

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila

Institut des Sciences et de Technologie

Département de Sciences et Techniques



Mémoire

Pour obtenir le diplôme de mater

Spécialité : Electromécanique

Réalisé par :

- BOULAICHE CHAHINAZ

-THEME-

**Optimisation et Gestion d'un système hybride éolien
photovoltaïques avec le stockage par batterie pour un
production énergétique durable.**

Soutenu le : 30/6/2025 devant le jury :

Mr. B.Mehimmedetsi

Encadrant

Mr. B. Keghouche

Président

Ms. S. Bouchekouf

Examineur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

*Louange à Allah, Seigneur des mondes,
C'est grâce à Sa bonté et Sa compassion que j'ai pu surmonter
cette phase cruciale de mon parcours universitaire.*

***À mes précieux parents,** Qui ont toujours été pour moi une
source d'exemple en termes de courage, de patience et
d'affection, Je consacre avec humilité ce travail à votre
attention, reconnaissant vos sacrifices et votre soutien sans
faillle.*

À mon âme Mouâd

Mon petit cœur Amdjed

***Mes sœurs et mes frères** Pour leur présence apaisante et
leurs soutiens continus*

Mes amis mes collègues

***À mon encadreur** , que Dieu le récompense pour sa
patience, ses conseils et son soutien constant qui m'ont été
d'une grande aide à chaque étape.*

***Et mes professeurs,** Pour leur soutien, leurs
recommandations et leur présence constante.*

Résumer :

L'objectif de ce travail est d'étudier et d'optimiser un système hybride combinant l'énergie solaire et l'énergie éolienne et un système de stockage par batterie dans le but de garantir une production d'électricité stable et durable.

Dans ce contexte, les éléments du système ont été représentés et simulés à l'aide de MATLAB, en se concentrant sur l'élaboration d'une stratégie astucieuse de gestion énergétique destinée à maintenir l'équilibre entre production, consommation et stockage.

Les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité du système hybride suggéré en augmentant la dépendance aux énergies renouvelables et diminuant les coupures, faisant de cette solution une alternative prometteuse pour l'approvisionnement des régions éloignées et la pérennité des fournitures énergétiques.

Abstract:

The objective of this work is to study and optimize a hybrid system combining solar and wind energy and a battery storage system, with the aim of guaranteeing stable and sustainable electricity production.

In this context, the elements of the system were represented and simulated using MATLAB, focusing on the development of a clever energy management strategy designed to maintain the balance between production, consumption and storage.

The results obtained proved the effectiveness of the suggested hybrid system in increasing reliance on renewable energies and reducing blackouts, making this solution a promising alternative for supplying remote regions and ensuring the sustainability of energy supplies.

ملخص:

الهدف من هذا العمل هو دراسة وتحسين نظام هجين يجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الرياح ونظام تخزين البطاريات من أجل ضمان إنتاج مستقر ومستدام للكهرباء.

في هذا السياق، تم تمثيل عناصر النظام ومحاكاتها باستخدام MATLAB، مع التركيز على تطوير استراتيجية ذكية لإدارة الطاقة مصممة للحفاظ على التوازن بين الإنتاج والاستهلاك والتخزين. وأثبتت النتائج التي تم الحصول عليها فعالية النظام الهجين المقترح في زيادة الاعتماد على الطاقة المتجددة والحد من انقطاع التيار الكهربائي، مما يجعل هذا الحل بديلاً واعداً لتزويد المناطق النائية بالطاقة وضمان استدامة إمدادات الطاقة

Table de matière :

Table de matière :	IV
Liste de figures :	VIII
Liste de tableau :	IX
Liste abréviations et symboles	X
Introduction Générale :	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies Renouvelables : Éolienne et solaire	4
1.1. Introduction :	5
1.2. Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie :	5
1.3. L'énergie éolienne :	6
1.3.1. Définition :	6
1.3.2. La technologie éolienne pour produire de l'électricité :	6
1.3.3. Principe de la conversion de l'énergie éolienne :	7
1.3.4. Classification des éoliennes :	7
1.3.5. Le vent :	9
1.3.6. Le vent en Algérie :	9
1.3.7. La puissance fournie par un aérogénérateur :	10
1.3.8. La puissance moyenne fournie par une éolienne -courbe de puissance :	13
1.3.9. Les Différents Types de génératrices électriques pour l'éolienne : ..	14
1.4. L'énergie Photovoltaïque :	16
1.4.1. Définition :	16
1.4.2. Rayonnement solaire.....	16
1.4.3. Rayonnement solaire en Algérie :	17
1.4.4. Les différents types de rayonnement solaire :	18
1.4.5. Cellules photovoltaïques :	19
1.4.6. Les types de cellules PV :	20

1.4.7.	Puissance solaire photovoltaïque :	21
1.4.7.1.	Dimensionnement du générateur photovoltaïque.....	21
1.4.7.2.	Puissance crête d'un générateur photovoltaïque	21
1.4.7.3.	La puissance de sortie du générateur photovoltaïque	21
1.5.	Stockage de l'énergie électrique :	22
1.5.1.	Dispositif de stockage :.....	22
1.5.2.	Les systèmes de stockage :	22
1.6.	La Batterie :	22
1.6.1.	Définition :	22
1.6.2.	Les caractéristiques de batterie :	23
1.6.3.	Les types des batteries :	23
1.6.4.	Avantages de l'utilisation des batteries :	24
1.7.	Conclusion :	24
Chapitre II : Etude et conception d'un système hybride		26
2.1.	Introduction :.....	27
2.2.	Présentation système hybride :	27
2.3.	Système de conversion d'énergie hybride :	28
2.4.	Les avantages d'utilisation de système hybride :	28
2.5.	Les inconvénients:	29
2.6.	Description d'un système hybride :	29
2.7.	Classification des systèmes d'énergie hybride	30
2.8	Principaux composants du système d'énergie PV-éolien :	34
2.9.	Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque- éolien :	35
2.9.1.	Générateurs photovoltaïques :.....	35
2.9.2.	Générateur éolien :	35
2.9.3.	Dispositif de stockage	35
2.9.4.	Les convertisseurs :.....	36

2.9.5.	Les charges :	37
2.10.	Les configurations des systèmes énergétiques hybrides fréquentes :	37
2.10.1.	PV-Batterie (Autonome):	38
2.10.2.	Eolien-Batterie :	38
2.10.3.	Système Hybride (Eolien+ Photovoltaïque) :	39
2.10.4.	PV-Eolienne-Générateur diesel :	40
2.11.	Point de puissance maximale (MPP) :	41
2.12.	Conclusion :	41
Chapitre III : Modélisation et simulation des systèmes photovoltaïque et éoliens ..		42
3.1.	Introduction :	43
3.2.	Modélisation d'un système hybride éolien–photovoltaïque :	43
3.2.1.	Système de conversion de l'énergie solaire :	44
3.2.2.	Modèle De la cellule photovoltaïque (PV) :	44
3.2.2.1.	Modèle à une diode :	44
3.2.2.2.	Modèle à deux diodes :	46
3.2.3.	Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque:	47
3.2.4.	Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire:	47
3.2.4.1.	Puissance optimale :	47
3.2.4.2.	Facteur de forme FF :	47
3.2.4.3.	Courant de court-circuit I_{CC} :	47
3.2.4.4.	Tension en circuit ouvert V_{CO} :	48
3.2.4.5.	Rendement énergétique maximum η_m :	48
3.2.5.	Groupement des cellules solaires :	48
3.2.5.1.	Module photovoltaïque :	48
3.2.5.2.	Panneau photovoltaïque:	48
3.2.6.	Système de conversion de l'énergie éolien :	49
3.2.7.	Modèle de la turbine éolienne :	49
3.2.8.	Modélisation générateur synchrone à aimant permanent :	50

3.2.9.	Modélisation du système de stockage :	51
3.2.9.1.	Modèle de la charge de la batterie :	51
3.2.9.2.	Modèle de la décharge de la batterie :	52
3.2.9.3.	La tension de la batterie :	52
3.3.	Simulation système hybride PV-éolien :	52
3.3.1.	Méthodologie et gestion de l'énergie :	53
3.3.2.	Données et paramètres du système :	53
3.3.3.	Méthodologie de simulation :	54
3.3.4.	Résultats et validation :	56
3.4.	Conclusion:	63
Conclusion Générale:		64
References:		65

Liste de figures :

Chapitre I :

Figure I.1 : Conservation l'énergie cinétiques.....	6
Figure I.2 : Convention d'énergie cinétique du vent	7
Figure I.3: Eoliennes à axes horizontal.	8
Figure I.4: Eolienne de type Darrieus et Savonius	8
Figure I.5: Carte annuelle vitesse des vents (m/s) à 10m du sol	10
Figure I.6 : Schéma synoptique de la chaîne de production de puissance.....	10
Figure I.7: tube de courant autour d'une éolienne.....	11
Figure I.8: Coefficient de puissance	12
Figure I.9: Puissance moyenne Fournit par l'éolienne en fonction de la Vitesse	13
Figure I.10 : les deux types d'énergie solaire	16
Figure I.11: Carte du monde d'ensoleillement moyen annuel Rayonnement solaire	17
Figure I.12: carte de l'irradiation solaire en Algérie à l'occasion du solstice d'été.....	18
Figure I.13: Les composantes du rayonnement solaire	19
Figure I.14: L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire	20
Figure I.15: Différents types de cellules photovoltaïques	20
Figure I.16: Schéma électrique d'une batterie	23
Figure I.17: Batterie à l'Acide-Plomb	24

Chapitre II :

Figure II.1 : système hybride éolien–photovoltaïque.....	28
Figure II.2: Schéma de principe du système hybride photovoltaïque- éolien.....	28
Figure II.3: Classification des systèmes d'énergie hybrides.....	30
Figure II.4: Configuration d'un SEH à bus DC.....	32
Figure II.5 : Architecture mixte d'un SEH.....	33
Figure II.6: Configuration SEH à Bus DC	34
Figure II.7: Principaux composants du SEH.....	34
Figure II.8: principe de fonctionnement d'une batterie Li-Ion.....	36
Figure II.9: SEH PV/Batterie.	38
Figure II.10: SEH Eolien/Batterie	39
Figure II.11: SEH Eolien/PV avec et sans système de stockage.	40

Figure II.12: SEH PV-Eolienne-Générateur diesel.	40
--	----

Figure II.13: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPP	41
---	----

Chapitre III:

Figure III.1: Système hybride d'énergie renouvelable.....	43
--	----

Figure III.2: Modèle d'un système de conversion PV.....	44
--	----

Figure III.3: Modèle de la cellule PV avec une seule diode	45
---	----

Figure III.4: Modèle de la cellule PV avec deux diodes.....	46
--	----

Figure III.5: Chaîne de conversion éolienne.....	49
---	----

Figure III.6: Configuration d'une éolienne.....	49
--	----

Figure III.7: Courbe du coefficient CP (λ, β).....	50
---	----

Figure III.8: générateur à aimant permanent en Matlab/Simulink.....	51
--	----

Figure III.9: Schéma électrique équivalent de nb élément de batterie en série.....	52
---	----

Figure III.10: la production d'énergie du système PV en GWh/jour	56
---	----

Figure III.11: la production mensuelle d'énergie éolienne à Mila.....	57
--	----

Figure III.12: l'énergie nette du réseau en GWh/jour.....	58
--	----

Figure III.13: la gestion de l'énergie pour Mila.	59
---	----

Figure III.14: gestion d'énergie pour adrar	60
--	----

Figure III.15: Vitesse du vent mensuelle	61
---	----

Figure III.16 : Production d'énergie éolienne mensuelle.....	61
---	----

Figure III.17: Température mensuelle.....	62
--	----

Figure III.18: Irradiance solaire mensuelle	62
--	----

Figure III.19: Production d'énergie solaire mensuelle.....	62
---	----

Liste de tableau :

Tableau I.1: capacité cumulée du programme des énergies renouvelables par phase en Algérie	6
---	---

Liste abrégations et symboles

PV : Photovoltaïque

λ : Le rapport de vitesse de pointe

β : L'angle de tangage

I_{cc} : Courant de court-circuit

FF : Facteur de forme

η_m : Rendement énergétique maximum

P_{pv} : Puissance Photovoltaïque

P_{wind} : Puissance Éolienne

AC : Courant alternative

DC : Courant continu

GPV : Générateur Photovoltaïque

E_c : L'énergie cinétique

SEH : Système énergétique hybride

SHSER : système hybride à sources d'énergie renouvelables

MPP : point de puissance maximale

C_p : Le coefficient de puissance

V_{co} : Tension de circuit ouvert

V_{pv} : La tension aux bornes du générateur PV

R_s : Résistance série

R_{sh} : Résistance en dérivation ou shunt

P_{batt} : Puissance de la Batterie

P_{grid} : Puissance du Réseau

PL : la charge demandée au temps t

η_{ond} : le rendement de l'onduleur

η_{bat} : le rendement de la batterie

Introduction

Générale :

Introduction générale :

Le réseau électrique traditionnel utilise des combustibles fossiles comme principales sources d'énergie, ce qui entraîne des émissions de dioxyde de carbone et de poussières, des changements climatiques et l'épuisement continu des combustibles fossiles [1].

