technologie qui exploite l'énergie solaire pour chauffer un fluide caloporteur, généralement de l'eau ou de l'air. Cette chaleur peut être utilisée pour produire de l'eau chaude sanitaire, chauffer des piscines et des bâtiments, ou encore sécher des aliments [36].

III. 3. 2 Captures thermiques

Tous les capteurs solaires thermiques ont pour objectif de convertir le rayonnement solaire en chaleur de manière efficace et de fournir cette chaleur aux consommateurs. Plusieurs variétés de capteurs solaires thermiques sont disponibles, notamment les capteurs non-vitrés, les capteurs plans, les capteurs sous vide et les capteurs à concentration. Ils présentent des distinctions en termes de performance, de conception, de coût et de qualité [35].

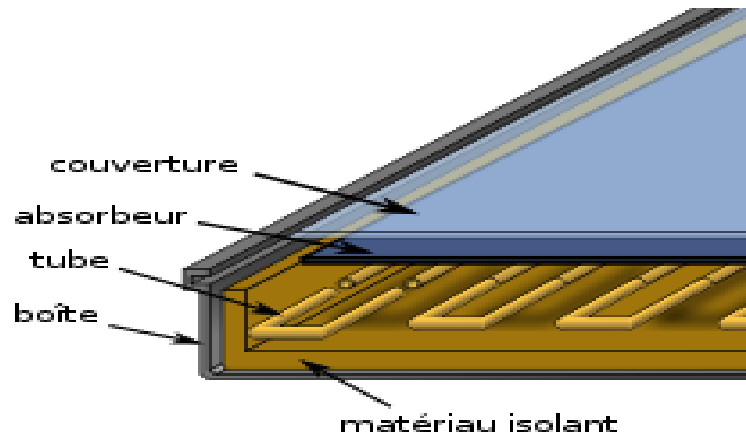


Figure 30 : Capture thermique.

III. 4 La photopile

La photopile représente un élément électronique qui, lorsqu'il est exposé à de la lumière (sous forme de photons), produit un potentiel électrique [36].

III. 5 Effet photovoltaïque

Une photopile repose sur le principe physique de l'effet photoélectrique, qui engendre la création d'une force électromotrice dès lors que la surface de la cellule est en contact avec la lumière. La tension produite peut fluctuer dans une plage allant de 0,3 V à 0,7 V en fonction du matériau employé, de la configuration, de la température ambiante et de l'évolution de la durée de vie de la cellule. L'efficacité énergétique obtenue à l'échelle industrielle est de l'ordre de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, de 11 à 12 % pour le silicium polycristallin, et environ 7 à 8 % pour le silicium amorphe en couches minces [37] [38].

III. 6 Installation

Une installation photovoltaïque est un système qui convertit l'énergie solaire en électricité. Il se compose de cinq éléments principaux : les cellules photovoltaïques, les batteries, le régulateur, le convertisseur et les appareils électriques.

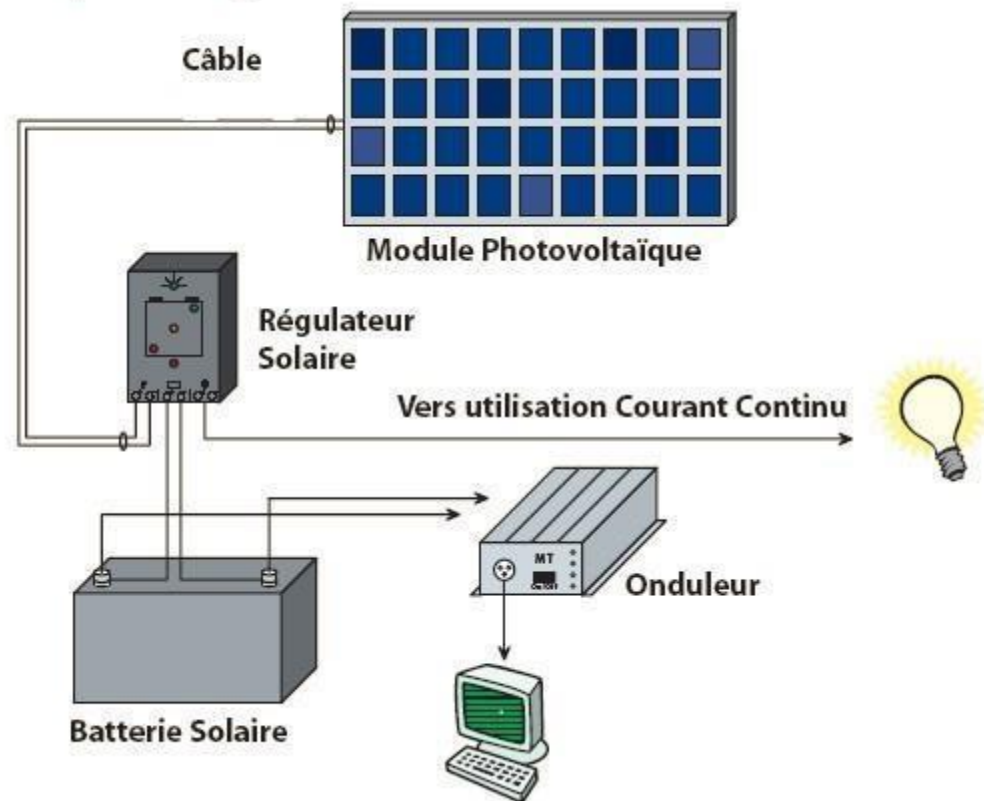


Figure 31 : Les constituants d'un système PV.

Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent l'énergie solaire en courant continu (CC). Ce courant peut être utilisé tel quel ou transformé en courant alternatif (CA) grâce à un onduleur. Si le système produit plus d'énergie que nécessaire, l'excès est stocké dans des batteries. Un régulateur supervise la gestion de l'énergie stockée, assurant un équilibre entre la production, la consommation et le stockage d'énergie.: résumé simple [39].

III. 6. 1 Le panneau PV

Le panneau solaire photovoltaïque (PV) est constitué d'un assemblage de cellules photovoltaïques interconnectées, créant ainsi un module ou un panneau solaire.

III. 6. 2 La batterie

La batterie solaire a pour fonction de stocker l'électricité générée par le panneau solaire afin d'assurer l'autonomie du système. Sa durabilité est déterminée par le nombre de cycles de charge et de décharge qu'elle peut subir. Elle est identifiée par sa capacité en Ampères-heures (Ah) et sa tension en Volts.

On peut trouver les types des batteries solaires suivants :

III. 6. 2. 1 Batterie étanche

C'est une batterie solaire qui ne nécessite pas d'entretien, doit être installée dans un endroit sec et frais, et ne doit pas rester inutilisée plus de 4 à 5 mois. Bien qu'elle soit chère au départ, elle peut durer de 10 à 17 ans.

III. 6. 2. 2 Batterie stationnaire solaire

C'est une batterie solaire ouverte qui demande un entretien régulier, comme l'ajout d'acide chlorhydrique ou d'eau distillée tous les 6 mois. Elle coûte moins cher que la batterie étanche et peut durer de 10 à 15 ans.

III. 6. 2. 3 Batterie à gel

Il s'agit d'une batterie ouverte spécialement conçue pour les zones froides, où il peut y avoir de la neige ou du verglas. Elle nécessite un entretien régulier, tel que l'ajout d'antigel au mono-propylène glycol tous les 6 mois. Son coût est modéré et elle peut fonctionner pendant approximativement 15 ans.

Contrôleur de charge :

Le régulateur, ou contrôleur de charge, est important pour rendre le système solaire durable et moins coûteux à installer. Il fait cela en effectuant ces principales tâches :

- Gérer la tension de la batterie pour éviter la surcharge et la décharge profonde.
- Optimiser l'utilisation de l'énergie en s'assurant que l'électricité circule de manière efficace entre le panneau solaire, la batterie, et les appareils électriques.

Pour son opération, le régulateur requiert un indicateur fournissant des données sur le niveau de charge des batteries. Il doit maintenir cette charge dans une fourchette définie entre deux niveaux : un seuil supérieur et un seuil inférieur. La sélection de ces niveaux dépend des attributs propres aux batteries ainsi que des conditions d'exploitation. Les spécifications d'un régulateur sont généralement exprimées en termes d'ampérage en Ampère et de tension en Volt [40].

III. 6. 3 Le convertisseur d'énergie (onduleur)

Le convertisseur d'énergie, également appelé onduleur, dans le rôle est de convertir le courant continu généré par le système solaire en courant alternatif et d'adapter la tension de sortie (par exemple, de 12 V, 24 V... à 220 V). Il est défini par deux principales caractéristiques : la tension d'entrée en volt (voltage de branchement) et la puissance nominale en watt qu'il est capable de fournir.

III. 6. 4 La charge

La charge englobe toutes les opérations exécutées par les divers appareils reliés au système photovoltaïque. Etant donné les contraintes liées à l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques, il devient essentiel d'établir les critères nécessaires pour guider le choix des charges à adopter, qu'elles soient continuées ou alternatives.

III. 7 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes PV :

Les systèmes autonomes, hybrides et connectés au réseau.

III. 7. 1 Systèmes autonomes

En fonction des besoins, les systèmes indépendants alimentent un ou plusieurs dispositifs de consommation localisés dans des zones éloignées du réseau électrique

. On peut classer ces systèmes en deux catégories :

III. 7. 1. 1 Systèmes avec accumulateurs

L'énergie excédentaire produite par un système photovoltaïque est stockée dans des batteries, comme le montre le schéma synoptique de la figure suivante.

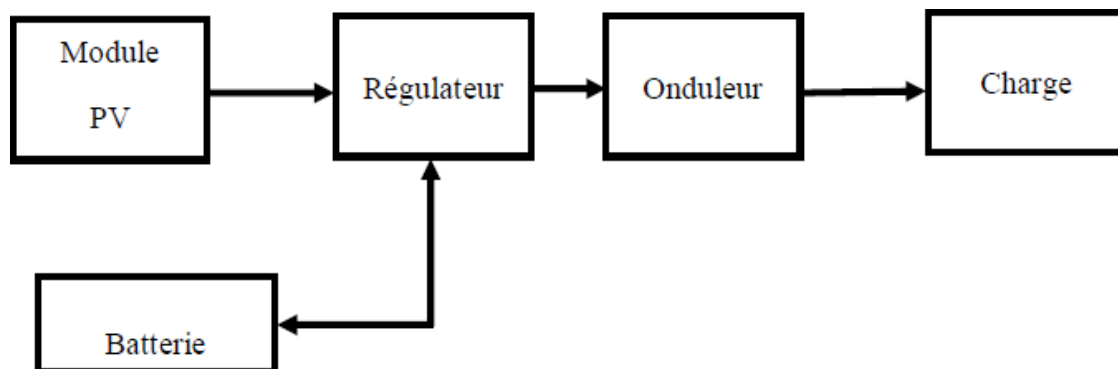


Figure 32 : Illustration schématique d'un système solaire photovoltaïque autonome incluant une batterie.

III. 7. 1. 2 Système sans accumulateurs

Dans de tels systèmes dépourvus de batteries, il est envisageable d'utiliser des méthodes de stockage qui ne dépendent pas de réactions électrochimiques. Par exemple :

Pompage : stockage par réservoir d'eau.

Réfrigération : stockage de froid

Électrolyse de l'eau : stockage d'hydrogène [41] [43].

III. 7. 2 **Systèmes hybrides**

Les systèmes hybrides combinent une source d'énergie renouvelable, généralement solaire, à une autre source d'énergie renouvelable, telle que l'éolien ou le diesel, ou aux deux à la fois. L'utilisation de plusieurs sources d'énergie renouvelables est appelée jumelage.

Le module auxiliaire peut être utilisé selon deux stratégies

Charge des batteries : Il charge les batteries du système.

Alimentation directe de la charge et chargement des batteries : Il alimente directement la charge tout en rechargeant les batteries.

Ce type de système est une option intelligente pour les besoins nécessitant une alimentation constante à une puissance plutôt élevée, particulièrement lorsque l'énergie solaire n'est pas suffisante à certains moments de l'année [41].

III. 7. 3 **Systèmes connectés au réseau**

Dans ce type d'installations connecté au réseau l'énergie solaire est transformée en courant alternatif (CA) et l'injectent dans le réseau électrique. De plus, ils peuvent puiser de l'électricité depuis le réseau lorsque le soleil ne produit pas suffisamment d'énergie.

Il y a deux catégories de systèmes solaires raccordés au réseau.

III. 7. 3. 1 **Systèmes photovoltaïques directement reliés au réseau**

Ce système photovoltaïque ne dispose pas de batterie et ne peut donc stocker de l'énergie. Il peut seulement fournir ou prélever de l'énergie du réseau. La figure suivante illustre son schéma.

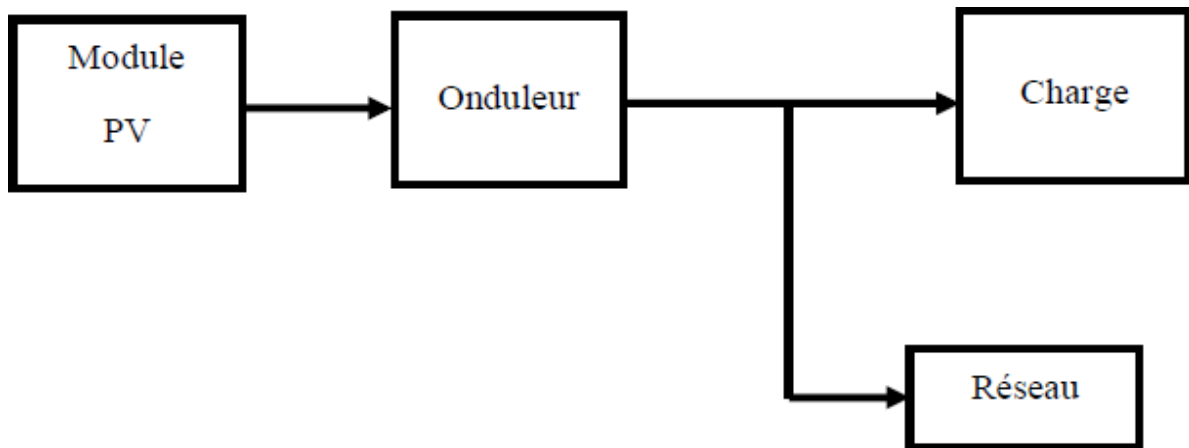


Figure 33 : Système photovoltaïque connecté directement au réseau.