En outre, il présente d'autres inconvénients tels qu'une alimentation électrique centralisée, une extensibilité limitée et des coûts plus élevés. Ces dernières années, les unités de production distribuée basées sur les énergies renouvelables ont attiré l'attention des chercheurs du monde entier car elles offrent plusieurs avantages tels qu'un rendement élevé, un respect de l'environnement, une sensibilité à la flexibilité et une fiabilité accrue [2]

Depuis le début du siècle la consommation énergétique mondiale connaît une forte croissance. Les énergies renouvelables sont devenues une source importante et apparaissent comme la solution idéale pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux en diminuant l'inconvénient majeur émis par les énergies fossiles, elles sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités.

Les sources d'énergie distribuées (DER), par exemple les systèmes photovoltaïques (PV), les éoliennes (WT), les batteries de stockage d'énergie (BES) et les micro-turbines (MT), sont considérées comme des sources d'énergie flexibles et sont connectées directement au réseau basse tension [3].

Les énergies renouvelables font face à plusieurs défis elles sont dépendantes des conditions météorologiques, telles que le soleil et le vent qui peuvent changer rapidement entraînant des variations de production. Et l'investissement dans ces technologies nécessite toujours un financement important, et elles ne sont pas toujours disponibles, elles doivent être stockées pour l'utilisation en cas de besoin.

En ce qui concerne notre pays : l'Algérie, l'enjeu du développement des énergies renouvelables est encore plus important. En effet, ces énergies permettront de plus en plus de couvrir la croissance nécessaire et légitime des services énergétiques de base dans les domaines du développement rural, de l'habitat, de la santé, de l'éducation puis à long terme, de l'industrie. Ainsi de sa part sa situation géographique, l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation des énergies solaire et éolienne. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement solaire reçu (169.440 TWh/an), le plus important de tout le bassin méditerranéen [4]

C'est pour ça on propose ici un système hybride composé de deux sources d'énergie solaire et éolienne comme une solution optimale de la complémentarité entre elles. Ce système fonctionne sur le principe de collecte de l'énergie à partir de ces deux sources et de stockage dans une batterie, puis utilisation de cette énergie pour assurer la stabilité du réseau électrique.

Le système est composé de plusieurs éléments clés, notamment des panneaux solaires, des turbines éoliennes, une batterie ou un système de stockage, un système de contrôle et un réseau électrique.

L'objectif de notre travail est l'étude et l'optimisation d'un système hybride photovoltaïque /éolien et utiliser une méthode numérique pour combiner ces deux sources d'énergie tout en garantissant un fonctionnement sans problème de notre système hybride avec un maximum de fiabilité, pour cela nous devons passer par un processus de dimensionnement et d'optimisation du système

Ce travail a été divisé en trois chapitres et ils sont divisés comme suit :

- ❖ Le premier chapitre a parlé des généralités sur les énergies renouvelables (PV et éolien) ainsi que le principe de fonctionnement des systèmes qui les entraînent.
- ❖ Le deuxième chapitre consacré à une analyse qui détaille et valide les différentes parties du système hybride photovoltaïque-éolien suggéré.
- ❖ Le troisième chapitre nous détaillons la modélisation et la simulation d'un système hybride intégrant l'énergie solaire photovoltaïque à l'énergie éolienne. L'objectif est de concevoir un modèle mathématique qui permettra d'examiner le comportement et l'efficacité du système dans diverses conditions d'opération.

La modélisation implique la représentation des divers éléments du système, tels que le générateur photovoltaïque, le générateur éolien, et les dispositifs de stockage et de conversion. L'évaluation des modèles et la vérification des performances énergétiques du système se feront à l'aide de l'environnement MATLAB/SIMULINK pour effectuer la simulation.

Finalement, on termine par une conclusion générale, On va rappeler les résultats majeurs obtenus et esquisser les perspectives possibles.

Chapitre I :
Généralités sur
les énergies
Renouvelables
: Éolienne et
solaire

1.1. Introduction :

Dans un monde qui dépend fortement des énergies fossiles, l'Energie renouvelable est devenue une nécessité urgente. Cette énergie est produite à partir de source naturelle renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau ... et utilisée comme alternative aux énergies fossiles qui sont considérées comme une source d'émissions gazeuses nocives et elle permet une économie de cout sur le long terme.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire ont attiré beaucoup d'attention en raison de leurs caractéristiques proposes et alternatives [5]

Selon l'agence e international de l'énergie, l'énergie solaire a été la source d'énergie mondiale qui a connu la croissance la plus rapide en 2017. [6]

1.2. Le potentiel des énergies renouvelables en Algérie :

En Algérie, le potentiel en matière d'énergies renouvelables est le plus vaste d'Afrique du Nord.

Le marché des énergies vertes présente de belles perspectives et leur développement figure parmi les priorités de la politique énergétique et écologique nationale. Selon les objectifs déclarés par les autorités, d'ici 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation intérieure proviendront de sources renouvelables. Le projet révisé d'énergies renouvelables vise à mettre en place une capacité renouvelable d'environ 22 000 MW d'ici 2030 pour le marché intérieur, Tout en conservant l'option d'exportation comme but stratégique, si les circonstances du marché le rendent possible. Les initiatives EnR pour la production d'électricité destinées au marché domestique seront réalisées en deux phases :

Phase initiale 2015 - 2020 : Cette phase prévoit la mise en place d'une capacité de 4000 MW, répartie entre l'énergie solaire et éolienne, ainsi que de 500 MW, provenant de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie.

Deuxième phase 2021 - 2030 : L'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar) ouvrira la voie à l'établissement de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Béchar, facilitant leur intégration dans le système national énergétique. À ce stade, l'énergie solaire thermique pourrait devenir économiquement viable. Le tableau ci-dessous présente les capacités cumulées du programme EnR par type et par phase sur la période s'étendant de 2015 à 2030.

	1ère phase 2015 – 2020 (MW)	2ème phase 2021 - 2030 (MW)	Total (MW)
PV	3000	10575	13575
Eolien	1010	4000	5010
CSP (solaire thermique)	-	2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	5	10	15
Total	4525	17475	22000

Tableau I.1: capacité cumulée du programme des énergies renouvelables par phase en Algérie

1.3. L'énergie éolienne :

1.3.1. Définition :

L'énergie éolienne est une forme d'énergies renouvelables qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et ensuite le plus souvent transforme en énergie électrique par le générateur. Est la source d'énergie renouvelable qui a connu la croissance la plus rapide au monde, avec une augmentation de 30% dans de nombreux pays développés et en développement au cours des deux dernières décennies.

Les turbines éoliennes modernes sont caractérisées par des pales grandes qui tournent à grande vitesse, la rotation se produit lorsque l'air se déplace au-dessus des ailes connectées produisant de l'énergie qui transmise au générateur pour être convertie en électricité.

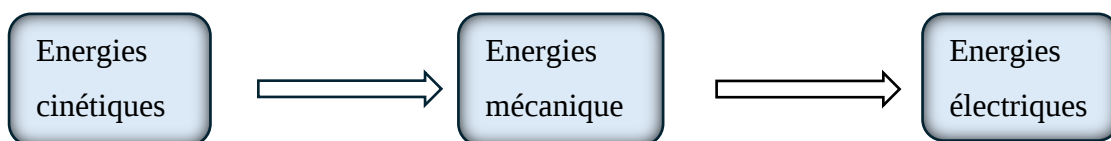


Figure I.1: Conservation l'énergie cinétiques

Les domaines d'utilisation sont :

- Pompage d'eau
- Conservation l'énergie mécanique
- Production de l'électricité

1.3.2. La technologie éolienne pour produire de l'électricité :

L'énergie éolienne est la nouvelle source de production d'électricité qui connaît la

croissance la plus rapide à l'échelle mondiale. L'énergie éolienne est produite par des moteurs éoliens à trois arbres (ou turbines), placés au sommet de hautes tours.

Ils fonctionnent comme des ventilateurs, mais à l'envers. Au lieu d'utiliser l'électricité pour produire du vent comme le font les ventilateurs, ces turbines utilisent le vent pour produire de l'énergie.

Le processus est réalisé par le vent qui fait tourner les bras du moteur, qui à leur tour font tourner le cylindre de l'arbre relié par un ensemble d'engrenages qui forment une transmission pour faire fonctionner un générateur électrique.

Les turbines à grande échelle conçues pour les installations publiques de production d'électricité peuvent générer entre 650 kilowatts (un kilowatt équivaut à mille watts) et 1,5 mégawatt (un mégawatt équivaut à un million de watts). Les maisons, les stations de télécommunication et les pompes à eau utilisent une seule petite turbine d'une puissance maximale de 100 kilowatts comme source d'énergie, en particulier dans les zones reculées où il n'existe pas de sociétés de production et de distribution d'électricité à usage public.[7]

1.3.3. Principe de la conversion de l'énergie éolienne :

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice comme représenté dans la figure I.2. [8]

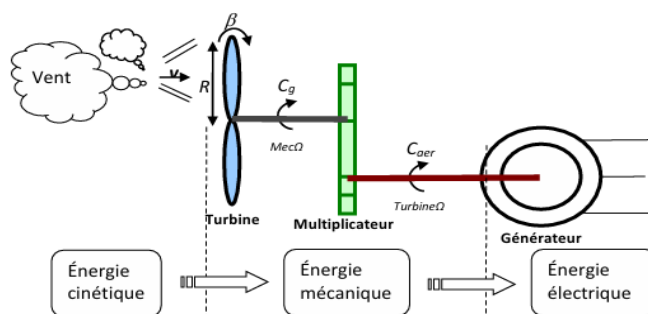


Figure I.2 : Convention d'énergie cinétique du vent [9].

1.3.4. Classification des éoliennes :

Peuvent être classées en fonction de plusieurs critères, tels que leur orientation : [10]

1.3.4.1. Les turbines éoliennes à axe horizontal :

L'éolienne à axe horizontal est la plus connue et la plus utilisée (Figure I.3). Elle est composée de trois grandes pales (ou hélices) qui captent la puissance du vent. Lorsque celles-ci tournent, elles font à leur tour tourner un « axe » une pièce présente dans la nacelle située juste derrière les pales. C'est cette pièce qui, en tournant, va activer plusieurs dispositifs qui

permettent de transformer l'énergie mécanique en électricité renouvelable : un multiplicateur, un alternateur puis un transformateur. Ce courant électrique est ensuite transporté par des câbles jusqu'au pied du mât et rejoint ensuite le réseau de distribution d'électricité classique.



Figure I.3: Eoliennes à axes horizontal. [11]

1.3.4.2. Les turbines éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes verticales sont des modèles assez récents dont les pales tournent autour d'un axe vertical (Figure I.4) Cette structure particulière leur permet de capter des vents plus faibles et d'occuper moins d'espace. En ce sens, elles viennent répondre aux limites des éoliennes à axe horizontal. De plus, leur générateur est souvent situé en pied de mât, ce qui en facilite l'entretien.