III. 7. 3. 2 Systèmes photovoltaïques reliés au réseau avec batterie :

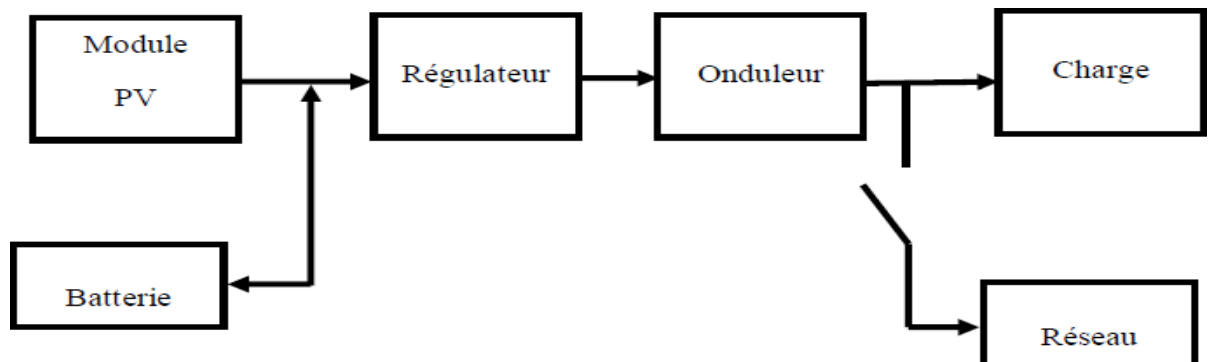


Figure 34 : Système photovoltaïque relié au réseau avec batterie.

Le module photovoltaïque alimente en énergie la charge, et tout surplus est stocké dans les batteries. En cas de décharge excessive ou de surcharge de la batterie, il est possible de recourir au réseau électrique pour ajouter ou retirer de l'énergie [41].

III. 8 Avantages et inconvénients des systèmes PV

III. 8. 1 Avantages

- Une énergie propre et durable.
- Un faible impact environnemental.
- Un entretien réduit.
- Une rentabilité à long terme
- Une flexibilité.
- Une sécurité accrue [44].

III. 8. 2 Inconvénients

Les systèmes photovoltaïques présentent également quelques inconvénients, notamment :

- Un coût initial élevé
- Une production d'électricité.
- Un impact environnemental lié à la fabrication [45].

III. 9 Mode de fonctionnement de la cellule PV

Une batterie représente l'équipement transformant l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion se fait en trois étapes suivantes :

- Capture des photons
- Transforme l'énergie lumineuse en énergie électrique
- Recueille les particules à l'intérieur du dispositif.

III. 10 Types de cellules photovoltaïques

Il existe deux types :

- les cellules inorganiques
- les cellules organiques

III. 10. 1 Cellules photovoltaïques inorganiques

Les cellules photovoltaïques inorganiques alias silicium, représentent les ventes mondiales de panneaux solaires de 99 ans, on peut citer :

III. 10. 1. 1 Cellules en silicium monocristallin

Le silicium fondu, lorsqu'il se refroidit, forme un monocristal. Les cristaux sont ensuite coupés en fines tranches qui produiront des cellules. Ces cellules sont généralement de couleur verte uniforme.

III. 10. 1. 2 Cellule en silicium poly cristallin

Lors du refroidissement du silicium, plusieurs cristaux se forment. Ce type de cellule est également bleu, mais n'est pas uniforme, à des motifs créés par différents cristaux.

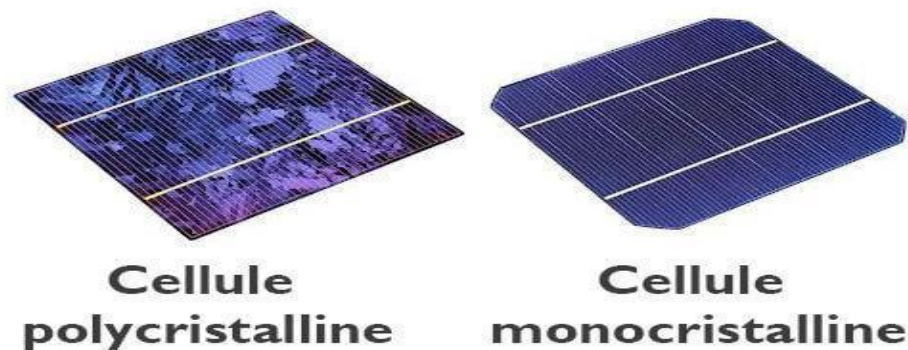


Figure 35 : Cellule poly cristalline et monocristalline.

III. 10. 1. 3 Silicium en ruban autosupporté

Les techniques de fabrication de rubans de silicium autoportants étaient prometteuses pour la technologie de visualisation. La plus connue, basée sur l'effet capillaire entre deux carbones, a été beaucoup étudiée et a même débouché sur des projets de production industrielle

III. 10. 1. 4 Silicium amorphe

Le silicium ne cristallise pas, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules du calculateur ou des horloges dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, notamment sa capacité à fonctionner en intérieur en basse lumière contrairement au silicium cristallin.

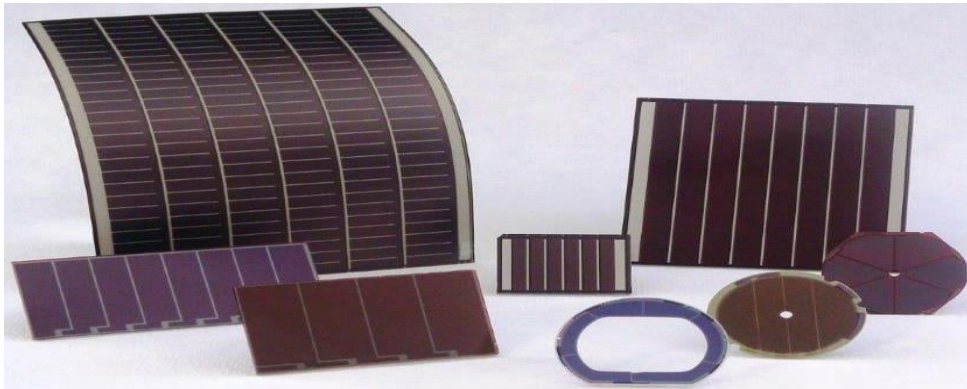


Figure 36 : Cellule Amorphe.

III. 10. 2 Cellule photovoltaïque organique

Les cellules organiques sont développées depuis 30 ans, mais elles ont un rendement encore faible. Cependant, ces cellules présentent plusieurs avantages, notamment leur facilité de fabrication, leur légèreté et leur flexibilité. De plus, l'ingénierie moléculaire permet de les adapter à des besoins spécifiques [46].

III. 10. 2. 1 Nouvelle technologie

Les matériaux organiques sont de plus en plus utilisés dans l'optoélectronique, notamment pour les diodes électroluminescentes organiques (OLED). Ce domaine bénéficie des avancées technologiques de l'optoélectronique, ce qui permet de faire des progrès spectaculaires d'année en année [47].

Tableau 2: Les avantages et inconvénients d'une cellule photovoltaïque.

Type	Silicium monocristallin	Silicium polycristallin	Amorphe
Durée de vie	35 ans	35 ans	35 ans
Les avantages	La production d'électricité est	Un rendement en plein soleil qui est supérieur à celui des cellules en silicium amorphe, mais inférieur à celui des cellules en	Souplesse, prix moins élevé que les cristallins, bon rendement en diffuse

	optimale en plein soleil.	silicium monocristallin)	
Les inconvénient	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...) Prix élevé.	Mauvais rendement en soleil diffus (temps nuageux...)prix élevé	Mauvais rendement en plein soleil.

III. 11 Composition d'un module photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants essentiels des installations photovoltaïques. Elles sont constituées d'un matériau semi-conducteur, qui convertit la lumière du soleil en électricité. Les cellules photovoltaïques comprennent :

- Une fine couche de silicium, un matériau semi-conducteur qui possède une bonne conductivité électrique.
- Une couche antireflet qui permet à la lumière de pénétrer plus facilement dans la cellule.
- Une grille conductrice en haut, appelée cathode, et une grille conductrice en bas, appelée anode.
- Les cellules photovoltaïques les plus récentes possèdent une nouvelle combinaison de couches réfléchissantes, qui permet à la lumière de rebondir autour de la cellule et d'augmenter la production d'électricité.

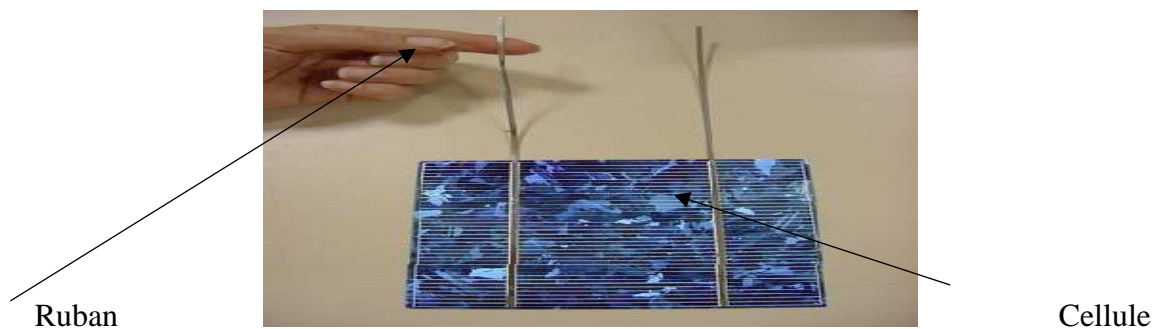


Figure 37 : Ruban métallique d'une cellule.

La cellule photovoltaïque est assemblée en sandwich entre deux feuilles de plastique transparent, appelées EVA. Elle est également entourée d'un cadre en aluminium avec des rondelles pour permettre la dilatation. La face avant de la cellule est protégée par un verre trempé, qui laisse passer la lumière. La face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille de

TEDLAR. Les bornes de la cellule sont connectées à un boîtier étanche, qui contient également des diodes de dérivation. Deux câbles unipolaires sont connectés aux bornes.

III. 11. 1 Mise en série

La combinaison de (Ns) cellules en série de la figure (44) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. Les cellules sont alors passées dans le même courant et la caractéristique issue du regroupement de la série est obtenue en additionnant les tensions de base de chaque cellule. Équation résumant les caractéristiques électriques d'une série de (Ns) cellules [48].

$$\begin{cases} V_{coNS} = Ns \times V_{co} \\ I_{cc} = I_{ccNs} \end{cases} \quad (III-1)$$

Avec :

V_{coNs} : La somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

I_{ccNs} : Courant de court-circuit de Ns cellules en série.

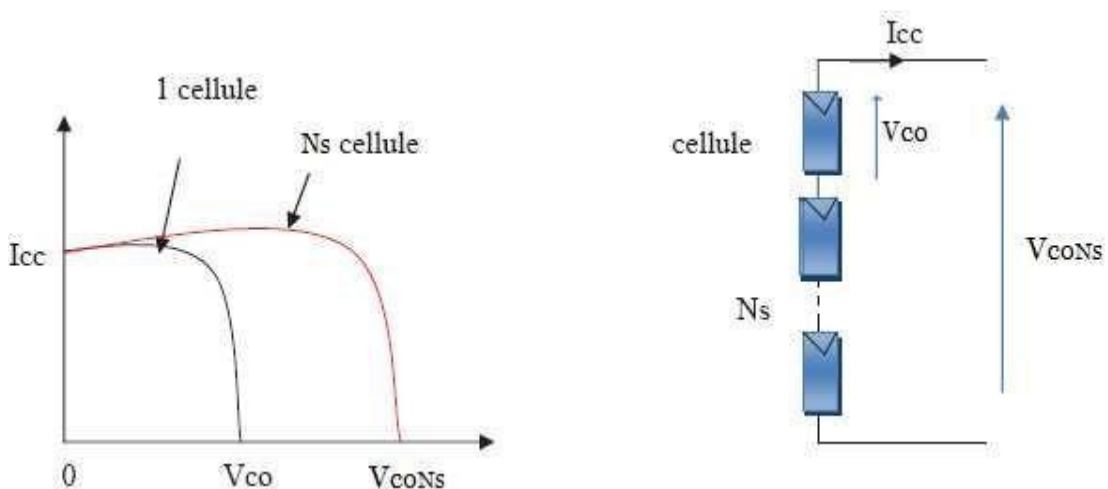


Figure 38 : Caractéristique courant tension de Ns cellule en série.

III. 11. 2 Mise en parallèle

Les cellules de la figure (45) (NP) peuvent être combinées en parallèle et contribuer à augmenter le courant de sortie que le générateur produit ainsi. Lorsqu'un groupe de cellules solaires identiques sont connectées en parallèle, elles sont soumises à la même tension. La caractéristique de groupe résultante est la somme des courants de chaque cellule [49].

$$\begin{cases} I_{ccNP} = N_P \times I_{cc} \\ V_{co} = V_{coNP} \end{cases} \quad \text{III—2}$$

Avec :

I_{ccNP} : Le courant de court-circuit d'un panneau solaire constitué de NP cellules en parallèle.

V_{coNP} : Tension de circuit ouvert d'un panneau solaire à NP cellules en parallèle.

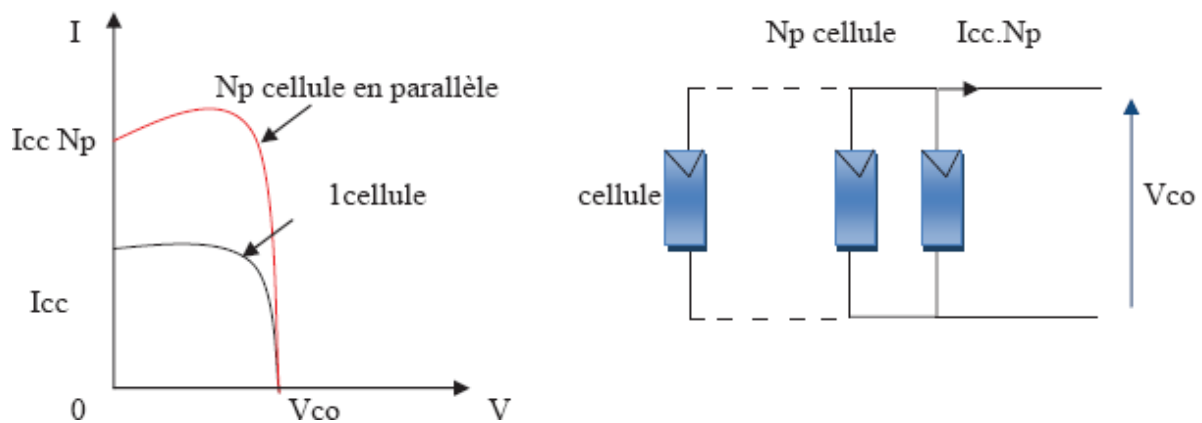


Figure 39 : Caractéristique courant tension de (Np) cellule en parallèle.

III. 12 Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photoélectrique peut être modélisée comme une source de courant en série avec une diode et une résistance parallèle. La résistance en série est due à la résistance de la jonction, des contacts et de la terre, tandis que la résistance parallèle est due aux résistances des contacts et des fuites [50].

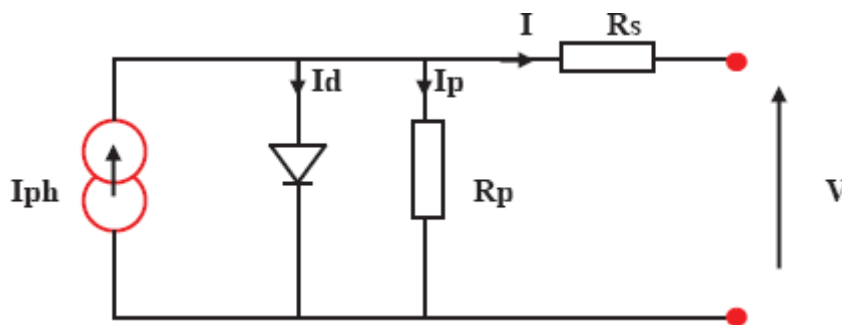


Figure 40 : Modèle de la cellule photovoltaïque.