Eolienne de type Darrieus



Eolienne de type Savonius

Figure I.4: Eolienne de type Darrieus et Savonius [11]

- **Statistique :**

La production d'électricité éolienne continue de progresser dans le monde avec notamment le développement de l'éolien en mer. [12]

L'éolien a produit 7,8% (soit 2304 TWh) de l'électricité mondiale en 2023. La Chine se présente comme leader mondial dans l'utilisation de l'éolien comme source d'énergie. Le géant asiatique a généré 886 TWh en 2023, soit deux fois plus que les Etats-Unis (425TWh) et six fois plus que l'Allemagne (135 TWh).

La production éolienne dans le monde a presque triplé depuis 2015 pour atteindre 2304 TWh, sa part ayant plus que doublé pour atteindre 7,8% en 2023.

Selon les prévisions de l'AIE, la production éolienne mondiale devrait atteindre 7070 TWh en 2030 afin de répondre à la demande croissante. [13]

1.3.5. Le vent :

Le vent est mouvement d'air naturel qui se produit dans l'atmosphère en raison des différences de pression atmosphérique, ces différences sont causées par les gradients de température qui influencent la répartition de la pression et de la température à la surface de terre.

Lorsque les températures diffèrent entre les régions voisines, l'air chaud s'écoule au-dessus de l'air froid. La direction du vent qui en résulte est influencée par la force de Coriolis, qui est causée par la rotation de la terre sur son axe. [14]

1.3.6. Le vent en Algérie :

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température.

Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre[15]

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en Figure I.5 :

Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 1.4 à 6.2 m/s. le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. .Concernant le nord ,on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée

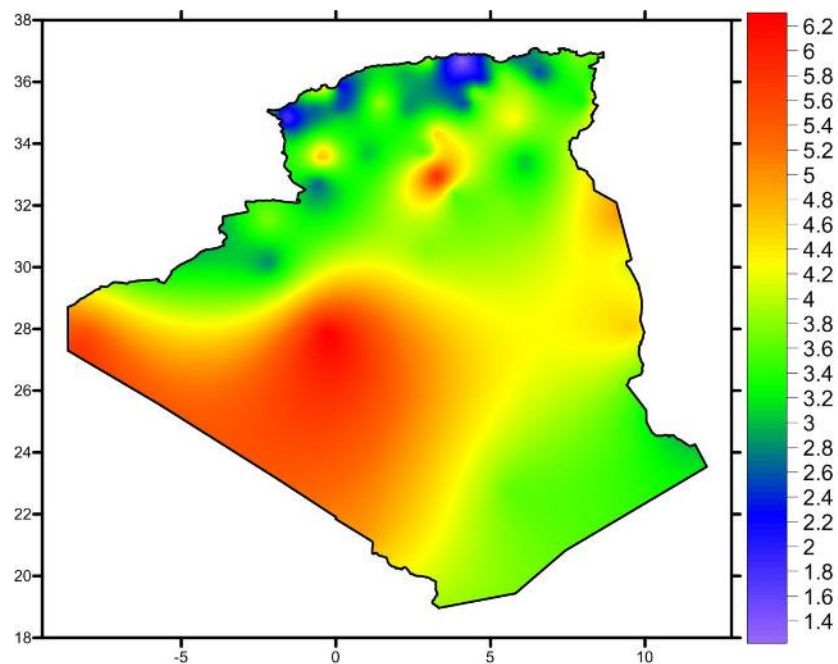


Figure I.5: Carte annuelle vitesse des vents (m/s) à 10m du sol [16]

1.3.7. La puissance fournie par un aérogénérateur :

La puissance d'une éolienne est l'énergie qu'elle produit en convertissant l'énergie du vent en énergie mécanique ou électrique comme la Figure I.6 : [17]

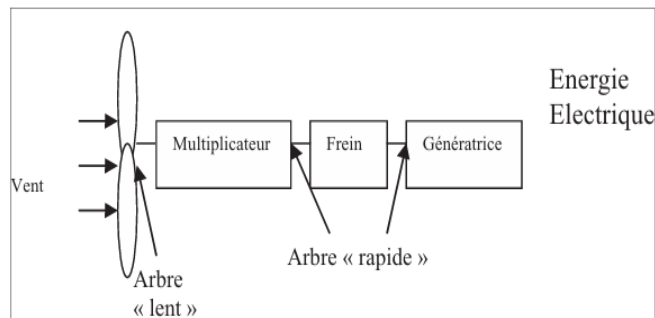


Figure I.6 : Schéma synoptique de la chaîne de production de puissance [18]

1.3.7.1. Potentiel éolien disponible :

L'énergie cinétique d'une masse d'air m en mouvement à la vitesse V en Joule est:

$$Ec = \frac{1}{2}mv^2 \quad 1.3(1)$$

V : vitesse instantanée du vent (m/s)

m : masse du volume d'air (kg)

E_c : énergie cinétique (joule)

Si cette énergie pouvait être entièrement récupérée à l'aide d'un dispositif de surface A ($A=\pi R^2$), situé perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent,

La puissance mécanique venant dans le vent est donnée par l'équation suivante en watts :

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

m : Le débit massique : $m = \rho \cdot v$

ρ : densité d'air

La puissance spécifique en w/m^2 de surface :

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (3)$$

1.3.7.2. La puissance moyenne récupérable :

En réalité, le dispositif de conversion (turbine éolienne) extrait une puissance P_r inférieure à la puissance disponible P_{disp} .

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure() sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 . Soit $(V_1+V_2)/2$ est la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

1.3.7.3. La loi de Betz :

L'énergie réelle extraite par les pales de la turbine est la différence entre la puissance éolienne avant le passage de la turbine (en amont) et la puissance éolienne après le passage de la turbine (en aval), les valeurs sont exprimées en watts.

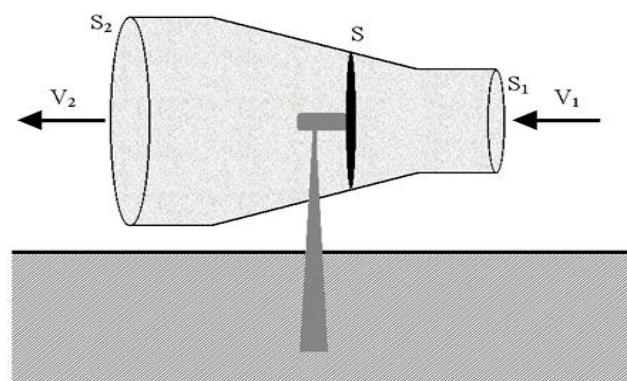


Figure I.7: tube de courant autour d'une éolienne

$$m = \frac{\rho S(V_1+V_2)}{2} \quad (4)$$

Pour $v_2 = \frac{v_1}{3}$ La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton):

$$P_m = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (5)$$

Soit en remplaçant m par son expression dans P_m :

$$P_m = \frac{\rho V(V_1+V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (6)$$

$$\text{Où : } P_m = \frac{1}{2} \rho S V^3 \frac{(1+\frac{V_1}{V_2})(1-(\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (7)$$

La puissance P_{mt} :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (8)$$

Le coefficient de puissance $C_p = P_m / P_{mt}$:

$$C_p = \frac{(1+\frac{V_1}{V_2})(1-(\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (9)$$

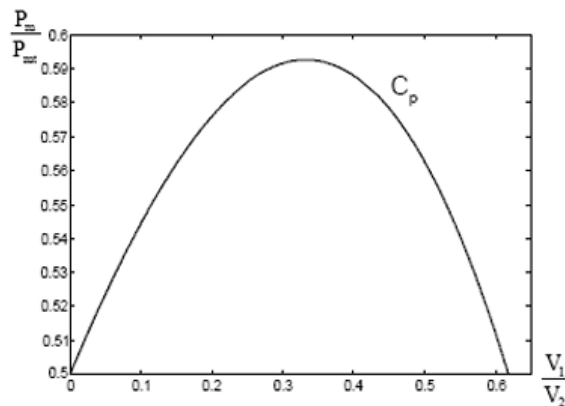


Figure I.8: Coefficient de puissance

$$\text{La puissance maximale récupérable } P_{\max} = \frac{16}{27} * P_{\text{cénitique}} = \frac{8}{27} \rho S V^3$$

Le facteur $16/27 \approx 0.59 = 59\%$ appelé le coefficient de puissance maximum et appelée la limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour la vitesse de vent.

$$P_{\text{réc}} = \frac{1}{2} \rho s v^3 C_P \quad (10)$$

En prend en considération la limite de Betz et en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne, la moyenne maximale récupérable par unité de surface est donnée par : [19]

$$P_{\text{réc}} = 0.37 V^3 \quad (11)$$

1.3.8. La puissance moyenne fournie par une éolienne -courbe de puissance :

La performance d'une éolienne est déterminée par la vitesse moyenne du vent, conformément à une courbe spécifique connue sous le nom de courbe de puissance. Ces courbes sont habituellement basées sur des données expérimentales statistiques, mais peuvent aussi être produites en recourant à des méthodes telles que la logique floue, la modélisation dynamique ou les équations différentielles stochastiques.

L'éolienne commence à générer de l'électricité dès que la vitesse du vent dépasse un seuil minimal connu sous le nom de vitesse de démarrage ou vitesse de coupure basse. Au fur et à mesure que la vitesse du vent s'intensifie, la production d'énergie augmente graduellement pour culminer à un niveau maximal à une vitesse nominale, après quoi la puissance demeure stable même si la vitesse du vent continue de croître. Comme illustré dans la figure I.9 : [20]

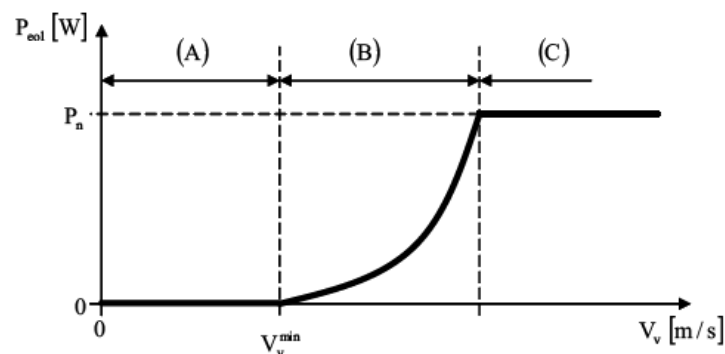


Figure I.9: Puissance moyenne Fournit par l'éolienne en fonction de la Vitesse

Zone A : où la puissance fournie à l'arbre varie en fonction de la vitesse du vent V_v .

Zone B: où la vitesse de rotation reste constante et où la puissance P fournie est égale à P_n

Zone C: où le système de sécurité arrête le transfert d'énergie.

1.3.9. Les Différents Types de génératrices électriques pour l'éolienne :

Il est possible d'identifier la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique en fonction du type de générateur électrique utilisé :

L'aéromoteur peut entraîner, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un multiplicateur trois types de génératrices électriques : [21]

- ❖ Une génératrice à courant continu (Dynamo). .
- ❖ Une génératrice synchrone à courant alternatif (Alternateur).
- ❖ Une génératrice asynchrone à courant alternatif :
 - Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.
 - Génératrice asynchrone à double alimentation (MADA).
 - Génératrice asynchrone à rotor bobiné.

1.3.9.1. Avec générateur synchrone :

On utilise des machines synchrones dans le cas des entraînements directs à haut rendement . Ces machines se caractérisent par un couple massique important lorsqu'elles ont un grand nombre de pôles, ce qui rend leur fréquence incompatible avec celle du réseau. Par conséquent, l'utilisation d'un convertisseur de fréquence devient nécessaire. C'est pourquoi tous les moteurs qui fonctionnent en commande directe fonctionnent à vitesse variable.

Les avantages :

- Une efficacité élevée
- Un couple massique important
- Une vitesse variable
- Un contrôle précis du mouvement. [22]

1.3.9.2. Avec générateur asynchrone :

1.3.9.2.1. Générateur asynchrone à cage :

Les génératrices asynchrones à cage sont utilisées dans les applications de grande puissance (supérieure à 100 kW) et sont connectées au réseau électrique. Le faible coût et la standardisation de ces machines ont conduit à une domination très large, elles ne nécessitent qu'une installation assez sommaire, elles sont souvent associées à des batteries, des condensateurs, un compensateur de puissance réactive et un démarreur automatique progressif

à gradateur ou à résistance permettant de limiter le régime transitoire d'appel du courant au moment de la connexion au réseau électrique. [23]

Les avantages :

- Coût faible
- Standardisation importante
- Installation sommaire
- Possibilité d'association avec des batteries, des condensateurs et d'autres équipements
- Possibilité de contrôle du régime transitoire d'appel du courant

Inconvénients :

- Impossible de contrôler le régime de rotation
- Impossible d'utiliser dans les applications de petite puissance
- Nécessité d'une maintenance régulière pour assurer un fonctionnement optimal.

1.3.9.2.2. Génératrices asynchrones à rotor bobiné :

La machine asynchrone à rotor bobiné et à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo synchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à une tension et une fréquence fixe (réseau électrique), tandis que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence (plus ou moins élaboré).

Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit. En effet, sa puissance de dimensionnement est de 30% de la puissance maximale générée.[24]

Les avantages :

- Contrôle de la vitesse
- Utilisation possible dans des applications de grande puissance
- Réduction possible du dimensionnement du convertisseur de fréquence

Les inconvénients :

- Conception complexe
- Nécessité d'électronique de puissance complexe
- Prix élevé possible

1.4. L'énergie Photovoltaïque :

1.4.1. Définition :

Le soleil est considéré comme une source d'énergie renouvelable et inépuisable et durable, l'énergie solaire constitue une source principale pour la plupart des énergies renouvelables

Il peut fournir suffisamment d'énergie pour couvrir les besoins énergétiques mondiaux plusieurs million fois, C'est pourquoi l'humanité cherche depuis longtemps à exploiter cette énergie précieuse et répandue sur l'ensemble de la planète.

Il est possible d'exploiter l'énergie solaire grâce à la cellule photovoltaïque qui convertit la lumière du soleil en énergie électrique L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes l'une produit ces calories c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre l'énergie solaire photovoltaïque qui produit de l'électricité (figure I.10) . [25]

Le nom photovoltaïque composer deux parties :

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique

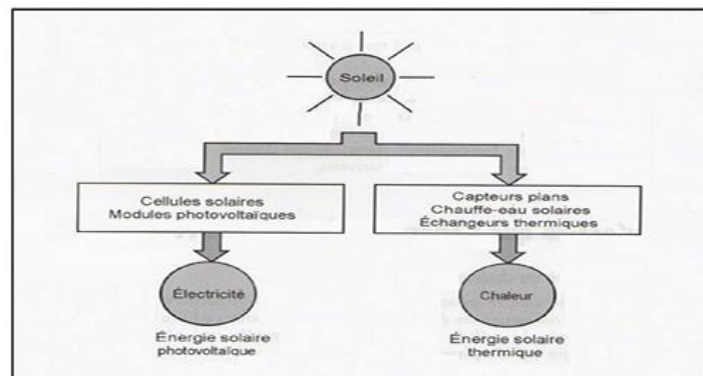


Figure I.10 : les deux types d'énergie solaire

1.4.2. Rayonnement solaire

L'énergie solaire représente le flux d'énergie électromagnétique émis par le soleil, qui englobe toutes les ondes électromagnétiques. Sa valeur varie en fonction des coordonnées géographiques (Figure I.11) .

Pour élaborer et déployer des systèmes d'énergie solaire performants, il est indispensable de connaître les gisements solaires. On utilise les informations relatives au rayonnement solaire à divers stades :

1. Élaboration : afin de dimensionner les systèmes solaires et d'évaluer les besoins énergétiques.

2. Développement : afin d'améliorer l'efficacité des systèmes solaires.
3. Mise en œuvre : pour l'exécution efficace des systèmes d'énergie solaire.
4. Évaluation des performances : pour évaluer l'efficacité des systèmes solaires et repérer les améliorations envisageables.

Elles sont employées dans l'édification de bâtiments afin d'améliorer l'isolation thermique et de diminuer la consommation énergétique.

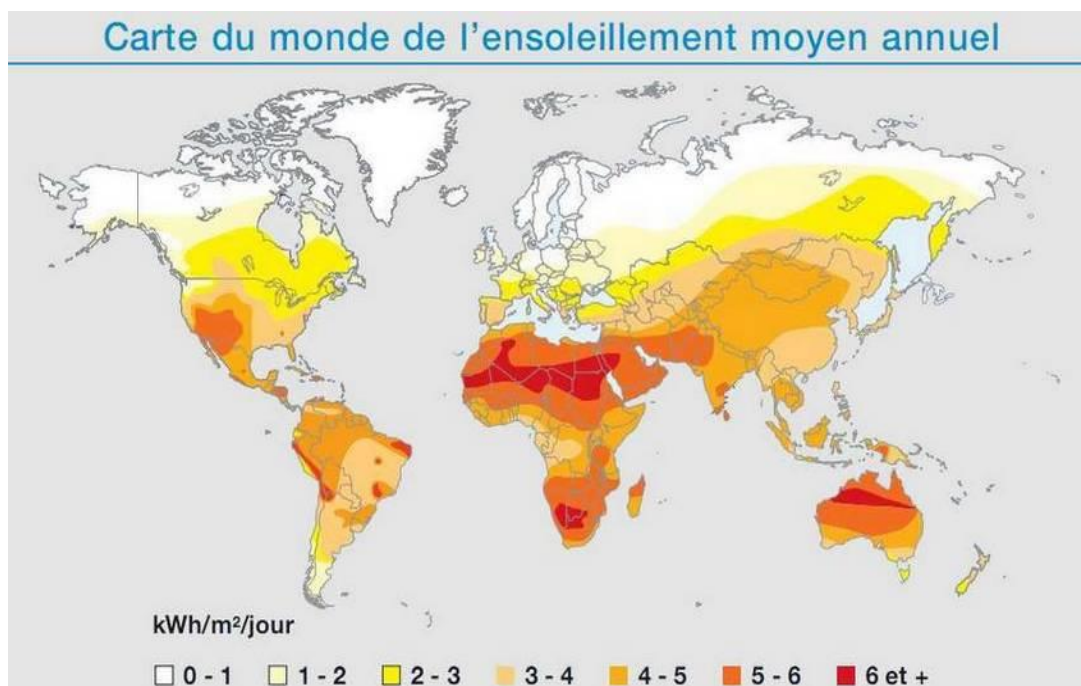


Figure I.11: Carte du monde d'ensoleillement moyen annuel Rayonnement solaire

1.4.3. Rayonnement solaire en Algérie :

L'Algérie dispose d'un potentiel important pour le rayonnement solaire quotidien, notamment dans les régions désertiques qui conviennent aux centrales solaires photovoltaïques (figure I.12).

La connaissance du gisement solaire est nécessaire dans le dimensionnement et le bon fonctionnement de tout système fonctionnant à l'énergie solaire. Les données du rayonnement solaire sont utilisées dans la conception, le développement, la réalisation, ainsi que dans l'évaluation des performances des systèmes d'énergie solaire, mais également pour la construction de bâtiments dans la perspective d'une meilleure isolation thermique adaptée au lieu géographique

Les irradiances solaires incidentes sur plan horizontal ont été estimées. Ces valeurs ont été exploitées afin d'estimer, au mieux possible, le rayonnement solaire incident pour différentes inclinaisons et orientations, le rayonnement global double et simple axe, et enfin le rayonnement direct double et simple axe, et modéliser l'ensemble du rayonnement solaire incident à des fins d'optimisation des systèmes utilisant l'énergie solaire, que ce soit leur dimensionnement ou l'évaluation de leurs performances.

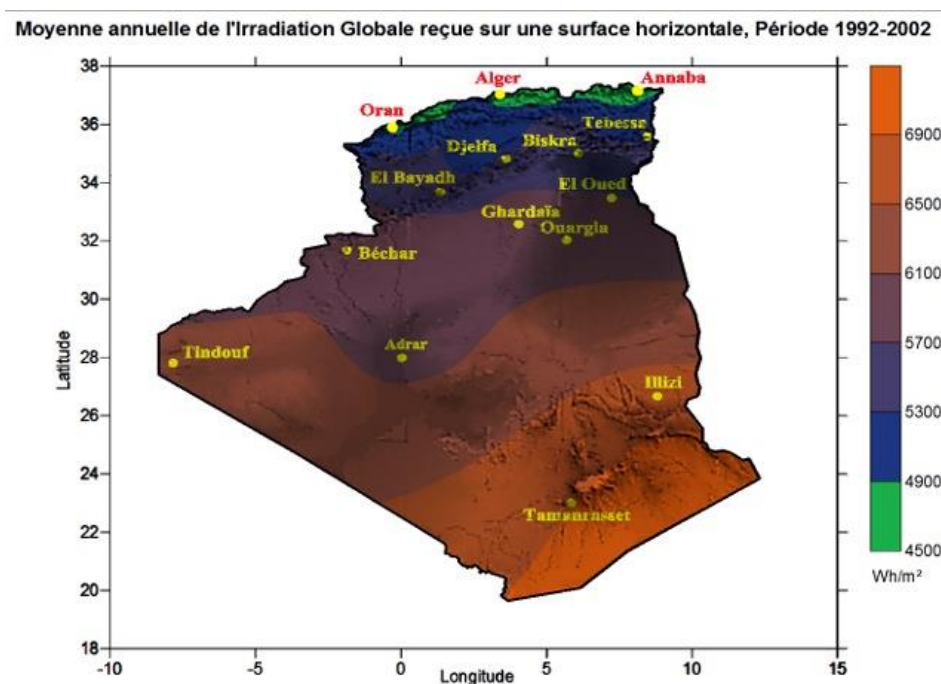


Figure I.12: carte de l'irradiation solaire en Algérie à l'occasion du solstice d'été

1.4.4. Les différents types de rayonnement solaire :

Il y a quatre types de rayonnement solaire (figure I.13) : [26]

- **Le rayonnement solaire direct** : Cela fait référence à la radiation qui provient directement du soleil. On se sert d'un pyréliomètre pour évaluer sa longueur.
- **Le rayonnement solaire diffus** : Lumière qui provient de toutes les directions du ciel. Elle est le résultat de l'absorption, de la diffusion par l'atmosphère et de la réflexion sur les nuages. On peut utiliser un pyromètre équipé d'un écran occultant le soleil pour effectuer cette mesure.
- **Le rayonnement solaire réfléchi (albédo du sol)** : L'obstacle est le rayonnement qui se réfléchit sur le sol ou sur des objets présents à sa surface. Quand le sol présente une

réflexion particulièrement forte (comme dans le cas de l'eau ou de la neige), cet albédo peut s'avérer déterminant.

- **Le rayonnement solaire global :** Donc, la composition du sol et son épaisseur ont un impact sur le rayonnement global du sol. Les faisceaux lumineux pénètrent dans l'atmosphère tout au long du jour. Les générateurs solaires exploitent à la fois le rayonnement direct et le rayonnement diffus. La surface est formée de l'addition de tous les rayonnements captés, y compris ceux qui sont renvoyés par le sol et les objets environnants. On peut le mesurer en utilisant un pyromètre ou un polarimètre.