Avec :

$V_t = \frac{KTc}{q}$: Représentant la potentielle thermodynamique.

III. 12. 1 Facteur de forme F

Le facteur de forme est un indicateur de la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV. Ce facteur représente le rapport entre la puissance maximale que peut fournir la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur est élevée, plus la capacité de minage sera grande. Par conséquent, les meilleures cellules seront soumises à des compromis technologiques pour atteindre autant que possible des propriétés idéales [44]. On le mesure à l'aide de la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (III-3)$$

III. 12. 2 Le rendement

L'efficacité d'une cellule photovoltaïque est définie comme le rapport entre la puissance maximale qu'elle peut produire et la puissance lumineuse qu'elle reçoit P_{in} .

$$\frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF.I_{cc}.V_{co}}{P_{in}} \quad (III-4)$$

III. 13 Modèle de la cellule PV

Il existe plusieurs module cellule PV [51]

- Modèles à diode unique.
- Modèle à deux diodes.
- Modèles empiriques.
- Modèle de Bishop.

Lors de la sélection d'un modèle, il est important de tenir compte des objectifs de l'étude. Les modèles à diode unique sont généralement suffisants pour les applications de base, telles que le calcul de la puissance et du rendement. Les modèles à deux diodes offrent une meilleure précision, mais sont plus complexes à utiliser. Les modèles empiriques offrent le meilleur ajustement des données expérimentales, mais sont moins flexibles. Les modèles de Bishop sont les plus complexes, mais sont les plus précis et peuvent être utilisés pour étudier une large gamme de phénomènes.

Dans la pratique, les modèles de Bishop sont souvent utilisés pour simuler le comportement des cellules photovoltaïques par défaut, car ils offrent une précision supérieure aux autres modèles. Ils sont également utiles pour étudier les cellules fonctionnant en mode inverse, ce qui est important pour comprendre le comportement des cellules dans les conditions de fonctionnement réelles.[51, 52, 53]

III. 13. 1 Modèle à une diode

Le modèle est un modèle simplifié d'une cellule solaire unique qui peut être utilisé pour décrire le fonctionnement d'un module photovoltaïque.

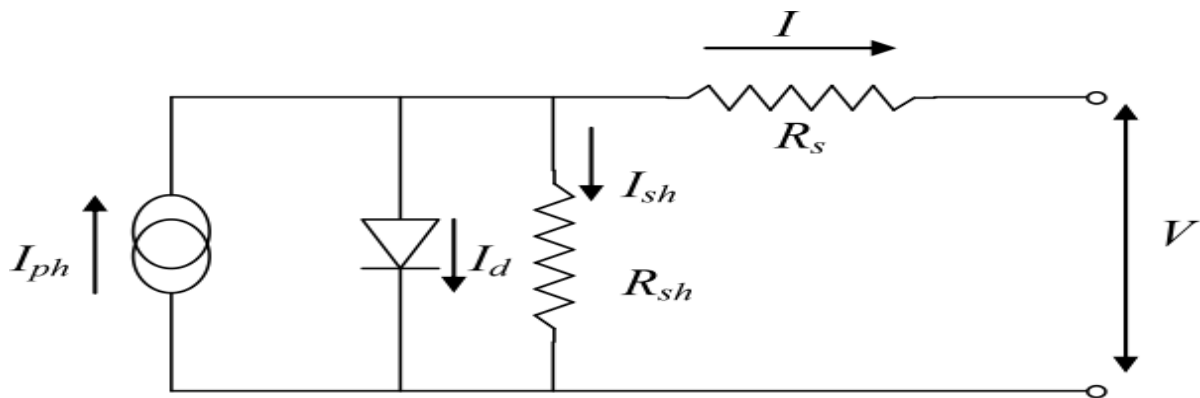


Figure 41 : schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode.

- I : Production d'électricité par la cellule [A]
- V : Tension de fonctionnement de la cellule [V]
- I_p : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiance, avec correction selon T
- I_s : Courant de saturation de la diode [A], dépendant de la température [°C]
- R_s : Résistance série [ohm].
- R_{sh} : Résistance shunt (ou parallèle) [ohm].
- q : Charge unitaire est de $1,602 \times 10^{-19}$ Coulomb
- R : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- A : Taux de qualité de la diode.
- T : Température de référence de la cellule [Kelvin].

III. 13. 2 Modèle à deux diodes

nous utilisons ce modelé pour définir les phénomènes de polarisation de la jonction P-N. La première diode représente la recombinaison des porteurs minoritaires en surface du matériau, et la deuxième diode représente la recombinaison des porteurs minoritaires dans le volume du matériau [53].

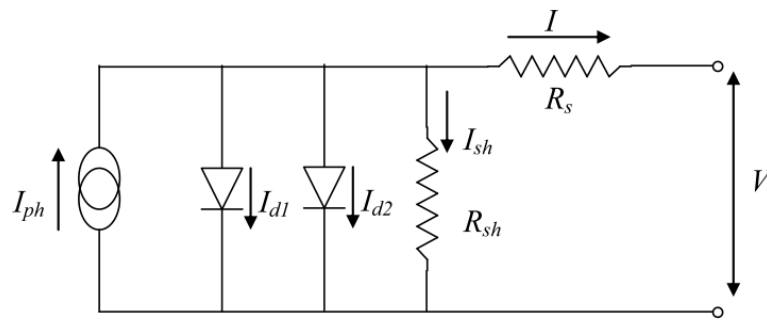


Figure 42 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.

III. 13. 3 Model empirique

Le modèle mono diode est un modèle simple qui décrit le comportement d'une phot cellule par un circuit équivalent composé d'une diode et d'une résistance. L'avantage principal de ce modèle est qu'il ne nécessite que quelques paramètres, qui sont facilement disponibles dans les fiches techniques des constructeurs.

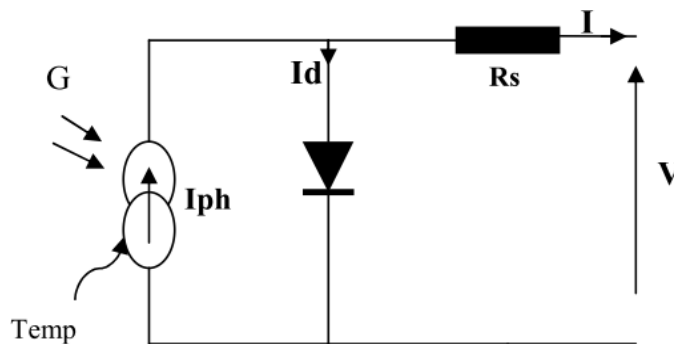


Figure 43 : Circuit équivalent simple de la cellule PV.

III. 13. 4 Model de Bishop

Le modèle de Bishop est utilisé souvent pour définir le comportement des cellules PV en fonctionnement normal et en fonctionnement inverse [52] [53].

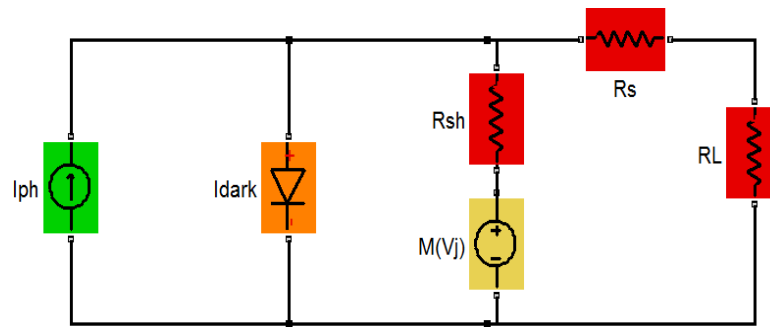


Figure 44 : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle de Bishop.

III. 14 Conclusion

L'énergie PV est produite par la conversion directe de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion est effectuée par des cellules PV, qui utilisent l'effet photoélectrique. La tension produite dépend du matériau utilisé pour fabriquer les cellules.

Les performances des modules photovoltaïques sont influencées notamment par le rayonnement solaire et la température.

Chapitre IV

Modélisation d'un

systeme hybride et

discussion

technico-économique

Chapitre IV Modélisation d'un système hybride et discussion technico-économique

IV. 1 Introduction

Les systèmes hybrides sont des solutions énergétiques innovantes qui combinent différentes sources d'énergie pour répondre aux besoins en électricité de manière efficace et durable. Ces systèmes incorporent généralement des sources renouvelables telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne ou l'hydroélectricité avec des sources conventionnelles comme les générateurs diesel ou les réseaux électriques. L'objectif principal des systèmes hybrides est de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables, réduire les émissions de gaz à effet de serre et assurer une alimentation électrique fiable dans les zones éloignées ou déconnectées du réseau électrique.

IV. 2 Système hybride

Une configuration hybride à sources d'énergie renouvelables combine différentes sources d'énergie, dont au moins l'une d'entre elles est renouvelable [54].

IV. 2. 1 Le but de systèmes hybride

L'objectif d'une installation hybride est d'assurer la charge à tout moment, tout en maximisant l'utilisation des sources. Pour atteindre un équilibre énergétique, Quelle que soit la situation, il est essentiel de garantir une qualité d'énergie appropriée. En raison de la diversité des systèmes hybrides, il est possible de les classer dans une catégorie précise [55].

IV. 3 Installation des systèmes hybrides autonomes

Avec l'avènement de l'électronique de puissance permettant l'optimisation des différents convertisseurs de puissance, les systèmes hybrides utilisant des sources d'énergies renouvelables ont surpassé les systèmes conventionnels. Cette avancée leur a permis de réaliser des combinaisons significatives de deux technologies ou plus, telles que le photovoltaïque et l'éolien, dans différentes architectures [56] [57].

IV. 3. 1 Configuration DC

La structure d'une installation hybride est représentée par la figure-52 [58]. Dans cette configuration, chaque source d'énergie de l'installation est reliée à un bus continu DC [59].

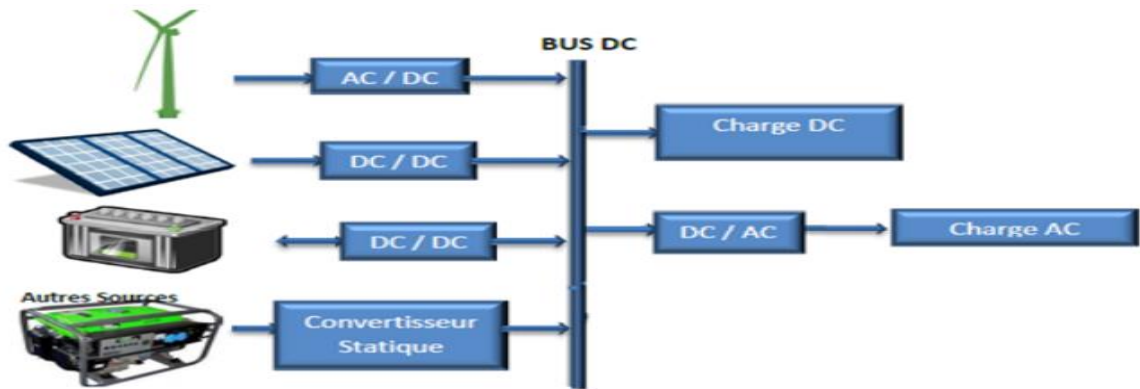


Figure 45 : Structure DC d'un système hybride [58].

IV. 3. 2 Configuration AC

Pour la configuration AC, les sources de production sont connectées au bus AC avec plusieurs convertisseurs, ainsi illustré dans la figure 53[59][61].

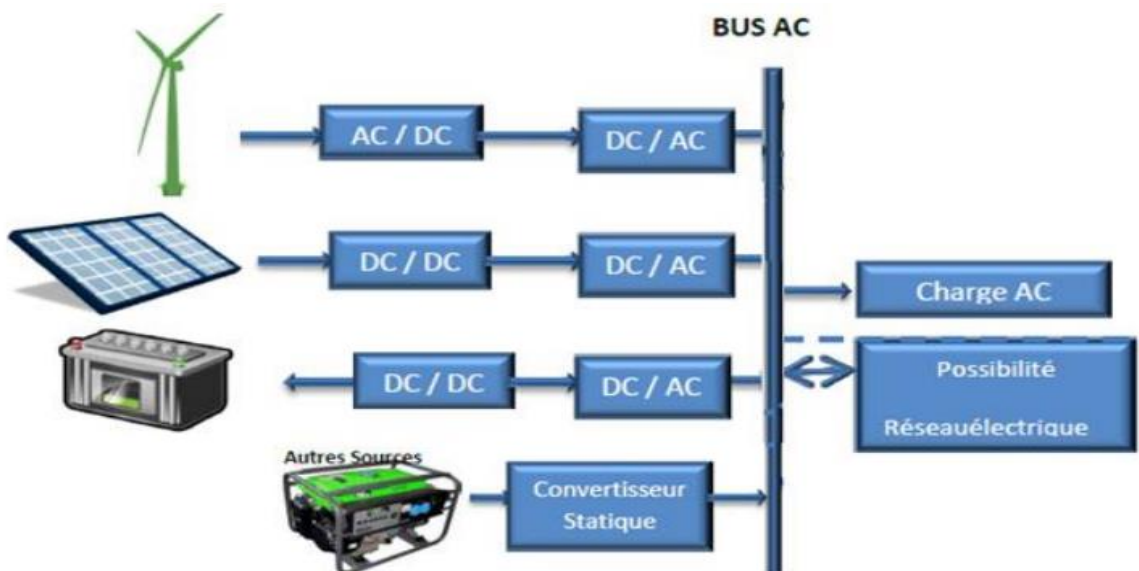


Figure 46 : Structure à bus AC d'un système hybride [58].

IV. 3. 3 Configuration mixte

L'architecture (DC&AC) d'une installation hybride est illustrée sur la figure 54 [58]. Dans cette structure, les sources d'énergie alimentent à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel à la fois la charge AC et la charge DC.

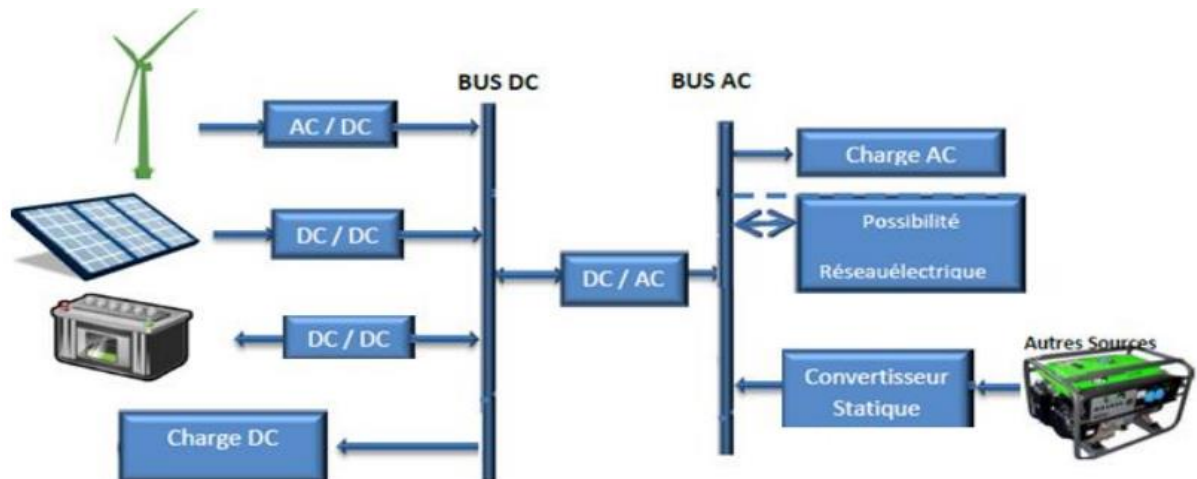


Figure 47 : Structure à bus mixte (DC & AC) d'un système hybride [58].