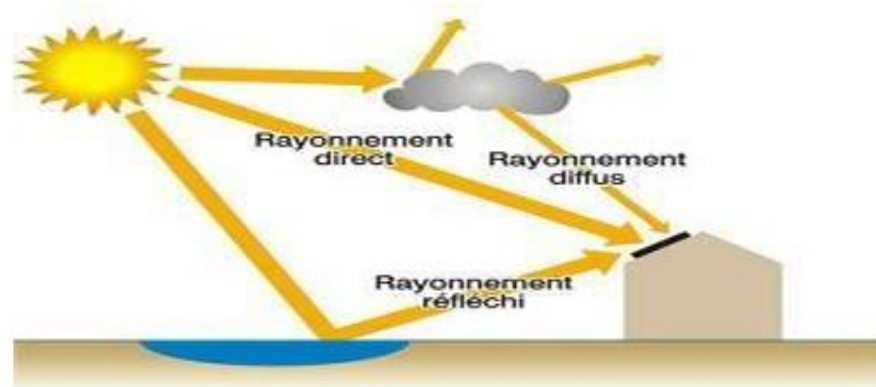


Figure I.13: Les composantes du rayonnement solaire

1.4.5. Cellules photovoltaïques :

Une cellule photovoltaïque est un appareil électronique qui peut générer une tension électrique lorsqu'elle est soumise à la lumière (photons). Ils symbolisent une diode.

Le type de courant produit est de nature continue (CC). Les cellules photovoltaïques sont couramment fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le sulfure de cadmium (CdS) ou le tellure de cadmium (CdTe). Elles apparaissent comme deux délicates couches superposées, placées en contact étroit.

Le semi-conducteur est enfermé entre deux électrodes métalliques, et l'ensemble est sécurisé par une plaque de verre (figure I.14). [27]

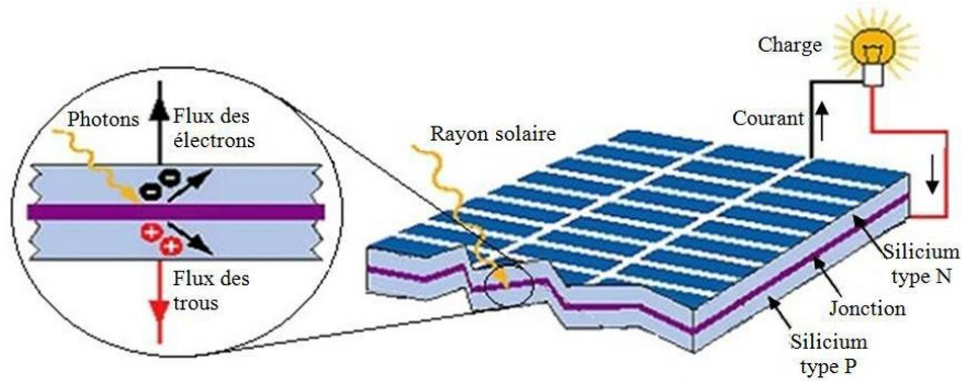


Figure I.14: L'effet photovoltaïque dans une cellule solaire [28]

1.4.6. Les types de cellules PV :

Les cellules photovoltaïques se divisent en trois principales catégories, en concurrence sur le marché. Actuellement, la première technologie domine, représentant 89,6 % de la production elle représenter dans la figure I.15 .

1. **Cellules Monocristallines** : Ces cellules se caractérisent par leur qualité supérieure et leur processus de production homogène. Elles autorisent une production d'énergie importante en occupant une vaste superficie.
2. **Cellules Polycristallines** : Conçues pour diminuer les dépenses de production, ces dernières requièrent moins d'énergie en raison de méthodes industrielles allégées.
3. **Cellules Amorphes** : Se basant sur les technologies à film mince, elles cherchent à optimiser les performances médiocres des cellules polycristallines tout en conservant un coût de production très réduit. Les études en cours visent à obtenir une efficacité de 30 à 60 %, en employant des méthodes et des matériaux peu coûteux.

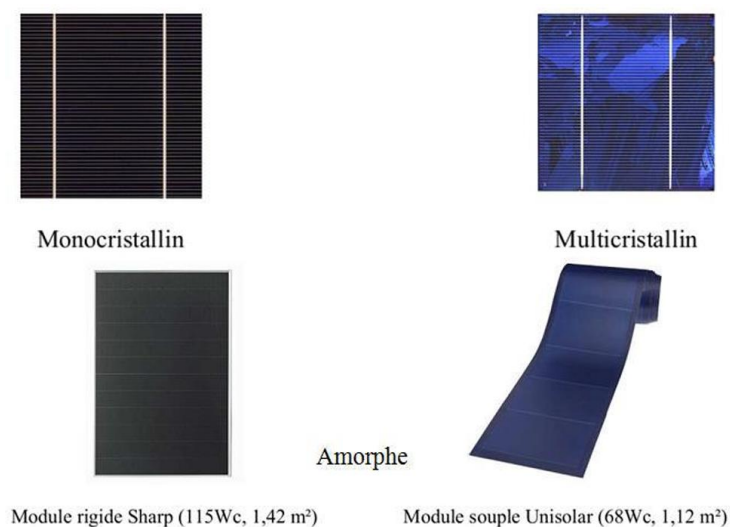


Figure I.15 : Différents types de cellules photovoltaïques [29]

1.4.7. Puissance solaire photovoltaïque :

1.4.7.1. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Il s'agit de déterminer le nombre de panneaux solaires nécessaires pour satisfaire nos besoins en électricité.

1.4.7.2. Puissance crête d'un générateur photovoltaïque

L'irradiation spécifique au site d'installation détermine la capacité maximale des panneaux solaires à mettre en place. On la calcule en utilisant la formule ci-dessous :

$$P_{ch} = \frac{E_c}{K.I_r} \quad (12)$$

P_{ch} : Puissance crête de champs photovoltaïques en Watt crête (WC)

E_c : Energie consommée par jour (Wh/jour)

I_r : Temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour) En Algérie : $2 \leq I_r \leq 8$. On prend la moyenne de 5 h/Jour

K : Coefficient correcteur, ce coefficient tient compte :

- De l'incertitude météorologique.
- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.
- Du point de fonctionnement des modules.
- Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- Du rendement de régulateur (95%).
- Des pertes dans les câbles et connexions pour les systèmes avec batterie. [30]

K est en générale compris entre 0,55 et 0,75. La valeur souvent utilisée dans les calculs du système avec batterie est $k=0,65$.

1.4.7.3. La puissance de sortie du générateur photovoltaïque

Étant donné la variété de performances et de technologies qui existent aujourd'hui, plusieurs modèles sont disponibles pour déterminer la puissance du générateur photovoltaïque. Les conditions météorologiques (ensoleillement, température, vent) et les spécificités des cellules influencent la puissance de sortie. [31]

$$P_{PV} = \eta_g N A_m G \quad (13)$$

η_g : le rendement du générateur photovoltaïque ;

N : le nombre de modules ;

A_m : la surface d'un module (m^2)

G : le rayonnement global dans le plan du générateur PV (W/ m^2).

1.5. Stockage de l'énergie électrique :

1.5.1. Dispositif de stockage :

Les systèmes situés dans des lieux isolés nécessitent absolument la présence d'unités de stockage.

Lorsque correctement dimensionnées, elles contribuent à assurer l'indépendance du site en constituant un réservoir d'énergie lorsque les sources produisent plus que nécessaire, et en la restituent. Une solution de stockage est donc obligatoire pour assurer cet équilibre, et ainsi faire varier l'énergie interne du système

1.5.2. Les systèmes de stockage :

- **Stockage thermique :** Ce type de stockage consiste à stocker l'énergie sous forme de chaleur qui peut ensuite être exploitée pour générer de l'électricité ou du chauffage.
- **Stockage mécanique :** Ce stockage est basé sur l'emploi de l'énergie cinétique ou potentielle mécanique.
- **Stockage électromagnétique :** conserver l'énergie sous forme de champ magnétique, produit par des courants électriques.
- **Stockage électrochimique :** Ce type s'appuie sur des réactions chimiques inversibles dans des appareils tels que les batteries.

1.6. La Batterie :

1.6.1. Définition :

L'élément crucial de l'installation photovoltaïque et éolien est le système de stockage, car il permet d'emmagasiner l'énergie solaire et éolienne générée durant la journée pour un usage futur, ainsi que pour la stabilisation de l'énergie sur le réseau électrique. Étant donné l'importance du stockage électrochimique de l'énergie solaire, une analyse théorique des divers types de batteries est réalisée.

Le dispositif de stockage est capable d'incorporer des batteries au plomb, un type de batterie parmi ceux proposés, qui se démarque par son prix plus bas comparé à d'autres alternatives.

Une batterie est un regroupement d'accumulateurs électriques conçu pour emmagasiner de l'énergie et la restituer par la suite. Elle est de nature électrochimique et opère à travers les réactions électrochimiques de ses électrodes. Il s'agit donc d'une transformation de l'énergie chimique en énergie électrique. [32]

1.6.2. Les caractéristiques de batterie :

La capacité nominale Q_{as} de la batterie, exprimée en ampères-heures (Ah), détermine la quantité maximale d'énergie qui peut être extraite dans des conditions de décharge spécifiques.

La capacité de la batterie dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La taille de la batterie
- Le nombre de plaques dans les cellules de la batterie
- La concentration de l'électrolyte
- Le nombre de cellules connectées en parallèle

Il est important de noter que la capacité de la batterie diminue à basse température.

L'état de la batterie est déterminé par deux coefficients importants :

- **Le taux de décharge** (DOD : Depth of Discharge) : c'est le rapport entre les ampères-heures déchargés et la capacité totale de la batterie.

$$DOD = \frac{Ah \text{ (utilise)}}{capacite \text{ (Ah)}} \quad (14)$$

- **Le taux de charge** (SOC : State of Charge) : il indique le niveau de charge actuel de la batterie.

$$SOC = \frac{capacite \text{ (Ah)} - (Ah) \text{ utilise}}{capacite \text{ (Ah)}} \quad (15)$$

Avec $0 \leq SOC \leq 1$.

Si $SOC = 1$ la batterie est totalement chargée,

Si $SOC = 0$ la batterie est totalement déchargée.

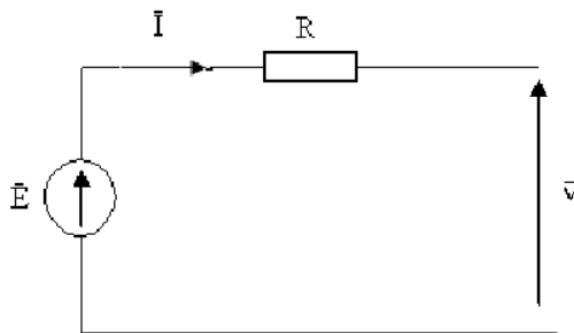


Figure I.16 : Schéma électrique d'une batterie

1.6.3. Les types des batteries :

Il y a 4 types de batteries :

La batterie Nickel-Cadmium (Ni-Cd) :

Les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd) représentent une catégorie de batterie réutilisables qui fait appel au nickel et au cadmium en tant que substances actives.

La batterie Nikel-Métal-Hydrure (Ni-MH) :

Les batteries nickel-métal hydrure (Ni-MH) sont un type de batterie rechargeable qui utilise une réaction chimique entre le nickel et un alliage métallique pour stocker l'énergie

La batterie lithium-ion (Li-Ion) :

Les batteries lithium-ion (Li-Ion) représentent l'une des technologies de stockage d'énergie les plus répandues et les plus performantes à ce jour.

La batterie à l'Acide-Plomb :

Les batteries au plomb-acide sont couramment utilisées dans les systèmes d'énergie renouvelable en raison de leur coût relativement bas. Cependant, elles nécessitent une maintenance régulière.

La batterie plomb-acide (figure I.17) a longtemps été la solution de stockage d'énergie privilégiée dans les systèmes de fourniture d'énergie HES, en raison de sa fiabilité et de sa capacité énergétique adéquate.