IV. 4 Les modèles mathématiques

Les modèles mathématiques jouent un rôle essentiel dans la compréhension et l'analyse des systèmes hybrides. Ils permettent de représenter et de prédire le comportement de ces systèmes en utilisant des équations mathématiques et des algorithmes.

Les modèles mathématiques des systèmes hybrides sont généralement basés sur des équations différentielles, des équations d'évolution ou des équations d'état qui décrivent les interactions entre les différentes composantes du système. Ces modèles peuvent prendre en compte des variables telles que la production d'énergie, la consommation, le stockage, les pertes, les contraintes techniques, les conditions environnementales, etc.

En utilisant ces modèles mathématiques, il est possible de simuler le fonctionnement du système hybride dans différentes conditions et de prédire ses performances. Cela permet de prendre des décisions éclairées sur la conception, la gestion et l'optimisation du système.

Les modèles mathématiques peuvent également être utilisés pour étudier l'impact de diverses variables et paramètres sur le système hybride, tels que la taille des composants, la

configuration du système, les stratégies de contrôle, les profils de charge, etc. Ils permettent d'identifier les meilleures pratiques et les solutions les plus efficaces pour maximiser l'efficacité énergétique, minimiser les coûts et réduire les émissions.

En outre, les modèles mathématiques des systèmes hybrides peuvent être utilisés pour l'optimisation et la planification énergétique à long terme. En prenant en compte les données historiques, les prévisions de demande, les contraintes technologiques et les objectifs spécifiques, ces modèles aident à déterminer la combinaison optimale de sources d'énergie, de stockage et de gestion pour répondre aux besoins énergétiques de manière efficace et durable.

En résumé, les modèles mathématiques sont des outils précieux pour la modélisation, l'analyse et l'optimisation des systèmes hybrides. Ils permettent de prendre des décisions éclairées, de prédire les performances, d'identifier les meilleures pratiques et d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques, contribuant ainsi à la transition vers un avenir énergétique plus durable.

IV. 4. 1 Modèle du module PV

Pour calculer la puissance PV

$$PPV(t) = P_{max} \cdot (G/G_{ref}) \cdot (1 + \alpha_T (T_c - T_{a-ref})) \quad (IV-1).$$

L'équation donnée permet de calculer la puissance générée par un module photovoltaïque à un instant donné (PPV(t)). Cette puissance dépend de plusieurs paramètres. Tout d'abord, P_{max} représente la puissance maximale du module dans des conditions de référence spécifiques, à savoir un éclairement global incident de 1000 W/m² et une température de 25°C. De plus, G correspond à l'éclairement global incident en watts par mètre carré, tandis que G_{ref} représente l'éclairement dans les conditions de référence en watts par mètre carré. Le coefficient de température de la puissance maximale (α_T) est un facteur qui mesure la variation de la puissance maximale en fonction de la température. Sa valeur est de -3.7×10^{-3} (1/°C) pour les cellules monos et polycristallines. Enfin, T_{a-ref} désigne la température ambiante dans les conditions de référence en degrés Celsius, et T_c représente la température de la cellule photovoltaïque exprimée en degrés Celsius. En utilisant cette équation, il est possible de calculer la puissance générée par le module photovoltaïque à un instant précis [61][62]

$$T_c = T + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) \cdot G \quad (IV-2)$$

Si le nombre de panneaux photovoltaïques est N_{pv} , alors la puissance totale est donnée par :

$$P_{TpV}(t) = PPV \times N_{pv} \quad (IV-3)$$

IV. 4. 2 Modèle de l'aérogénérateur (éolienne)

En règle générale, les mesures de la vitesse du vent sont effectuées à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol (Z_a). La variation de cette vitesse en fonction de la hauteur (Z) est décrite par différentes théories. De manière plus simple, le profil vertical des vitesses du vent peut être empiriquement exprimé par la relation suivante [62].

$$V_Z = V_a \times (Z/Z_a)^\alpha \quad (IV-4)$$

Avec α , représente un coefficient dit de rugosité dépendant de la nature des obstacles situés au sol.

$$P_E(t) = \begin{cases} 0 & V(t) < V_d \\ a \cdot (V(t))^3 - b \cdot P_N \cdot V_d & V_d \leq V(t) \leq V_N \\ P_N & V_N \leq V(t) < V_a \\ 0 & V(t) \geq V_a \end{cases} \quad (IV-5)$$

Dans cette équation, P_N représente la puissance nominale en watts (W), V_N , V_d et V_a représentent respectivement la vitesse nominale, la vitesse de démarrage et la vitesse d'arrêt. Les constantes a et b peuvent être calculées en utilisant les formules suivantes :

$$\begin{cases} a = P_N / (V_N^3 - V_d^3) \\ b = V_d^3 / (V_N^3 - V_d^3) \end{cases} \quad (IV-6)$$

S'il y a N_E éoliennes, alors la puissance totale est :

$$P_{TE}(t) = P_E(t) * N_E \quad (IV-7)$$

IV. 4. 3 Modélisation du stockage

Pour garantir un approvisionnement énergétique constant, notamment en l'absence d'énergie renouvelable, il est nécessaire d'utiliser des batteries comme moyen de stockage. La capacité de stockage est déterminée par l'énergie produite par le système hybride et par la charge requise, comme indiqué ci-dessous.

L'état de charge, c'est-à-dire la quantité d'énergie à l'instant (t), peut être calculée à l'aide de l'équation suivante [64] :

$$EB(t) = EB(t-1) + [EG(t) - (C(t)/\eta_{ond})] \cdot \eta_B \quad (IV-8)$$

Dans cette équation, $EB(t)$ et $EB(t-1)$ représentent respectivement les quantités de charge des batteries à l'instant t et t-1. η_{ond} indique le rendement de l'onduleur, $C(t)$ représente la charge demandée, $EG(t)$ est l'énergie générée par les générateurs photovoltaïques/éoliens, et η_B est le rendement des batteries.

En ce qui concerne l'état de décharge, la quantité d'énergie à l'instant t peut être obtenue en utilisant l'équation suivante [62] :

$$E_B(t) = E_B(t-1) + [(C(t)/\eta_{ond}) - E_G(t)] \quad (IV-9)$$

IV. 5 Étude économique

Pour déterminer le coût de l'installation, il faut qu'en calculer la somme des prix des équipements et accessoires utilisés [64].

IV. 5. 1 Évaluation du coût d'investissement initial

Pour évaluer le coût total de l'installation, il est essentiel de prendre en compte la somme des prix des équipements et accessoires utilisés une fois la mise à l'échelle du système terminée.[64].

IV. 5. 1. 1 Le Coût Total

IV. 5. 1. 1. 1 Coût des modules PV

Le coût total des modules est donné par

$$C_{mod} = N_{mod} \times P_{mod} \quad (IV—10)$$

Avec :

N_{mod} : Le nombre des modules.

P_{mod} : La puissance d'un module.

IV. 5. 1. 1. 2 Coût des onduleurs

Le coût total des onduleurs est donné par :

$$C_{ond} = N_{branche} \times P_{mod} \quad (IV—11)$$

Avec :

$N_{branche}$: est le nombre des onduleurs.

P_{mod} : est la puissance d'un onduleur.

IV. 5. 1. 1. 3 Coût total de la centrale

La somme totale des coûts fixes mentionnés précédemment constitue le coût global de la centrale photovoltaïque.

$$C_{totale} = C_{mod} + C_{ond} + C_{batt} + BOS \quad (IV—12)$$

Avec :

C_{mod} : Coût des modules PV.

C_{ond} : Coût des onduleurs.

C_b : Coût des batteries

BOS : Les coûts supplémentaires,

L'analyse économique est effectuée pour déterminer le coût total du projet et le délai de récupération de l'investissement, en se basant sur les hypothèses suivantes [64] :

- Les frais de maintenance et d'exploitation représentent 5% de l'investissement initial.
- Les coûts de main-d'œuvre représentent 10% de l'investissement initial.
- Les coûts initiaux de l'investissement.
- Les coûts de remplacement des équipements.

$$CT = \text{l'investissement initial} + \text{Coût d'Exp et maintenance} + \text{Main d'œuvre} + \text{Coût de remplacement} \quad (\text{IV—13})$$

IV. 5. 1. 2 Investissement initial

Les critères essentiels de sélection sont les suivantes :

- Le coût total du système PV sur sa durée de vie.
- Le coût total de l'énergie consommée par l'utilisateur pendant toute sa durée.

IV. 5. 1. 2. 1 Coût sur la durée de vie

Afin d'assurer le bon fonctionnement du système, il est nécessaire de maintenir régulièrement les composants photovoltaïques.

IV. 5. 1. 2. 2 Coût de maintenance et de remplacement des sous-systèmes

Le coût total dépend de l'investissement initial, des coûts annuels d'entretien et de maintenance, ainsi que du coût potentiel de remplacement de certains sous-systèmes.

$$C_{\text{vie}} = I_0 + C_{\text{ent/main}} + C_{\text{rempl}} \quad (\text{IV—14})$$

Avec :

$C_{\text{ent/main}}$: Coût annuel d'entretien et de maintenance.

C_{rempl} : Coût de remplacement éventuel de certains sous-systèmes.

Le facteur déterminant pour investir dans l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est le coût d'installation des panneaux solaires. Ce coût a connu une diminution au cours des dernières années [65].

IV. 6 Détermination de la configuration optimale selon l'analyse économique

Après avoir identifié les différents triplets (pvP, wP, batN) qui satisfont la probabilité souhaitée de "LPSP", nous constatons que la relation entre ces trois variables est non linéaire. De plus, chaque composant du système présente principalement trois types de coûts : un coût initial, un coût de maintenance et un coût de remplacement des composants [65] [67].

IV. 6. 1 Coût initial

Il est associé au coût d'achat du système, ainsi qu'au coût d'installation, ce dernier pouvant être significatif.

$$C_i = P_w C_{i_w} + P_{pv} C_{i_pv} + N_{bat} C_{i_bat} + S_{ond} C_{i_ond} \quad (IV-15)$$

Avec :

C_{i_w} : Coût initial du système éolien, DA/W.

C_{i_pv} : Coût initial du système photovoltaïque, DA/W.

C_{i_bat} : Coût initial du système de stockage, DA/W.

C_{i_ond} : Coût initial de l'onduleur, DA/W.

S_{ond} : Puissance apparente de l'onduleur, VA.

IV. 6. 2 Coût de maintenance

Dans notre cas, il est exprimé en pourcentage par rapport au coût initial de chaque composant, et cela sur une base annuelle.

$$C_m = (P_w C_{i_w} m_w + P_{pv} C_{i_pv} m_{pv} + N_{bat} C_{i_bat} m_{bat} + S_{ond} C_{i_ond} m_{ond}) * dv_{sys} \quad (IV-16)$$

Avec :

m_w : Pourcentage de maintenance annuel du système éolien (%)

m_{pv} : Pourcentage de maintenance annuel du système photovoltaïque (%)

m_{bat} : Pourcentage de maintenance annuel du système de stockage, (%)

m_{mod} : Pourcentage de maintenance annuel de l'onduleur, (%)

d_{vsys} : Durée de vie du système, (année).

IV. 6. 3 Coût de renouvellement des composants

Chaque élément du système possède une durée de vie spécifique et doit être remplacé régulièrement tout au long de la période d'utilisation du système hybride [67] [68].

$$C_r = P_w C_{i_w} \left(\frac{d_{\text{vsys}} d_{\text{vw}}}{d_{\text{vw}}} \right) + P_{\text{pv}} C_{i_{\text{pv}}} \left(\frac{d_{\text{vsys}} d_{\text{vw}}}{d_{\text{vw}}} \right) + N_{\text{bat}} C_{i_{\text{bat}}} \left(\frac{d_{\text{vsys}} d_{\text{vw}}}{d_{\text{vw}}} \right) + S_{\text{ond}} C_{i_{\text{ond}}} m_{\text{ond}} \left(\frac{d_{\text{vsys}} d_{\text{vw}}}{d_{\text{vw}}} \right) \quad (\text{IV—17})$$

Avec d_{vw} , d_{vpv} , d_{vbat} , d_{vond} représentant respectivement les durées de vie du système éolien, du système photovoltaïque, du système de stockage et de l'onduleur. En général, la durée de vie des générateurs éoliens et photovoltaïques est similaire à celle du système, ce qui implique un coût de remplacement pratiquement nul. Ainsi, le coût total pour toute la durée de fonctionnement est déterminé par :

$$C_g = C_i + C_m + C_r \quad (\text{IV—18})$$

IV. 7 Présentation du logiciel HOMER Pro

HOMER Pro est un logiciel spécialement conçu pour les systèmes de production d'énergie à petite échelle, il utilisable pour la simulation les l'analyses des données sur les déférentes sur source énergétique [68].

IV. 7. 1 Utilisation générale de HOMER Pro

HOMER Pro est un logiciel convivial dont l'interface est similaire à celle des logiciels courants (voir Figure 56). L'interface d'HOMER peut être divisée en trois parties principales :

L'interface de logiciel et les équipements et les ressources.

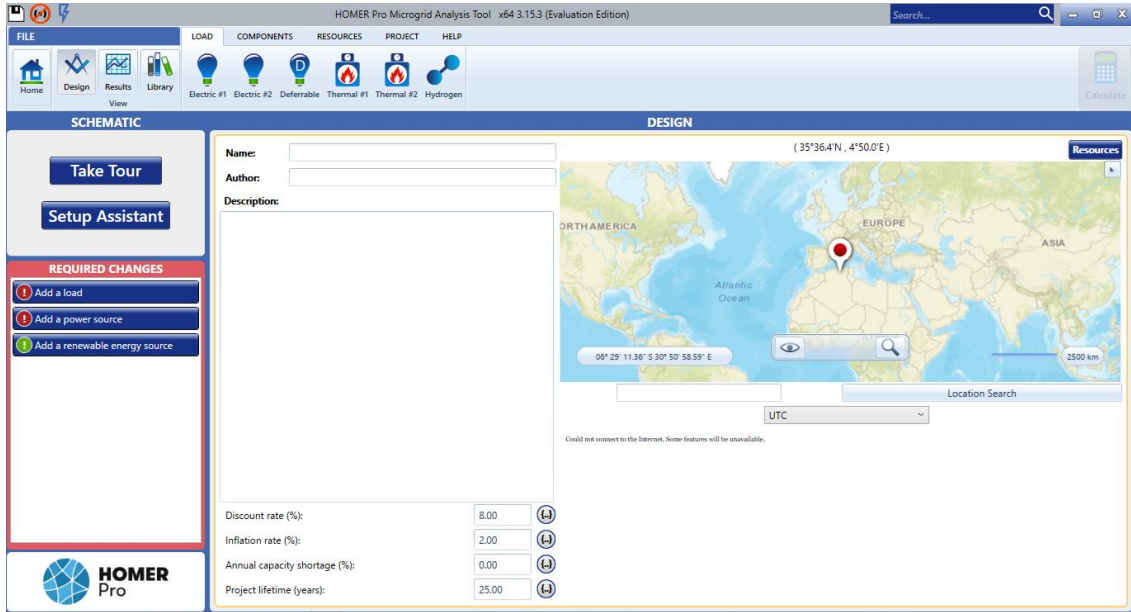


Figure 48 : L'interface de logiciel HOMER Pro.