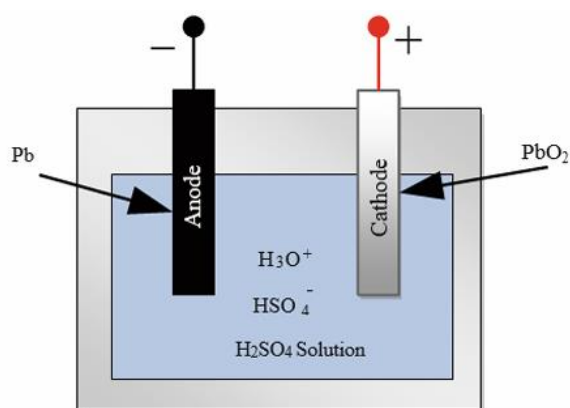


Figure I.17 : Batterie à l'Acide-Plomb

1.6.4. Avantages de l'utilisation des batteries :

L'utilisation de batteries pour stocker l'énergie éolienne et solaire offre plusieurs avantages, notamment :

- Stockage de l'énergie excédentaire
- Amélioration de la stabilité
- Réduction de la dépendance aux combustibles fossiles

1.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une part les différentes notions concernées dans l'élaboration des deux énergies : solaire photovoltaïque et éolienne. Par sinon, nous avons

discuté de tous les composants des deux systèmes photovoltaïques et éoliens, ainsi que de leurs dispositifs de fonctionnement. Cela ouvre la voie à l'examen du système hybride formé par la combinaison de ces deux systèmes au chapitre II.

Chapitre II :
Etude et
conception
d'un système
hybride

2.1. Introduction :

L'association de diverses sources d'approvisionnement permet de surmonter la variabilité et l'incertitude de la puissance produite par les énergies renouvelables, donnant ainsi naissance à ce qu'on nomme un système hybride (SH).

Un système hybride est un dispositif de production d'électricité indépendant du réseau électrique central, destiné aux régions reculées sans accès au réseau de distribution d'électricité.

Le système électrique SHSER regroupe diverses sources d'énergie, dont au moins une est de type renouvelable. Ce genre de système peut aussi intégrer un mécanisme de stockage d'énergie.

Dans notre étude nous portons notre attention sur les systèmes à basse puissance constitués de deux composantes majeures : le parc éolien et les panneaux photovoltaïques. Ces deux types d'énergie sont liés à un système de stockage électrochimique et produisent un courant continu, qui peut être aisément transformé en courant alternatif par l'intermédiaire d'un onduleur indépendant intégré au circuit. [33]

2.2. Présentation système hybride :

Plusieurs recherches ont démontré qu'il est possible de combiner différentes sources d'énergies renouvelables pour créer un système hybride, grâce à leur disponibilité et à leur facilité d'utilisation. Donc, ce système constitue une combinaison de deux sources ou plus.

Dans la proposition de système (comme représenter dans la figure II.1), l'éolien et le solaire, deux types d'énergie renouvelable, ont été combinés. Cependant, du fait de l'accessibilité sporadique et de la nature imprévisible de ces deux ressources, il est crucial d'avoir un mécanisme de stockage pour garantir la constance et la durabilité du service au sein de ce système. Pour assurer une fourniture continue d'énergie, ou pour stocker l'énergie excédentaire. Il est équipé d'un dispositif de stockage d'énergie, en l'occurrence une batterie, ce qui a donné lieu à des performances satisfaisantes. Toutefois, son déploiement à petite échelle a été rendu possible grâce à l'utilisation d'un onduleur monophasé, limitant ainsi son application aux charges de faible puissance.

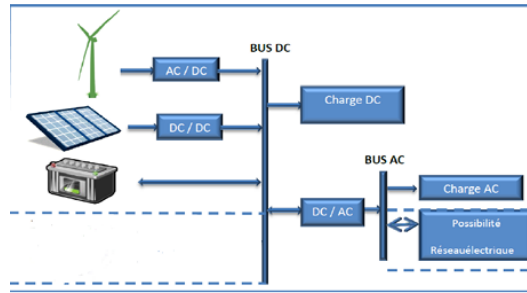


Figure II.1 : système hybride éolien-photovoltaïque

2.3. Système de conversion d'énergie hybride :

Ce système repose sur deux sources d'énergie renouvelable : l'énergie solaire (photovoltaïque) et l'énergie éolienne.

L'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) commande un convertisseur DC/DC qui connecte le générateur photovoltaïque (PV) à la charge. Quant à la turbine éolienne (WT), elle entraîne un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) qui est relié à la charge via un convertisseur AC/DC contrôlé. Les deux sources sont reliées entre elles via un bus à courant continu, comme démontré dans l'illustration suivant : [34]

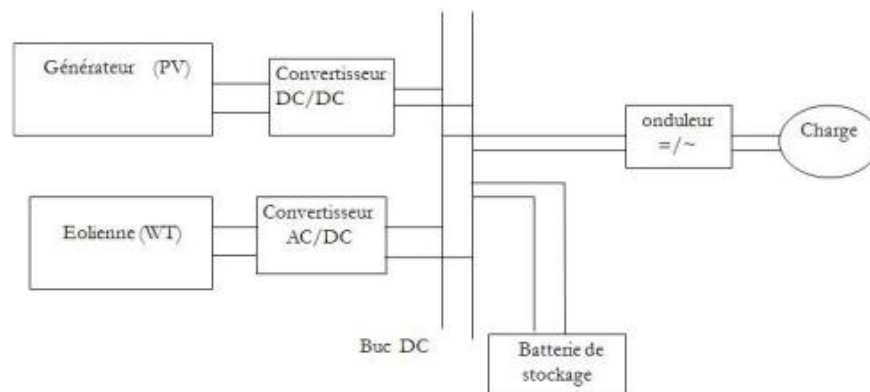


Figure II.2 : Schéma de principe du système hybride photovoltaïque- éolien

2.4. Les avantages d'utilisation de système hybride :

En combinant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage d'énergie, nous obtenons les avantages suivants :

- Le système fonctionne de manière ininterrompue, vous permettant de disposer immédiatement d'une électricité stable à tout moment, sans avoir à faire face aux longs temps d'attente liés à l'élargissement du réseau.
- Option de conserver l'énergie excédentaire générée ;

- L'efficacité énergétique.
- Le prix de l'énergie
- Optimisation de l'équilibre de la production quotidienne par le biais de la complémentarité des deux énergies, qui peuvent se contrebalancer mutuellement.
- Les fluctuations saisonnières offrent un équilibrage naturel de la production d'énergie : les panneaux solaires sont plus efficaces en été, alors que les éoliennes ont une meilleure performance en hiver, période durant laquelle le vent est souvent plus fort.
- Réduire les frais de transport des combustibles.
- Assurance de l'approvisionnement, sans tenir compte des conditions météorologiques
- Favoriser le développement économique et encourager la génération d'emplois à l'échelle régionale. [35]

2.5. Les inconvénients:

- Le coût du capital est supérieur à celui des générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes d'électricité autonomes, demande le stockage par batterie et la régulation de l'électricité.
- Pas encore complètement déployé en production commerciale, il y a peu de fournisseurs.

2.6. Description d'un système hybride :

Le système hybride se compose de trois parties :

La première partie c'est la batterie de stockage d'énergie soutient les sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et l'éolien.

La seconde partie englobe les convertisseurs connectés aux sources de production citées, spécifiquement les convertisseurs DC-AC et DC-DC, dans le but de constituer un bus continu (DC bus).

La troisième section traite de l'onduleur du côté de la charge et de la charge triphasée .

Le système de transformation de l'énergie éolienne en électricité repose sur une turbine et un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG), alors que le dispositif de conversion de l'énergie solaire se compose de panneaux solaires équipés d'un suivi du point de puissance maximale (MPPT). Quand l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques et les éoliennes excède la consommation de la charge, le surplus d'énergie est emmagasiné dans la batterie. Toutefois, si la production d'énergie ne répond pas à la demande, la batterie intervient comme un appui au système en restituant de l'énergie pour maintenir l'équilibre du système et garantir l'approvisionnement en énergie pour le rechargement dans diverses circonstances. [36]

2.7. Classification des systèmes d'énergie hybride

On peut classer les systèmes énergétiques hybrides en fonction de divers critères. Cependant, on privilégie généralement les classifications les plus courantes et les plus appropriées dans le cadre de l'analyse. (comme Figure II.3)

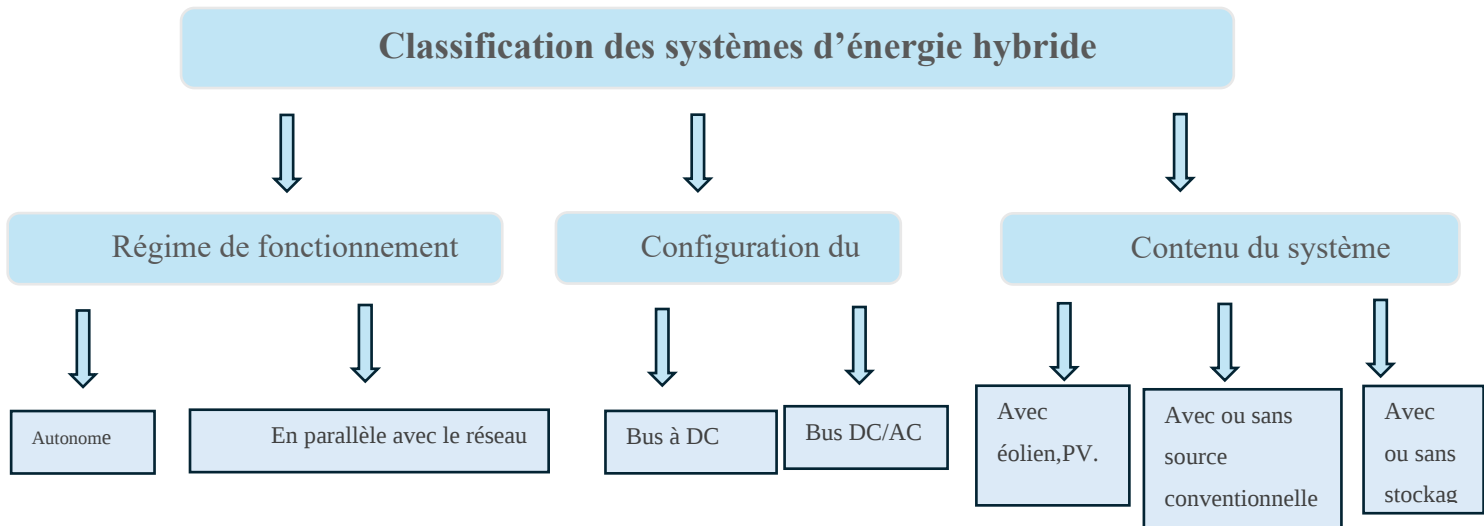


Figure III.3 : Classification des systèmes d'énergie hybrides

2.7.1. Régime de fonctionnement :

Les systèmes d'énergie hybride peuvent être classés en deux types principaux en fonction de l'inclusion ou non d'un système de stockage :

- 2.7.1.1. **Systèmes connectés au réseau** : Ces dispositifs opèrent en coordination avec le réseau national d'électricité, tout en renforçant son approvisionnement.
- 2.7.1.2. **Systèmes autonomes** : Conçus pour fonctionner indépendamment du réseau, ils sont destinés à alimenter en énergie des sites isolés ou éloignés, dépourvus d'accès au réseau électrique. [37]

2.7.2. Contenu du système hybride :

L'analyse d'un système d'énergie hybride repose généralement sur trois critères essentiels :

1. La source d'énergie conventionnelle :

L'existence ou l'absence d'une source d'énergie traditionnelle, comme un générateur diesel, une turbine à gaz, ou toute autre source comparable.

2. Le dispositif de stockage :

L'intégration d'un système de stockage, qui peut garantir une fourniture d'électricité plus stable et sûre, est-elle nécessaire, surtout lorsque la production provenant de sources renouvelables fluctue ?

3. Les sources d'énergie renouvelables utilisées :

Ce critère se rapporte aux types d'énergies renouvelables intégrées dans le système, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ou d'autres sources d'énergie inaltérables.[38]

2.7.3. Configuration du bus :

On utilise principalement ce genre de système hybride dans les zones à climat chaud, où l'ensoleillement est fort.

Ces systèmes visent à fournir de manière ininterrompue de l'électricité aux habitations ou aux édifices administratifs lorsqu'ils opèrent en autonomie.