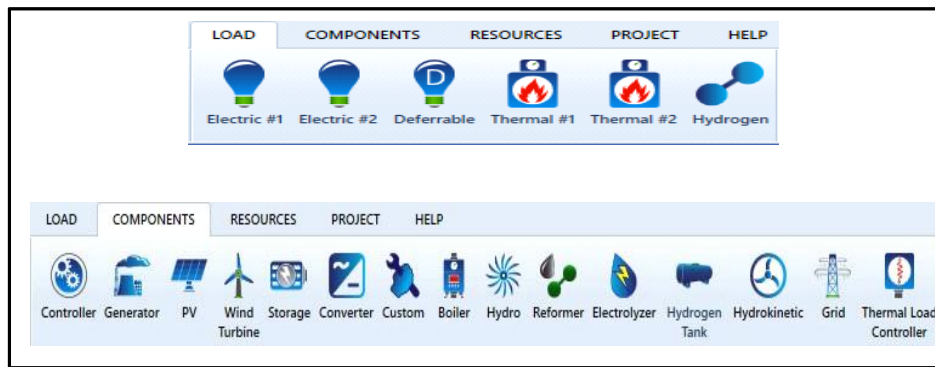


Figure 49 : Les équipements.



Figure 50 : Le schéma de système et les ressources.

IV. 8 Évaluation des ressources en énergies renouvelables et demande de charge.

Les données météorologiques pour la wilaya d'Adrar ont été extraites de la base de données de la NASA. Ces données comprennent la température moyenne mensuelle de l'air sur une période de 30 ans, allant de janvier 1984 à décembre 2013, ainsi que la vitesse moyenne mensuelle du vent à une hauteur de 50 mètres au-dessus de la surface terrestre sur la même période. En outre, les données sur le rayonnement solaire, ont été obtenues à partir de la base de données du laboratoire national des énergies renouvelables

Le tableau 3 présente les données météorologiques pour la wilaya. La moyenne annuelle du rayonnement quotidien, de la vitesse du vent et de la température est de 5,81 kWh/m² /jour, 6,37 m/s, et 25,23 ° C respectivement.

Tableau 3 : Données météorologiques pour la wilaya d'Adrar.

Mois	Clarté index	Rayonnement quotidien (kWh/m ²)	Température ° C	Vitesse du vent (m/s)
Janvier	0.656	4.108	12.160	6.190
Février	0.678	5.047	15.130	6.380
Mars	0.670	6.013	19.880	6.620
Avril	0.676	6.968	24.780	6.720
Mai	0.666	7.386	29.600	6.560
Juin	0.649	7.364	34.940	6.310
Juillet	0.624	6.984	37.510	6.800
Aout	0.632	6.667	36.690	6.800
Septembre	0.661	6.215	32.880	6.100
Octobre	0.637	5.020	26.480	5.970
Novembre	0.644	4.193	18.920	5.930
Décembre	0.643	3.779	13.560	6.070



Figure 51 : Irradiation solaire pour la zone étudiée.



Figure 52 : Profil de température ambiante annuelle.

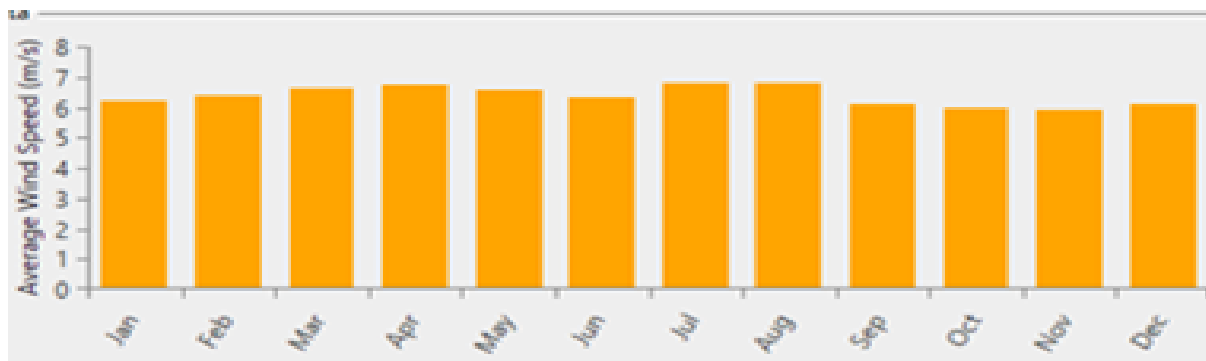


Figure 53 : Profil de la vitesse de vent annuelle.

IV. 8. 1 Estimation de la charge

La wilaya d'Adrar connaît une consommation électrique très élevée, notamment pendant la période estivale. Pour répondre à cette demande croissante, nous avons décidé de renforcer la production électrique traditionnelle en utilisant des turbines à gaz fournies par Sonelgaz. De

plus, cette région est réputée pour ses vastes gisements d'énergie éolienne et solaire, en particulier dans le domaine de la production photovoltaïque. Ainsi, nous avons également investi dans les énergies renouvelables pour diversifier notre mix énergétique et répondre aux besoins en électricité de manière plus durable. La charge de pointe et la demande moyenne annuelle de l'école sont respectivement de 602.08 kW et 14450.00 kWh/jour, avec un facteur de charge 37 et un peak de 1628.1 kW.

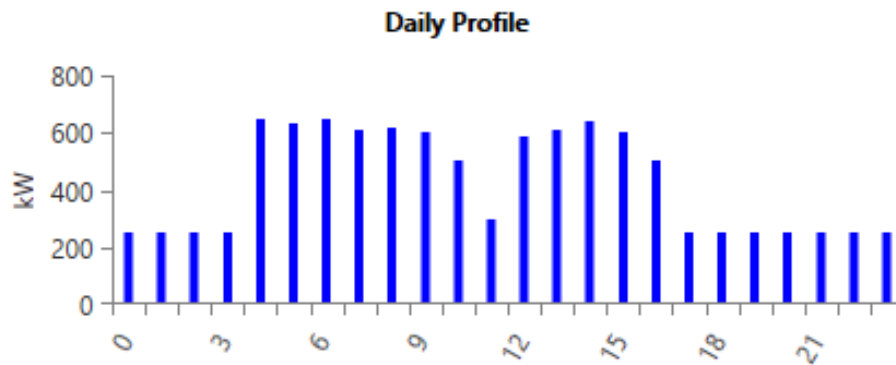


Figure 54 : Profil de charge horaire.

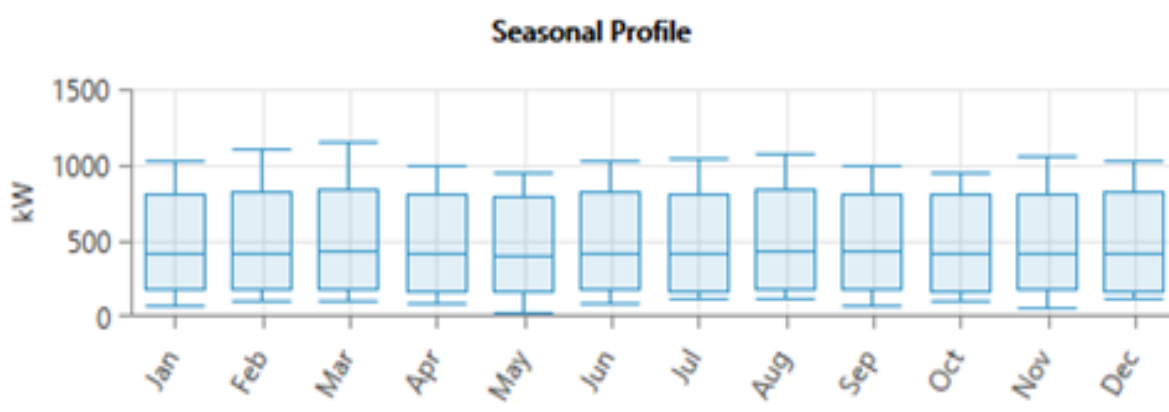


Figure 55 : Profil de charge mensuel.

Tableau 4 : Profil de charge horaire

Heure	Charge (kW)
0	250.000
1	250.000
2	250.000
3	250.000
4	650.000
5	630.000
6	650.000
7	610.000
8	620.000
9	600.000
10	500.000
11	300.000
12	590.000
13	610.000
14	640.000
15	600.000
16	500.000
17	250.000
18	250.000
19	250.000
20	250.000
21	250.000
22	250.000
23	250.000

IV.9 Conception du système

La première étape de l'enquête consiste à évaluer les ressources en énergies renouvelables. Ensuite, la deuxième étape consiste à estimer la charge électrique de la zone industrielle. Après cela, en utilisant plusieurs paramètres d'entrée et les sources d'énergie renouvelable disponibles, nous avons utilisé le logiciel HOMER pour déterminer le mix énergétique et d'autres résultats financiers. La méthodologie globale de l'étude de pré faisabilité du mix énergétique de la zone industrielle est illustrée dans la figure 3.

La conception a été créée dans le logiciel HOMER pro × 64.3.15.3 en prenant en compte les conditions locales, les paramètres de coût, les ressources énergétiques et d'autres paramètres

de simulation importants. L'optimisation dans HOMER a été simulée pendant un an en utilisant des pas horaires afin de répondre à la demande d'électricité avec le NPC (coût net actualisé) le plus bas possible. Plusieurs combinaisons du réseau électrique, de l'énergie solaire photovoltaïque, de l'énergie éolienne, du convertisseur et de la batterie ont été proposées. Par conséquent, six combinaisons, définies comme les scénarios 1 à 6, ont été simulées comme le montre la figure.

- Les Architecteurs des systèmes hybrides.

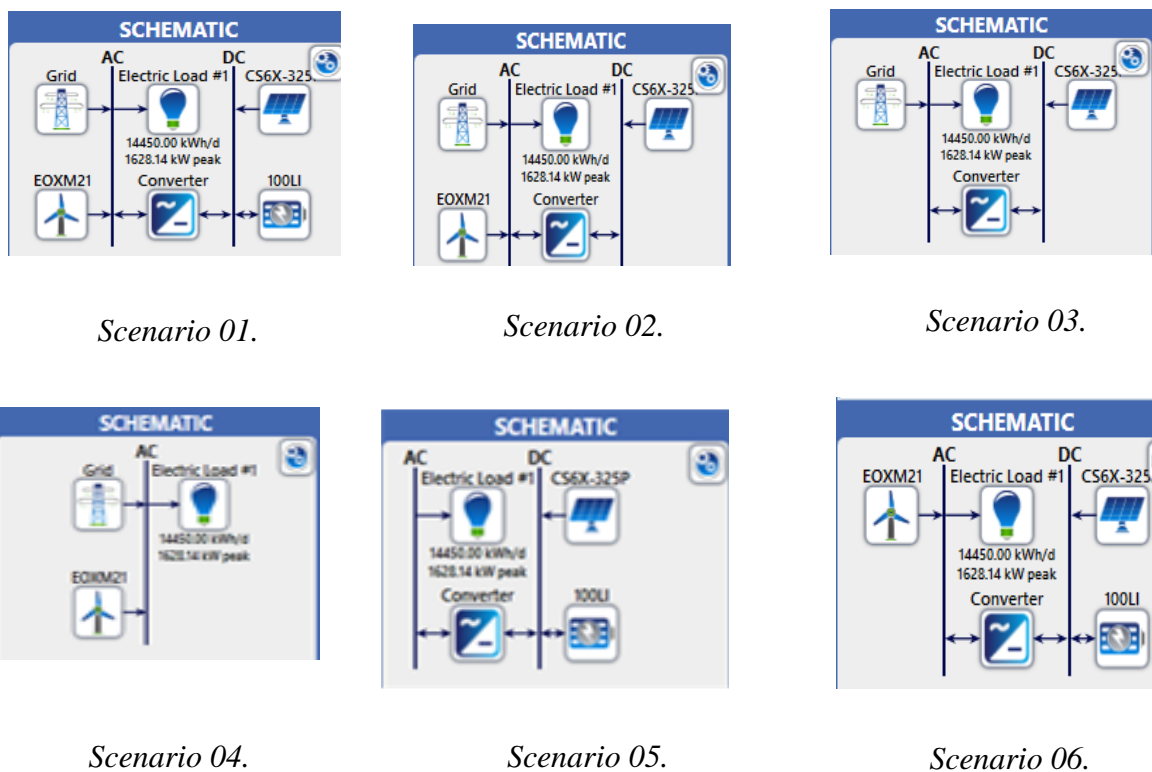


Figure 56 : Schémas pour six scénarios.

IV. 10 Composants du modèle

IV. 10. 1 Électricité du réseau

Le prix d'un kilowattheure d'électricité c'est 0.039 dollar

IV. 10. 1. 1 PV solaire

Cette étude a opté pour un panneau solaire polycristallin de la marque "Canadian Solar Max Power CS6X-325P". Le coût de ce panneau solaire s'élève à environ 324,00 \$ par kilowatt. Étant donné que la technologie solaire photovoltaïque n'a pas encore atteint sa pleine maturité,

on estime qu'à l'avenir, après avoir bénéficié d'une production industrielle locale ou nationale optimale, son coût de remplacement devrait probablement diminuer.

Pour ce panneau solaire, le coût d'exploitation et de maintenance a été évalué à 11,00 \$ par kW et par an. Sa durée de vie estimée est de 25 ans, avec une capacité nominale de 1800 kW et efficacité évaluée à 16,94%.

IV. 10. 1. 2 Eolienne

L'éolienne utilisée est l'Eocycle EOX M-21 [100 kW], dont le prix s'élève à 80 000,00 \$. Les coûts de remplacement, ainsi que les coûts annuels d'exploitation et de maintenance, sont respectivement estimés à 70 000,00 \$ et 16 000,00 \$. La hauteur du moyeu atteint 32 mètres, et la durée de vie prévue pour cette éolienne est de 30 ans.

IV. 10. 1. 3 Convertisseur de systèmes

Les coûts d'investissement, de remplacement et d'exploitation et de maintenance du convertisseur du système pendant toute la durée de vie du projet ont été estimés à 5.000.00\$, 5.000.00 \$ et 100,00 \$ respectivement

IV. 10. 1. 4 Batterie et stockage

Les coûts d'investissement, de remplacement et d'exploitation et de maintenance de la batterie pendant toute la durée de vie du projet ont été estimés à 70.000.00\$, 70.000.00 \$ et 1.000,00 \$ respectivement.

La capacité estimée d'une batterie de lithium (generic 100 kWh Li-Ion) était 100 kWh. Le voltage nominal estime à 600 V, avec un maximal charge et décharge a 167 A et 500 A respectivement, et sa durée de vie estime est de 15 ans.

Tableau 5 : Des caractéristiques pour PV, éolienne, batterie et convertisseur.

Composants du modèle	Le coût (\$)	Remplacement (\$)	O et M (\$/an)	Durée de vie (ans)
PV Solar "Canadian Solar Max Power CS6X-325P"	324.00	324.00	11.00	25
Eolienne l'Eocycle EOX M-21 [100 kW]	80 000,00	70 000,00	16 000,00	30

Convertisseur de systèmes	5.000.00	5.000.00	100,00	15
Batterie et stockage	70.000.00	70.000.00	1.000.00	15

IV. 10. 2 Résultats et discussion

Cette section présente les résultats des 6 scénarios des systèmes hybrides connectés et non connectés au réseau électrique (off grid, on grid) proposés par le biais d'une simulation dans HOMER Pro.

Mot clé utilisé :

- On grid : connecté au réseau électrique.
- Off grid : déconnecté au réseau électrique.
- PV 'CS6X-325P' : panneaux photovoltaïques.
- Wt 'EOXM21' : Wind turbine « turbine éolienne, l'énergie éolienne ».
- Btr : Batteries de stockage.
- Système Convertisseur.

Après la simulation on trouve des résultats comme suit :

- Pour le **premier** scénario : on grid + PV + Wt + Btr + système Convertisseur

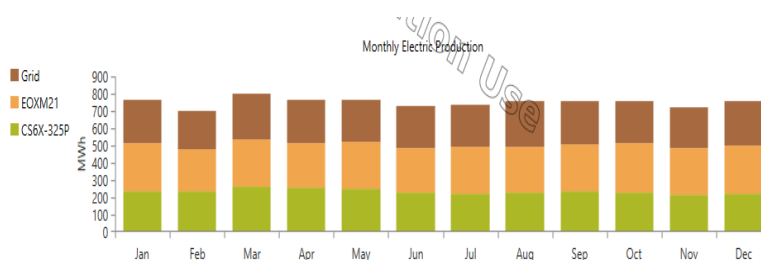


Figure 57 : La production d'électricité pour le 1-er scénario.

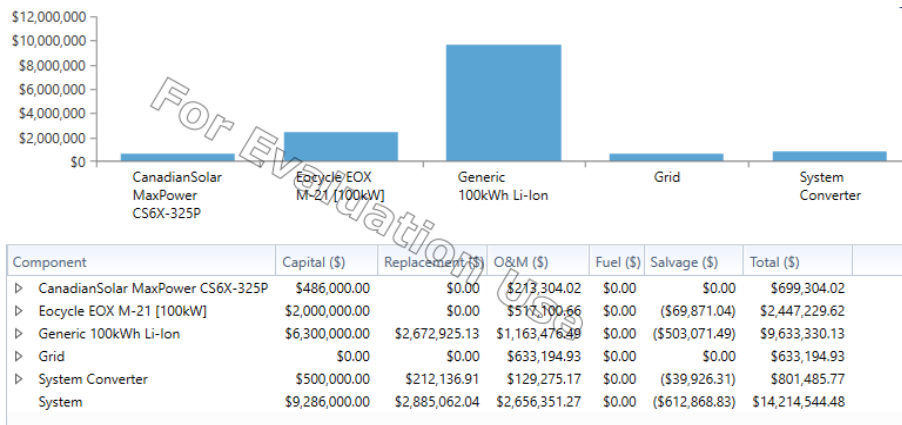


Figure 58 : le coût de chaque élément de système hybride.

- Le deuxième scénario : on grid + PV + Wt + système Converter.

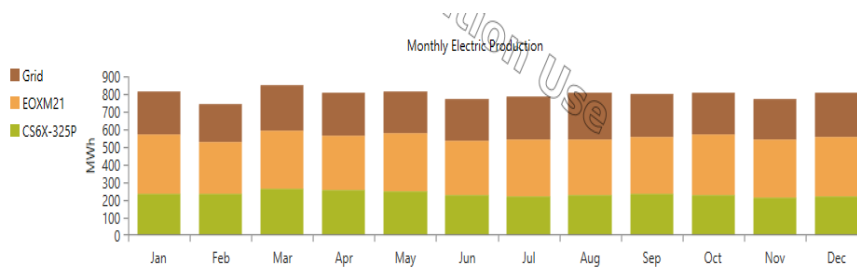


Figure 59 : La production d'électricité pour le 2 -ème scénario.

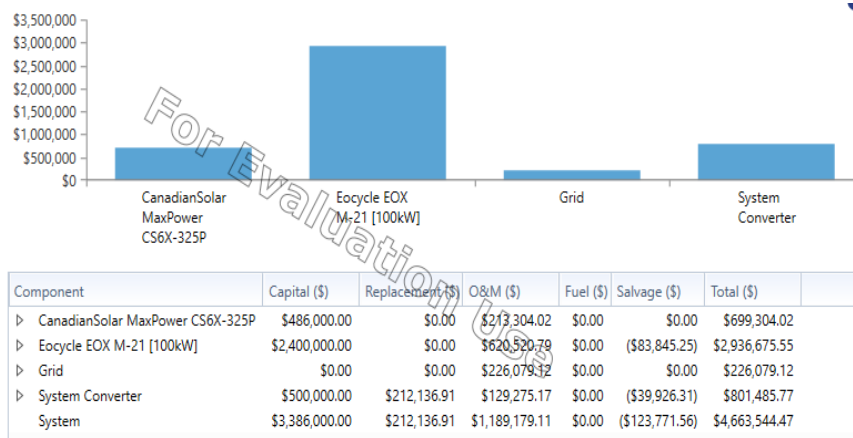


Figure 60 : le coût de chaque élément de 2 -ème scénario.

- Pour le 3 -ème scenario : on grid + PV+ système Converter.

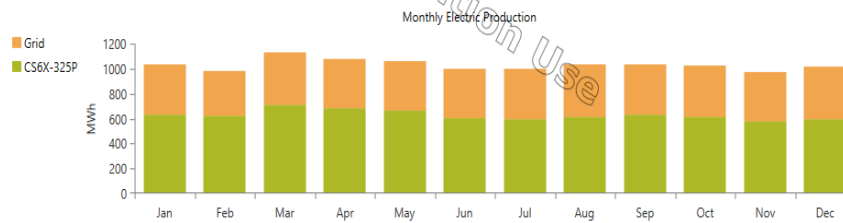


Figure 61 : La production électrique pour le 3 -ème scenario.

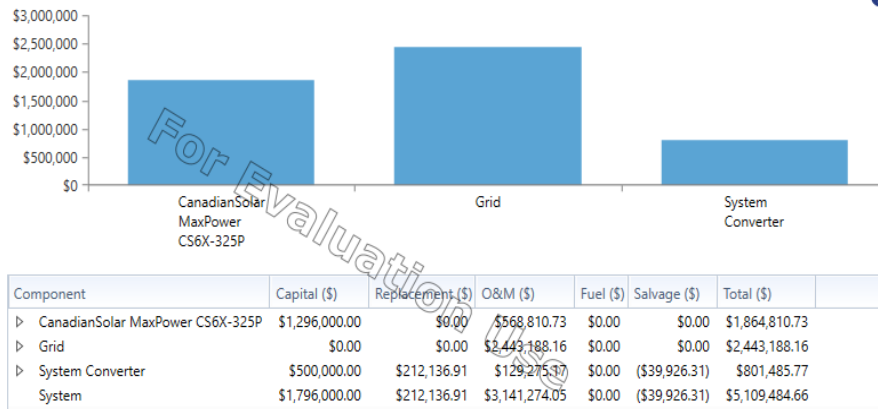


Figure 62 : le coût de chaque élément de 3 -ème scenario.

- Pour le 4 -ème scenario : on grid + Wt.

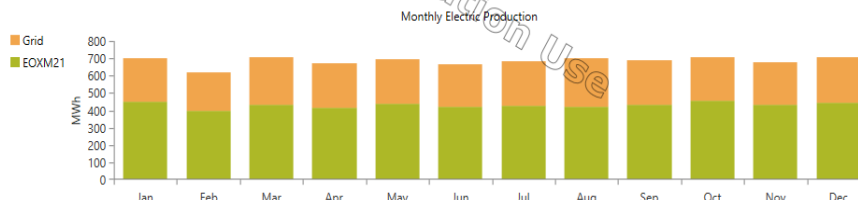


Figure 63 : La production électrique pour le 4 -ème scenario.

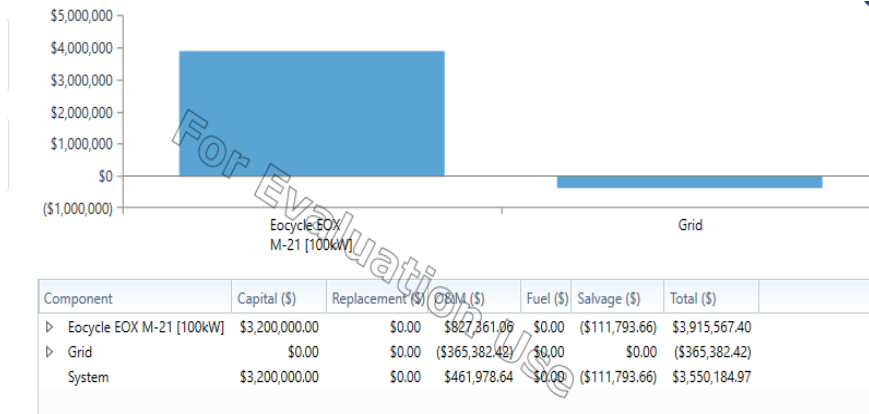


Figure 64 : le coût de chaque élément de 4 -ème scenario.

- Pour le 5 -ème scenario : on grid + PV + système Converter

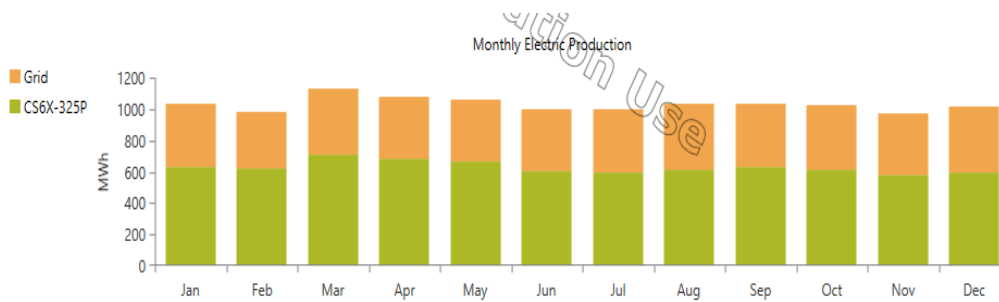


Figure 65 : La production électrique pour le 5 -ème scenario.

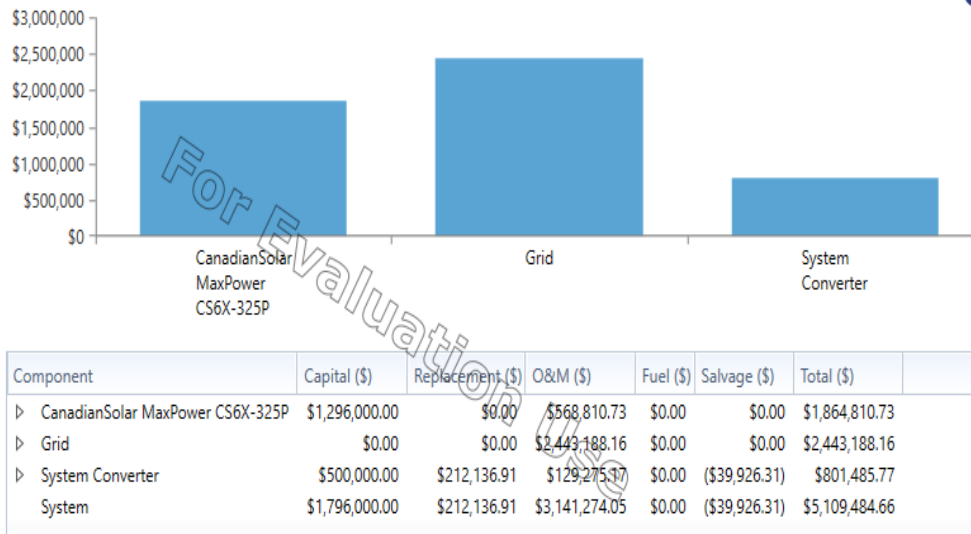


Figure 66: Le cout de chaque élément de 5 -ème scenario.

- Pour le **6 -ème** scenario : off grid + PV + Btr + système Converter.

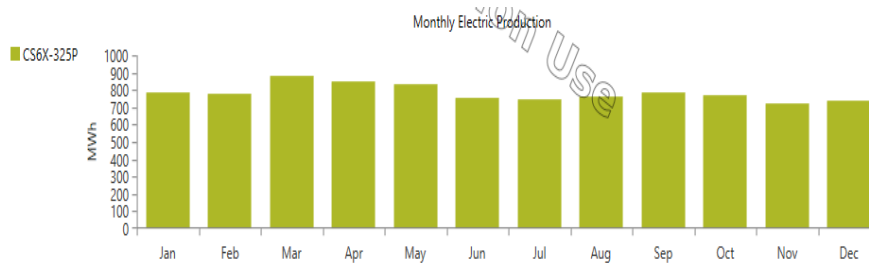


Figure 67 : La production électrique pour le 6 -ème scenario.

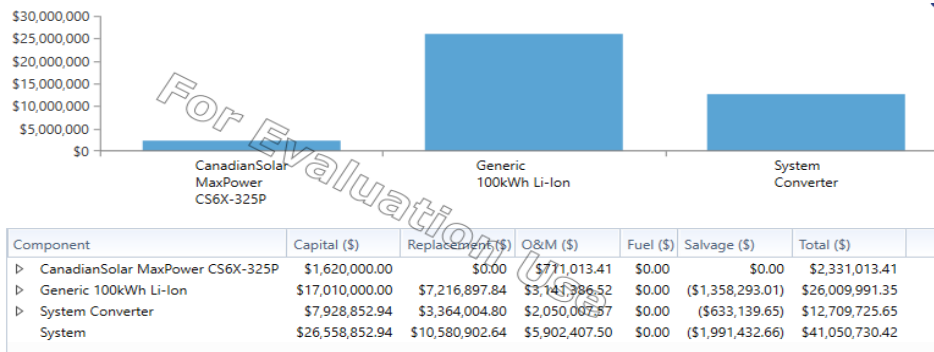


Figure 68 : Le de chaque élément de 6 -ème scenario.

Au sein du tableau 6 ci-dessous, nous présentons un résumé global des résultats simulés pour six scénarios différents.

Tableau 6 : Résultats techniques et économiques.