Certaines configurations permettent d'alimenter des centres de recherche ou d'être raccordées à un réseau électrique et à des systèmes de stockage additionnels.

Les panneaux solaires et les batteries génèrent un courant de type continu. Cependant, les moteurs diesel ont la capacité d'entraîner des générateurs qui produisent soit de l'électricité en courant continu, soit en courant alternatif. [39]

Dans toutes les configurations de systèmes hybrides, un bus de puissance est présent. Il sert à relier en parallèle les différentes sources d'énergie, l'onduleur et le système de stockage.[40]

2.7.3.1. Architecture à bus DC :

Dans une configuration en série, toutes les sources d'énergie sont branchées sur un même bus de courant continu (CC), comme le montre la figure (). Dans ce genre de système, les sources génératrices d'électricité en courant alternatif (CA), à l'instar du générateur éolien ou de la centrale Diesel, sont initialement transformées en courant continu grâce à des convertisseurs AC/DC. (figure II.4)

L'énergie ainsi rectifiée est par la suite dirigée vers le bus CC partagé. Afin de fournir de l'énergie à la charge (c'est-à-dire les dispositifs ou systèmes qui consomment de l'énergie), un onduleur est employé pour convertir le courant continu en courant alternatif (convertisseur DC/AC), correspondant aux exigences des appareils.

Un des inconvénients de cette configuration est que la puissance générée, par le système photovoltaïque (PV) et le générateur à diesel doit évacuer par la batterie avant d'être fournie à la charge. Par conséquent, la batterie se recharge et se décharge régulièrement, ce qui réduit, sa durée de vie.[41]

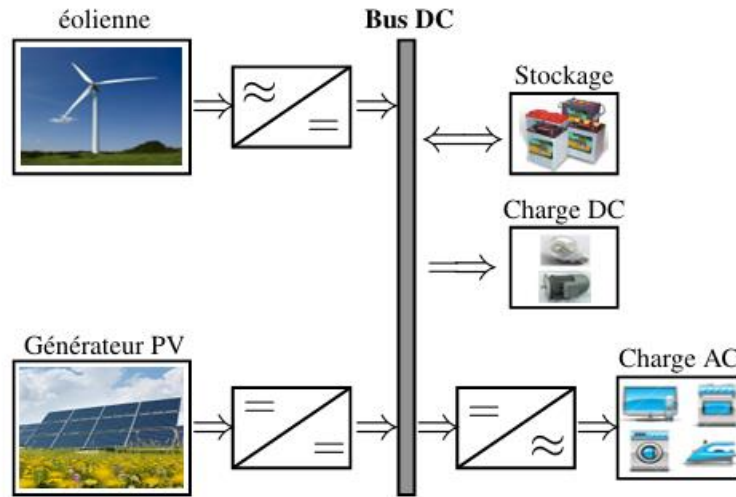


Figure II.4 : Configuration d'un SEH à bus DC

2.7.3.2. Architecture mixte :

Cette configuration (SEH commuté) présente des performances supérieures par rapport à l'architecture à bus DC. Il offre notamment la possibilité pour l'éolienne d'alimenter directement la charge en courant alternatif (AC), ce qui optimise largement l'efficacité générale du système. Les batteries se rechargent lorsqu'il y a un excès de production d'électricité (voir Figure III.5).

En ce qui concerne la conversion d'énergie, un convertisseur bidirectionnel unique peut être utilisé entre les deux types de bus (DC et AC), remplaçant ainsi l'utilisation des deux convertisseurs à sens unique habituellement, présents dans l'architecture classique.

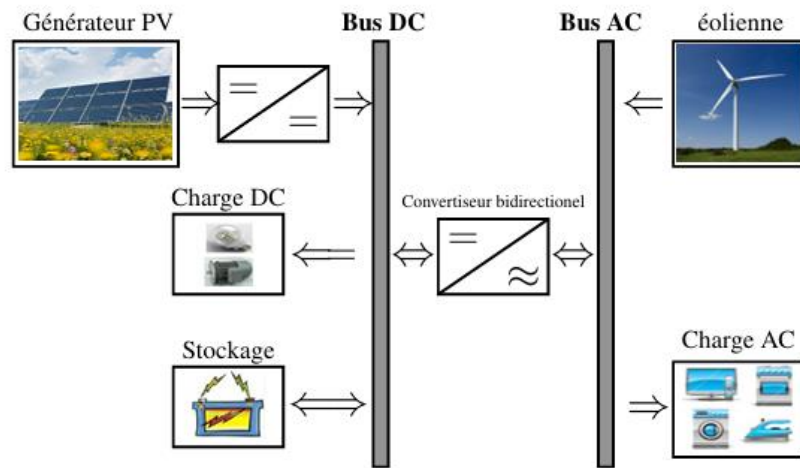


Figure II.5 :Architecture mixte d'un SEH

2.7.3.3. Architecture à bus AC:

Dans une configuration de système hybride parallèle, Le générateur diesel et le générateur d'énergie renouvelable (photovoltaïque et/ou éolien) alimentent directement une partie de la charge en puissance. Ce système utilise un onduleur bidirectionnel qui opère en conjonction avec le générateur diesel. Il peut fonctionner aussi bien en tant qu'onduleur que comme redresseur lorsqu'il est question de charger la batterie.

Le système opère en se utilisant d'énergies renouvelables (solaire + éolienne) quand les conditions sont optimales, autrement dit lorsque le vent est faible ou que l'ensoleillement est trop faible. Si le générateur éolien ou photovoltaïque ne fournit pas assez d'énergie pour la charge, le moteur diesel démarre afin de compenser le déficit en puissance active. Quand la force du vent est assez forte ou que l'ensoleillement est suffisant, le moteur diesel se coupe.[\[20\]](#)

Cette configuration permet de relier toutes les sources d'énergie renouvelable et/ou traditionnelle au réseau AC, ce qui rend l'observation et la gestion du système plus faciles. Dans ce contexte, il est possible d'optimiser la gestion de la charge du système pour maximiser l'efficacité du générateur diesel. [\[42\]](#)

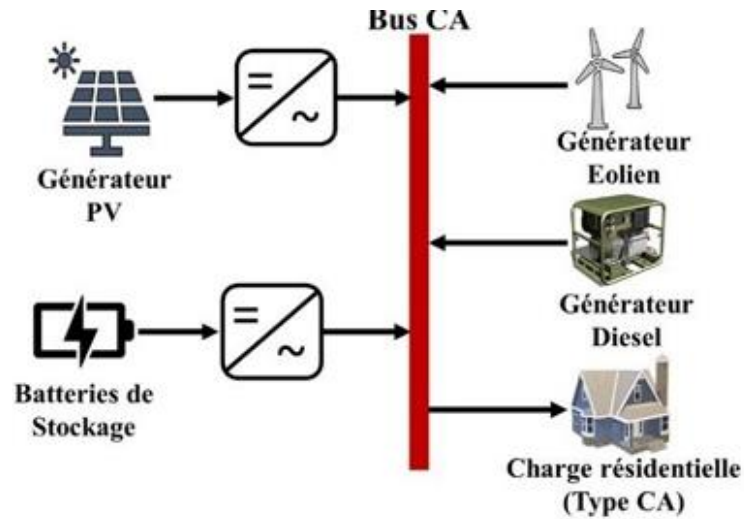


Figure II.6: Configuration SEH à Bus DC [43]

2.8. Principaux composants du système d'énergie PV-éolien :

Les systèmes hybrides éolien-photovoltaïque comprennent habituellement les éléments suivants : (figure II.7)

- Un système de génération.
- Un système de régulation.
- Un système de stockage.
- Convertisseurs
- Une charge.

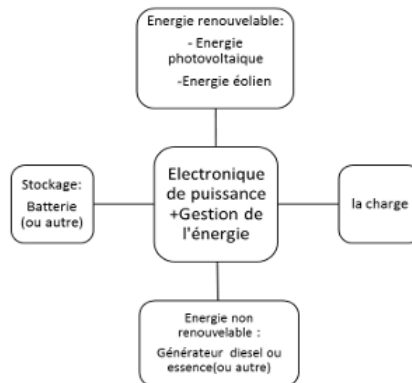


Figure II.7: Principaux composants du SEH

Le système générateur est composé de modules photovoltaïques et d'aérogénérateurs. Il est essentiel que les deux fonctionnent, à la même tension nominale, soit 12 ou 24 V, et en courant continu. La régulation doit considérer que ces deux types d'énergie génèrent des courants de nature différente:

- Le photovoltaïque, assez stable et à seuil bas
- Le vent, très variable.

Le rôle du système de régulation consistera donc à garantir que le générateur opère à son point optimal pour la recharge des batteries. [44]

2.9. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien :

La sélection des éléments dans les divers systèmes d'énergie hybride est conditionnée tant par la disponibilité des ressources locales que par les critères stipulés dans le cahier des charges du projet :

2.9.1. Générateurs photovoltaïques :

Un générateur photovoltaïque repose principalement sur des cellules photovoltaïques, qui génèrent de l'électricité dès qu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Ces cellules sont écologiques, ne contiennent aucune pièce en mouvement, nécessitent un entretien minimal, et ne produisent aucun bruit.

2.9.2. Générateur éolien :

On définit un système éolien, aussi connu sous les noms d'aérogénérateur ou simplement éolienne, comme un dispositif destiné à transformer une portion de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique et ensuite en énergie électrique.[45]

La plupart des aérogénérateurs, surtout les modèles de grande dimension, fonctionnent avec un axe horizontal. Les modèles verticaux ne constituent qu'une portion négligeable du marché. On peut installer les grandes éoliennes soit individuellement, soit en assemblages formant des parcs éoliens comprenant au moins dix unités, et parfois plusieurs centaines.[46]

Chaque élément d'une éolienne est spécifiquement élaboré pour maximiser la conversion de l'énergie. Pour cela, il est crucial d'établir une adéquation entre les caractéristiques couple-vitesse de la turbine et celles du générateur électrique.[47]

2.9.3. Dispositif de stockage

Les ressources naturelles ne sont pas accessibles de manière constante tout au long du jour. C'est pour cette raison qu'il est conseillé d'opter pour un système de stockage d'énergie, assurant ainsi une fourniture ininterrompue d'électricité. Pour stabiliser les fluctuations de puissance sur de courtes durées, plusieurs techniques existent qui visent le même but, telles que :

- Le stockage chimique : comme les batteries ;
- Le stockage mécanique : à l'exemple du volant d'inertie ;
- Le stockage hydraulique : grâce aux les stations de transfert d'énergie par pompage

Les batteries sont parmi les dispositifs de stockage d'énergie les plus couramment employés.

Les batteries plomb-acide sont les plus répandues, grâce à leur coût abordable et leur technologie bien établie.

Toutefois, les batteries nickel-cadmium sont rarement préférées, surtout à cause de leur prix plus élevé et de l'effet environnemental du cadmium.

Bien que les autres solutions soient généralement efficaces, elles requièrent souvent des conditions spécifiques pour leur application. Cependant, les accumulateurs ont l'avantage de nécessiter peu d'espace et de ne pas requérir des infrastructures hydrauliques importantes.

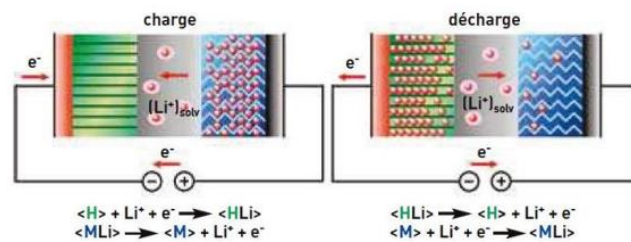


Figure II.8 : principe de fonctionnement d'une batterie Li-Ion [48]

2.9.4. Les convertisseurs :

Les convertisseurs sont des appareils qui assurent la conversion du courant électrique, allant du continu à l'alternatif et vice versa. Ils ont également une importance cruciale dans la gestion de la charge des batteries dans les systèmes énergétiques hybrides et pour la conversion du courant continu en alternatif et vice-versa, y compris ceux qui font appel à des ressources énergétiques renouvelables: [48]

2.9.4.1. Les hacheurs (CC/CC) :

Les hacheurs, qui sont des composants des convertisseurs, ont un rôle essentiel dans la transformation de courant continu en courant continu (CC/CC). Ils ont pour rôle principal de gérer la tension entre deux sources de courant continu, ce qui est primordial dans les usages nécessitant une modulation exacte de la tension de sortie afin de s'adapter aux demandes spécifiques des charges ou des circuits électriques.