	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6
Résultats économiques						
Total NPC (\$)	14,214,540.00	4,663,544.00	5,109,484.00	3,550,185.00	41,050,730.42	37,252,520.42
LCOE (\$/kWh)	0.1666	0.05030	0.07494	0.03336	0.6022	0.5464
Capital initial (\$)	9,286,000.00	3,386,000.00	256,321.50	3,200,000.00	26,558,852.94	25,618,264.10
Opération cost (\$)	381,244.50	98,823.65	1,7969,000.00	27,088.34	1,121,010.00	899,960.90
Remplacement (\$)	2,885,062.04	212,136.91	0212,136.91	00.000	10,580,902.64	7,255,024.83
O Et M (\$)	2,656,351.27	1,189,179.11	3,141,274.05	461,978.64	5,902,407.50	6,024,187.55
Salvage (\$)	621,868.83	123,771.56	39,926.31	111,793.66	1,991,432.66	1,644,953.05
Fuel (\$)	00.000	00.000	00.000	00.000	00.000	00.000

**Résultats
techniques**

Production d'énergie (kWh/an)	9,004.402	9,575.958	12,371.036	8,231.755	9,406.381	15,922.037
Unmet électrique (kWh/an)	00.000	00.000	00.000	0.03336	1.014	462
Excès d'électricité (KWh/an)	2,381.852	2,382.767	7,074.282	3,200,000	3,569.927	10,217.282
Capacité de shortage	00.000	00.000	00.000	27,088.34	5.084	5.178

Dans notre étude, nous avons évalué différents scénarios en termes de production d'énergie afin de déterminer les meilleurs et les pires cas. Les scénarios avec une valeur élevée de production d'énergie ont été considérés comme les meilleurs, tandis que ceux présentant une charge électrique non satisfaite, un excès d'électricité ou une pénurie de capacité ont été considérés comme les pires.

Nous avons utilisé le NPC (Coût Net Actualisé) et la production d'énergie comme critères bénéfiques pour évaluer les scénarios. Les autres critères ont été considérés comme non bénéfiques.

Les résultats de notre étude indiquent que le scénario le plus approprié est le scénario 02-ème, qui présente un NPC de 4, 663,544.00 dollars, une production d'électricité de 9,575.958 kWh/an et un excès d'électricité de 2,382.767 kWh/an. Les scénarios 03-ème et 04-ème se classent ensuite dans l'ordre décroissant de pertinence.

Le scénario 02-ème est un système hybride composé d'un réseau électrique, système de convertir et d'un champ d'éoliennes et des panneaux solaires photovoltaïques sans unité de stockage. En revanche, le 05-ème scénario est le moins favorable, car il repose uniquement sur des panneaux solaires photovoltaïques sans unité de stockage et sans réseau électrique.

Dans le cas de **scenario 02-ème** le logiciel HOMER pro présente le résultat de simulation comme illustré dans les figures suivantes :

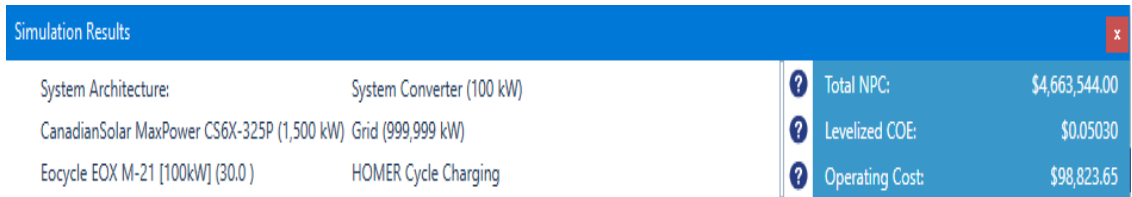


Figure 69 : Système architecture.

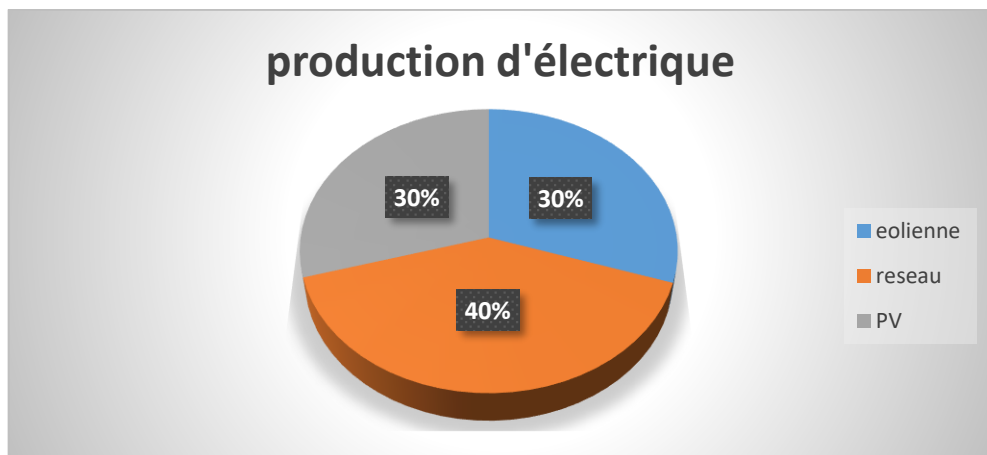


Figure 70 : La production annuelle d'énergie pour le système proposé.

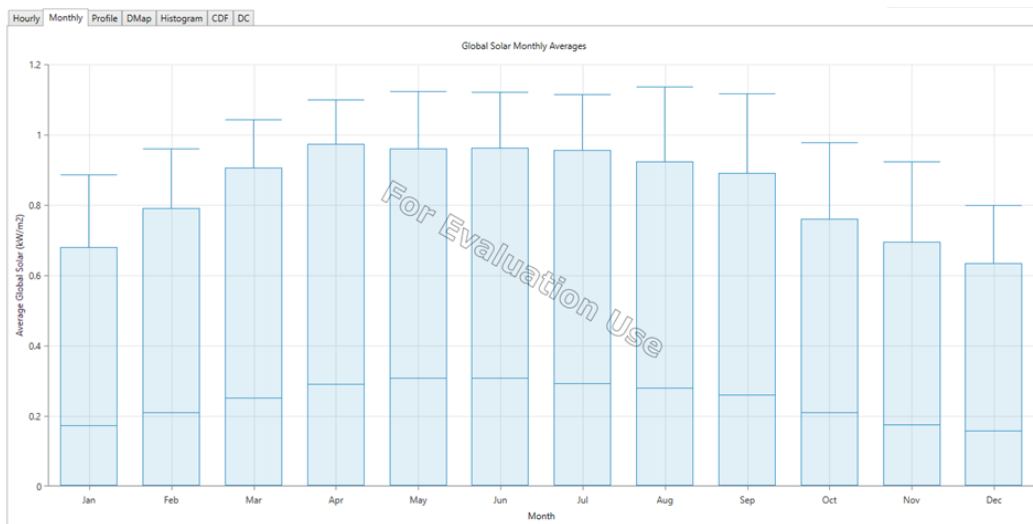


Figure 71 : Les moyennes mensuelles solaires d'Adrar.

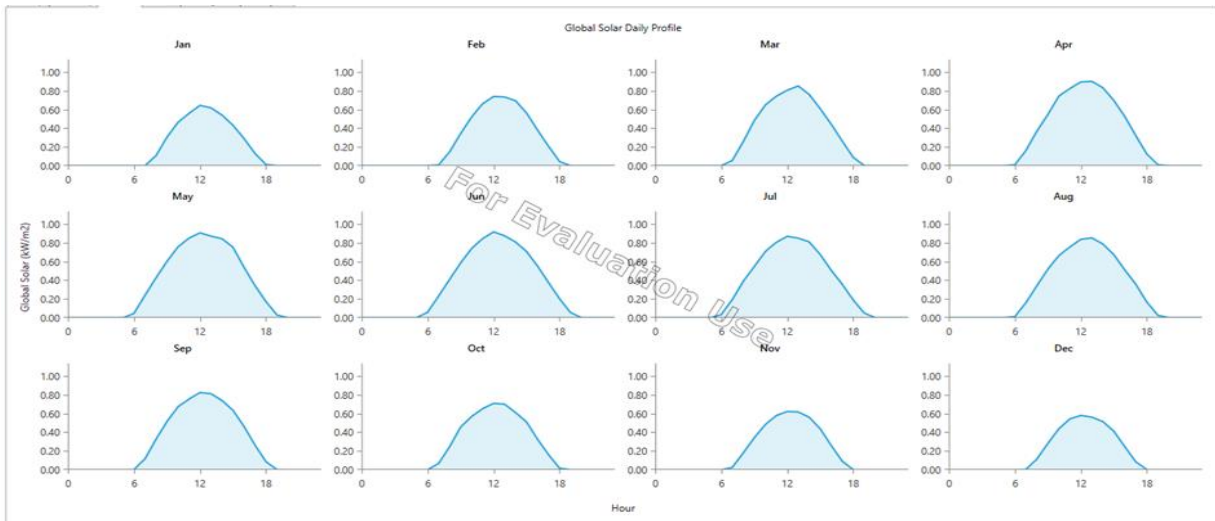


Figure 72 : Le profil quotidien solaire d'Adrar.

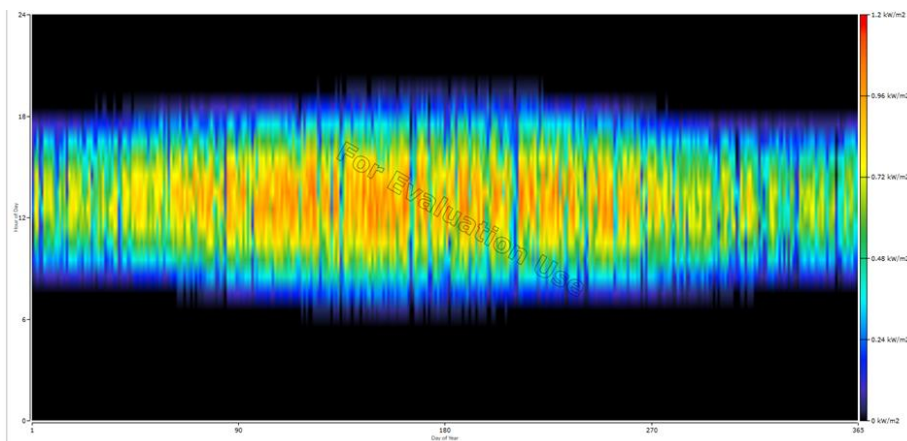


Figure 73 : Rendement quotidien de l'énergie solaire photovoltaïque.

Les résultats ont également été représentés sous forme de graphique, comme le montre les figures ci-dessous :

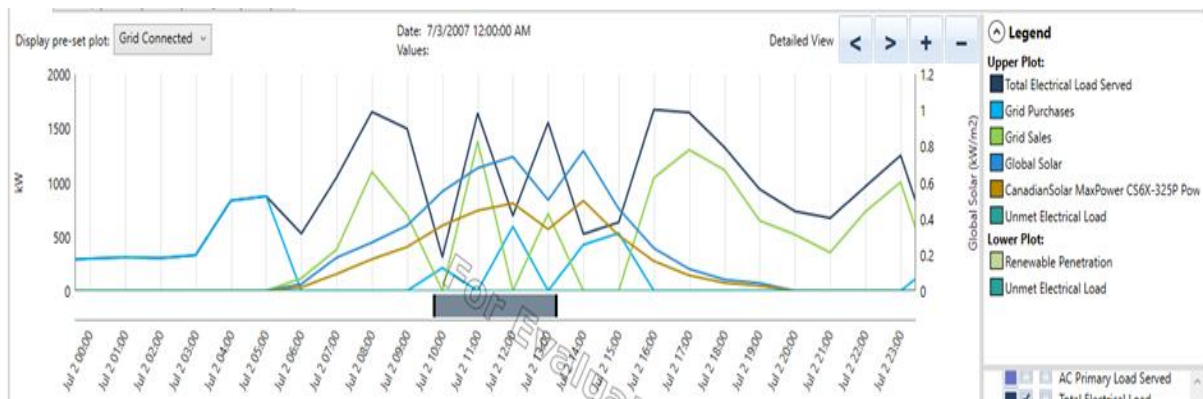


Figure 74 : Les résultants sous la forme graphique '1' (grid connected).

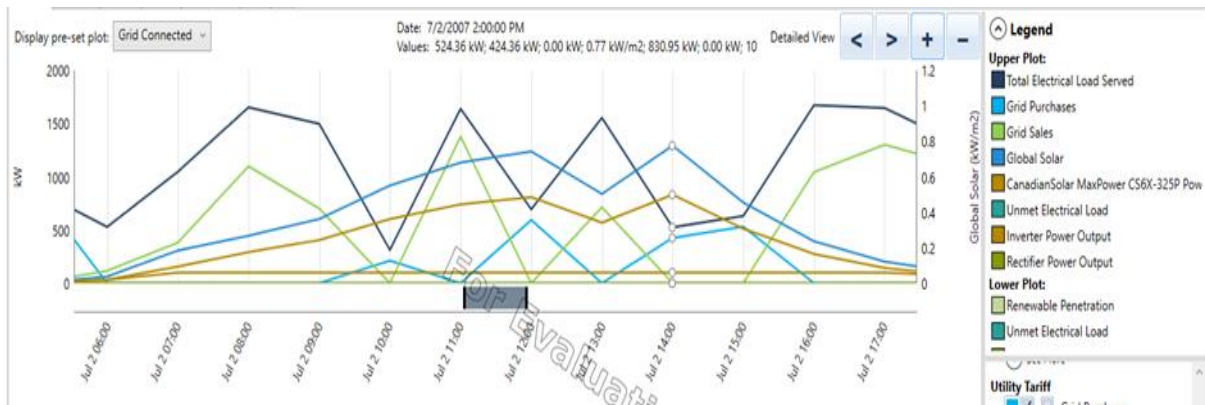


Figure 75 : Les résultats sous forme graphique '2' (Grid connected).

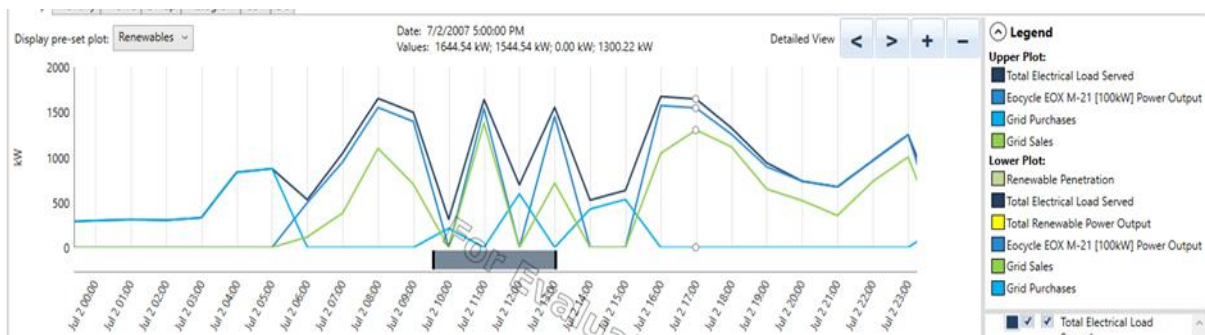


Figure 76 : Les résultats sous forme graphique '01' (renouvelables).

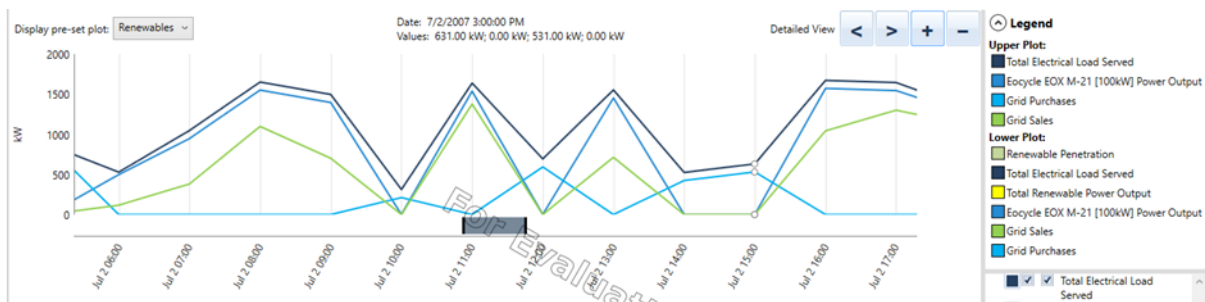


Figure 77 : Les résultats sous forme graphique '2' (renouvelables).

IV. 11 Perspectives

La dépendance excessive à l'égard du réseau national met la sécurité énergétique en danger, car il doit être modernisé et la capacité de production d'électricité doit être augmentée régulièrement.

IV. 12 Conclusion

Dans ce chapitre on a exploré six scénarios impliquant différentes combinaisons d'énergies hybrides avec le réseau électrique, en utilisant l'outil de modélisation HOMER Pro pour simuler chacun d'eux. Les résultats issus de ces simulations sur les systèmes hybrides ont été évalués sous deux angles : économique, technique. Ces données ont ensuite été analysées pour déterminer la combinaison la plus optimale. L'analyse a révélé que, parmi tous les scénarios envisagés, le scénario 2-ème (connecté au réseau) s'est avéré le plus viable. Celui-ci impliquait une combinaison du réseau électrique, de l'éolienne et de l'énergie solaire photovoltaïque, sans l'utilisation d'unités de stockage.

Conclusion générale

Nous avons entrepris cette étude dans la région d'Adrar, en Algérie, dans le but de concevoir un système de production d'électricité basé sur diverses sources d'énergie. Cette approche englobe à la fois les zones isolées de la région d'Adrar et les zones connectées au réseau électrique. Dans ces régions, les interruptions de courant et les problèmes de production électrique traditionnelle sont fréquents, en particulier pendant la saison estivale. Grâce à cette expérience, notre projet a abouti à une solution optimale pour résoudre divers problèmes, notamment sur le plan économique.

Sur le plan environnemental, nous avons développé une solution visant à réduire la consommation de carburant et les émissions de gaz polluants grâce à l'utilisation du logiciel de simulation HOMER®. Ce logiciel dispose d'une base de données permettant des prévisions très précises. Notre système hybride se compose de panneaux solaires photovoltaïques (PV) et d'une source d'énergie (E), sans batteries de stockage, connecté au réseau, et adapté aux conditions climatiques de la région d'Adrar. Cette configuration a permis d'obtenir une efficacité de production énergétique élevée ainsi qu'une grande fiabilité économique pour le système.

Les principales conclusions découlant de cette étude sont les suivantes :

1. Pour le meilleur scénario on a le scénario 2 -ème c'est un système hybride connecté au réseau, Les scénarios 03 -ème et 04 -ème se classent ensuite dans l'ordre décroissant de pertinence.

2. Le coût d'exploitation du scénario 5 -ème (non connecté au réseau) s'est avéré élevé en raison de la faible durée de vie des batteries, ce qui a entraîné la nécessité de les remplacer fréquemment. Par conséquent, cette option n'était pas économiquement viable, d'autant plus qu'elle impliquait l'utilisation d'un grand nombre de batteries coûteuses.

3. Le raccordement au réseau électrique est une mesure préventive en cas de coupure de courant ou de panne du système hybride, tout en contribuant à réduire les coûts économiques de l'installation.

4. L'intégration de batteries a entraîné une augmentation des coûts totaux normalisés (NPC) dans les scénarios 1 -er (scénario connecté), 5 -ème et 6 -ème (sont des systèmes

Conclusion générale

hybrides non connecté) en raison du coût élevé de ces batteries, rendant ces scénarios économiquement non viables.

5. Nous anticipons que notre système produira une quantité d'énergie excédentaire par rapport à la demande. Cette énergie excédentaire pourrait être injectée dans le réseau, mais cela nécessiterait la mise en place d'une méthode de facturation appelée facturation nette, qui n'est pas encore en vigueur en Algérie

Annexes

Memoire_Kerfouf_5

ORIGINALITY REPORT

25%	24%	2%	3%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	dspace.univ-adrar.edu.dz Internet Source	2%
2	www.ummtto.dz Internet Source	1%
3	dspace.univ-medea.dz Internet Source	1%
4	pdfcoffee.com Internet Source	1%
5	tel.archives-ouvertes.fr Internet Source	1%
6	www.cder.dz Internet Source	1%
7	docplayer.fr Internet Source	1%
8	archive.org Internet Source	<1%
9	www.scribd.com Internet Source	<1%

10	dspace.univ-eloued.dz Internet Source	<1 %
11	www.ifpenergiesnouvelles.fr Internet Source	<1 %
12	Submitted to University of Sousse Student Paper	<1 %
13	di.univ-blida.dz Internet Source	<1 %
14	elmoukrie.com Internet Source	<1 %
15	www.univ-bejaia.dz Internet Source	<1 %
16	nanopdf.com Internet Source	<1 %
17	doczz.net Internet Source	<1 %
18	fr.wikipedia.org Internet Source	<1 %
19	dspace.univ-usto.dz Internet Source	<1 %
20	fr.slideshare.net Internet Source	<1 %
21	bib.univ-oeb.dz:8080 Internet Source	<1 %

Références

- [1] Enerfip, lexique ‘ressource énergétique primaire’.
- [2] Ministère des Affaires étrangères et du Commerce international. "Action 2000 : Stratégie de développement durable du Ministère des Affaires étrangères et du Commerce international." Canada, 1997.
- [3] ‘Les 4 sources d’énergies non renouvelables’, Europe énergie ,04/08/202.
- [4] Patrick De Wever et François Baudin, Du vert au noir : le charbon, EDP Sciences, 2015, 80p.
- [5] ‘Charbon ressources, réserves et production’, International Atomic Energy Agency, panorama, 2008.
- [6] Canadian Association of Petroleum Producers, ‘INTRODUCTION AU GAZ NATUREL.’ CAPP.CA. 2018-0035. JUIN 2018.
- [7] Article ‘Gaz associés au Pétrole’, source Clarke Energy.
- [8] Article ‘Méthane de gaz de charbon’, source Clarke Energy.
- [9] Article ‘Le gaz de schiste’, Résumé et commentaires de membres du Conseil Français de l’Energie, Novembre2010,
- [10] « Pétrole », le Dictionnaire de l'Académie française, 9e édition (actuelle)
- [11] <https://energie-nucleaire.net>
- [12] Ministre de la transition écologique et la cohésion des territoires et ministre de la transition énergétique française ‘Les énergies renouvelables’ Le Mardi 20 septembre 2022.
- [13] ABI HAFIDHA et BIBI YAMINA. "Simulation et Optimisation des performances d’un système hybride intégrant des Energies renouvelables pour la génération d’Electricité." Diplôme de Master en Génie Mécanique, 09/06/2016.
- [14] Les énergies hydrauliques, mission énergie, source fondation good planet.
- [15] LES ÉNERGIES RENOUVELABLES, Roger Cadiergues, (Guide RefCad : nR09.a), XPAIR.COM
- [16] , L’hydrogène, un vecteur d’énergie, Conception : MAYA Press - Réalisation : Grégory KLOTZ, Photo Disc - Illustrations : Yuvanoé, Calathéa Avec la collaboration de François Saint-Jalm, professeur de physique-chimie – 2013

Références

- [17] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_Windenergieanlage.png
- [18] "La cellule photovoltaïque." Document technique, Centre de recherche de Développement De l'ECAM.
- [19] Total energy supply (TES) » en anglais. La consommation d'énergie de la Chine s'est élevée à 142,5 EJ en 2019 (en incluant Hong Kong) et celle des États-Unis à 92,6 EJ.
- [20] Article 'pourquoi la consommation des énergies augmente dans le monde ? ', la source : sirenergies.com.
- [21] Article 'Quels sont les pays consommant le plus d'énergie par habitant ?', revue connaissance des énergies, 01 octobre 2021.
- [22] Le rapport de l'agence internationale d'énergie (AIE), 'Statistics report Key World Energy Statistics 2021 '.
- [23] Le rapport 'BP Statistical Review of World Energy 2021'
- [24] Le rapporte d'IRENA, 'Renewable capacity staticstics 2023.'
- [25] Le rapporte 'Global Electricity Mid-Year Insights, Ember, 5 octobre 2022.'
- [26] Le rapport 'RENEWABLE POWER GENERATION COSTS IN 2021', Irena 13 juillet 2022.
- [27] N. La verdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [28] MIRECKI, Adam. "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance." Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [29] Rapport 'Global Word rapport 2022', GWEC avril 2022.
- [30] AIDOUN, A. et BOURAHLA, A. "Optimisation d'un système hybride photovoltaïque/éolienne pour l'électrification d'un site isolé.», Diplômé de Master en Génie Électrique.
- [31] <https://www.asjp.cerist.dz>,
- [32] Aminata, S. "Simulation du système hybride Photovoltaïque." Thèse de doctorat, Canada, 1998.
- [33] Kassmi, K., Hamdaoui, M., & Olivie, F. "Conception et modélisation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT analogique." Revue des énergies renouvelables, Université de Maroc, pp. 451-462, 2007.

Références

- [34] N. Chandrasekaran, K. Thyagarajah "Modeling and Matlab simulation of pumping system using pmc motor powered by solar system ", European Journal of Scientific Research, pp 6-13,2011.
- [35] Kempe M.D. "Control of Moisture Ingress into Photovoltaic Modules". 31 st IEEE Photovoltaic Specialists Conference and Exhibition, Lake Buena Vista, Florida, January 3–7, 2005.
- [36] Skoczek A., Sample T., Dunlop E.D., Ossenbrink H.A. "Electrical performance results from physical stress testing of comercial PV modules to the IEC61215 test sequence". Solar Energy Materials & Solar Cells, 92, 1593–1604, 2008.
- [37] Anne Labouret, Michel Villon, « Energie solaire PV », 3eme Edition Dunod ,2007
- [38] B. Flèche - D. Delagnes 'Energie solaire photovoltaïque.doc', juin 2007
- [39] M.belhad ' Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome', mémoire de magister université de bachar ,2008.
- [40] GUEDAOURIA H., ' Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour Alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar ', Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar, 2017.
- [41] GOAR Nouredine, MAHMOUDI Abdelkader, ' Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque ', Mémoire de Master, Université Larbi Ben M'Hidi – Oum El Bouaghi, Juin 2017.
- [42] Ricaud A., ' Systèmes photovoltaïques ', Mémoire de Master, Ecole d'ingénieurs 'Polytech' Savoie', octobre 2011.
- [43] V. Boitier, P. Maussion, C. CABAL, "Recherche du maximum de puissance sur les Générateurs photovoltaïques", université de Toulouse, revue 3^E.I, N°54, pp 90-96, Septembre 2008.
- [44] Ababacar THIAM 'Cours Capteurs solaires photovoltaïques'. université d'Alioune DIOP Bambey, Faculté SATIC, Durée: 20 Heures, mardi 6 janvier 2015, Maître Assistant
- [45] Kojima T., Yanagisawa T. "The evaluation of accelerated test for degradation a stacked a- Si solar cell and EVA films". Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 81, N°. 1, 119-123, 2004.
- [46] S. PETIBON ' Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversionde l'énergie pour les applications photovoltaïques', université de Toulouse, 2009.
- [47] L. ABBASSEN ' Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque' Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2011.

Références

- [48] A. T. SINGO ‘ Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome’ Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [49] HELALI KAMELIA, Modélisation D’une Cellule Photovoltaïque, Etude Comparative, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Thèse de Magister 2012.
- [50] « Production d’énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ». B. Flèche - D. Delagnes / juin 07 Approche générale.
- [51] LAHOUEL Asma, ‘ Influence de la température sur les caractéristiques d’une cellule solaire à base d’InGaN ‘, Mémoire de Master, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2016.
- [52] Cours des semi-conducteurs ; le semi-conducteur ; chapitre 1 : les semi-conducteurs, technique de l’ingénieur.
- [53] Ludmil STOYANOV « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d’énergie renouvelables » thèse de Doctorat de l’université technique de SOFIA, octobre 2011.
- [54] Benchiha Abdessamed, Elhacen Ould Abdallahie, » Evaluation de la fiabilité d’un système de production hybride (éolienne- solaire) », Mémoire de Master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda ,2012/2013.
- [55] Abdoul Karim TRAORÉ « Gestion d’un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles » mémoire de fin d’étude, université de Québec, juillet 2016
- [56] Menad DAHMANE « Gestion, optimisation et conversion des énergies pour habitat autonome » thèse de Doctorat de l’université Jules Verne de Picardie, Novembre 2013.
- [57] D. Abbes, “Contribution au dimensionnement et à l’optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l’habitat résidentiel autonome “, Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [58] I. Vechiu, “modélisation et analyse de l’intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome “ Thèse Doctorat, Université du Havre, 2005.
- [59] L. Croci, “Gestion de l’Energie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs “, Thèse Doctorat, Université de Poitiers, 2013
- [60] A. Maleki and F. Pourfayaz, 'Optimal Sizing of Autonomous Hybrid Photovoltaic/Wind/Battery Power System with LPSP Technology by Using Evolutionary Algorithms',2015.
- [61] S. khenfou, A. Kaabeche et S. Diaf "Optimisation du dimensionnement d’un système hybridephotovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques".

Références

- [62] A. Kaabeche, M. Belhamel, R. Ibtouen, S. Moussa et M.R. Benhaddadi, 'Optimisation d'un Système Hybride (Eolien – Photovoltaïque) Totalement Autonome', 2006.
- [63] Hadadji, Abd-elhafidh et Lebouazid, Idriss. "Etude Technico-Economique d'une centrale Photovoltaïque connectée au réseau du URER/MS." Master en Physique.
- [64] A. Kaabeche, M. Belhamel and R. Ibtouen, 'Optimal Sizing Method for Stand-Alone Hybrid PV/Wind Power Generation System', Revue des Energies Renouvelables SMEE'10, Bou-Ismaïl, Tipaza, pp. 205 – 213, 2010.
- [65] A. Rajendra and E. Natarjan, 'Optimization of Integrated Photovoltaic-Wind Power Generation Systems with Battery Storage', Energy, Vol. 31, N°12, pp. 1943 – 1954, 2006.
- [66] S. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi and A. Louche, 'Technical and Economic Asservissement of Hybrid Photovoltaic-Wind System with Battery Storage in Corsica Island', Energy Policy, Vol. 36, N°2, pp. 743 – 754, 2008.
- [67] AMMARI Chouaib : Modélisation, simulation et optimisation d'un system hybride autonome en trois sources, Thèse de Doctorat en physique énergétique, Université Ahmed Draia Adrar, Faculté ST, Département d'hydrocarbures et énergies renouvelables.