2.9.4.2. Les redresseurs (AC/CC) :

Dans les systèmes hybrides d'énergie solaire et éolienne, les dispositifs qui transforment le courant alternatif en courant continu ont une importance capitale. Leur rôle principal consiste à recharger les batteries à partir d'une source de courant alternatif. Ces dispositifs se caractérisent par leur simplicité, leur prix abordable et leur rendement énergétique. [49]

2.9.4.3. Les onduleurs (CC/AC) :

L'onduleur convertit le courant continu issu de la batterie en courant alternatif, nécessaire pour le fonctionnement de la plupart des appareils électriques domestiques. Il est essentiel de sélectionner un onduleur approprié, car la forme d'onde qu'il produit pourrait ne pas convenir à certains équipements. En outre, l'onduleur doit être en mesure de gérer le pic de puissance lors du démarrage de ces dispositifs. On conseille d'opter pour un onduleur à efficacité élevée et de le positionner au plus près de la batterie afin de réduire les pertes électriques dues aux fils.

2.9.5. Les charges :

Les charges électriques permettent d'exploiter la puissance électrique au sein d'un système. On identifie essentiellement deux catégories de charges : les résistives et les inductives. Les charges résistives, comme les lampes à incandescence ou les chauffe-eaux, n'utilisent que de la puissance active. cependant, les équipements exploitant des machines électriques manifestent un comportement à la fois résistif et inductif, ce qui les positionne comme de grands consommateurs de puissance réactive.

En ce qui concerne les charges en courant continu (CC), elles peuvent aussi comporter des composants inductifs. Toutefois, ces éléments n'entraînent généralement que des fluctuations temporaires de tension et de courant qui apparaissent lors des transitions d'état du système.

2.10. Les configurations des systèmes énergétiques hybrides fréquentes :

Les installations d'énergie solaire hybride combinent l'énergie solaire issue du système photovoltaïque à une autre source d'énergie, comme l'énergie éolienne, pour la production d'électricité. En raison de leurs progrès technologiques, ces deux types d'énergie se classent parmi les plus fréquemment employés dans les systèmes hybrides. Pour remédier aux soucis

d'intermittence, il est possible d'incorporer un générateur diesel ou un mécanisme de stockage au dispositif d'approvisionnement en énergie.[48]

2.10.1. PV-Batterie (Autonome) :

Les systèmes photovoltaïques autonomes, connus également sous le nom de systèmes isolés, ont la capacité de fonctionner indépendamment du réseau électrique. On les utilise couramment dans des régions éloignées dépourvues de liaison au réseau.

L'illustration présente deux variantes de ces systèmes : l'une dotée d'un bus AC, l'autre d'un bus DC. Ces dispositifs incluent des panneaux photovoltaïques, des contrôleurs de charge dotés de la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking), une batterie, un transformateur DC/DC et un inverseur DC/AC. [50]

Le convertisseur DC/DC bidirectionnel donne la possibilité de fournir de l'énergie au réseau tout en rechargeant la batterie depuis celui-ci. Si un dysfonctionnement se produit sur le réseau, le système doit être capable de se débrancher de lui-même et de poursuivre son fonctionnement en toute autonomie.

La fiabilité du système repose sur une dimension adaptée, tenant compte de la capacité des panneaux solaires, des exigences énergétiques des charges, de l'emplacement géographique et de l'intensité lumineuse.[51]

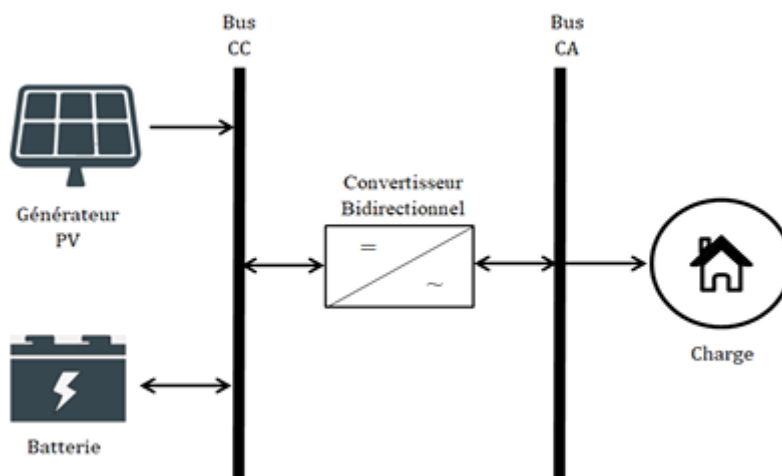


Figure II.9: SEH PV/Batterie. [48]

2.10.2. Eolien-Batterie :

Le dispositif que l'on décrit ici se compose d'une installation de stockage d'énergie reliée à un générateur éolien. Selon son usage, cet appareil peut servir à deux fins principales :

2.10.2.1. Rôle de tampon :

Quand le système opère de concert avec le réseau électrique, l'appareil de stockage contribue à atténuer les variations brusques de la production énergétique de l'éolienne. Cela contribue à assurer une fourniture d'électricité stable, empêchant des fluctuations abruptes susceptibles de déséquilibrer le réseau électrique.

2.10.2.2. Rôle de stockage à long terme :

En mode autonome, quand le système fonctionne indépendamment du réseau, le mécanisme de stockage permet de garder l'énergie supplémentaire générée lors des périodes de forte production éolienne. Cette énergie peut être exploitée ultérieurement pour fournir de l'énergie aux charges en cas de faiblesse ou d'absence de vent.

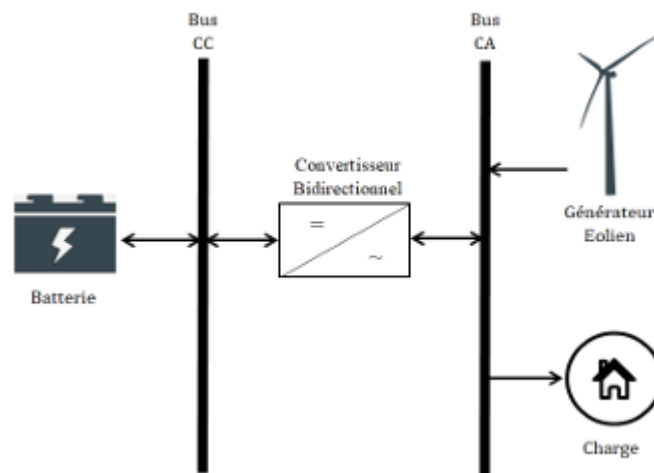


Figure II.10: SEH Eolien/Batterie [48]

2.10.3. Système Hybride (Eolien+ Photovoltaïque) :

Quand le site bénéficie de conditions optimales en termes de rayonnement solaire et de vent, un système qui fusionne deux types d'énergies renouvelables, tel que le solaire et l'éolien, présente une fiabilité supérieure à celle d'un système basé uniquement sur une source.

L'efficacité de ces dispositifs mixtes est fortement influencée par les fluctuations climatiques locales, d'où la nécessité d'une estimation précise des ressources solaires et éoliennes pendant toute l'année. Le système requiert un stockage de l'énergie surplus par le biais de batteries. L'inverseur est chargé de transformer l'énergie du courant continu (DC) en courant alternatif (AC), alors qu'un régulateur de charge supervise le processus de stockage.

Ce genre de système hybride est généralement conçu pour les applications de haute puissance, qui excèdent les 50 kW.[52]

Quand la demande électrique est inférieure que la production combinée de l'éolienne et du système solaire, le surplus d'énergie se stocke dans les batteries.

Si la demande augmente, le générateur photovoltaïque se met en marche pour compléter la production afin de répondre à la charge.

En définitive, quand la demande excède la capacité de production des deux sources d'énergie renouvelables, l'énergie requise est extraite du système de stockage. [53]

Dans ce cas, l'absence de batteries de stockage rend le système totalement tributaire des énergies renouvelables, opérant en fonction des conditions météorologiques. [54]

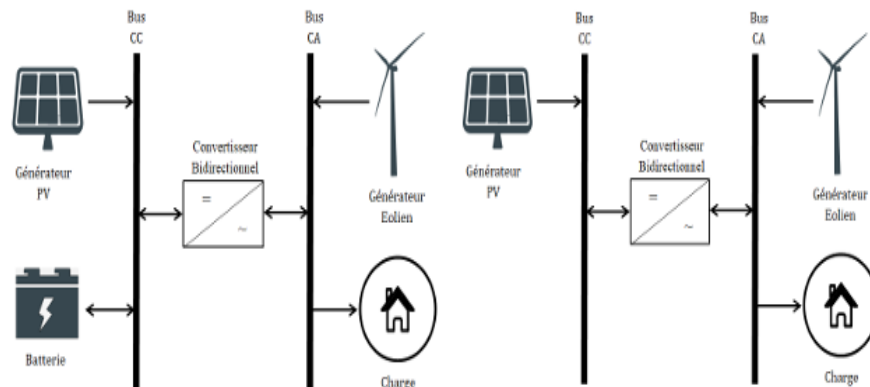


Figure II.11: SEH Eolien/PV avec et sans système de stockage. [48]

2.10.4. PV-Eolienne-Générateur diesel :

Toutes les sources d'énergie, qu'elles soient renouvelables, conventionnelles ou de stockage, sont connectées au bus alternatif. Ce dispositif est déployé dans diverses régions du globe et se prête tout particulièrement à une production décentralisée. L'ajout d'un générateur à diesel renforce la fiabilité du dispositif et diminue le besoin en batteries, ce qui contribue à réduire le coût de production de l'électricité.

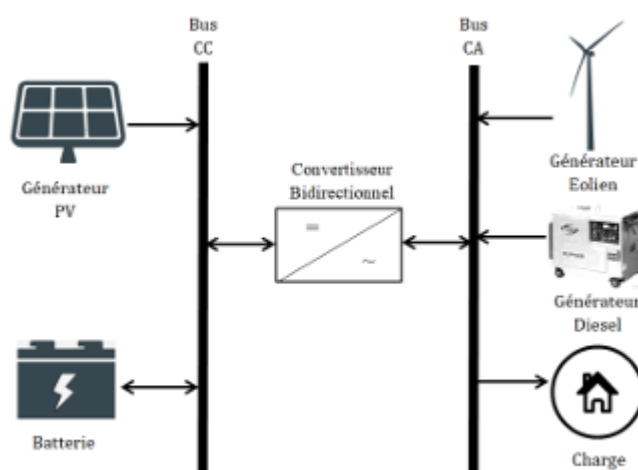


Figure II.12: SEH PV-Eolienne-Générateur diesel. [48]

2.11. Point de puissance maximale (MPP) :

Le point de puissance maximale MPP peut être identifié à l'aide de différentes techniques, comme la méthode des rectangles, qui vise à déterminer le rectangle le plus grand pouvant s'inscrire sous la courbe I-V. Les côtés du rectangle représentent le courant et la tension, dont le produit illustre la puissance $P=V \cdot I$

Selon sa définition, une commande MPPT, liée à une phase intermédiaire d'adaptation, autorise l'exploitation d'un générateur photovoltaïque pour assurer la production constante de sa puissance maximale. Par conséquent, peu importe les conditions climatiques (température et ensoleillement), la gestion du convertisseur positionne le système à son point de fonctionnement maximal (V_{mpp} , I_{mpp}). [55]

L'adaptation d'impédance est généralement réalisée à l'aide d'un convertisseur DC-DC, comme illustré dans la figure II.12.

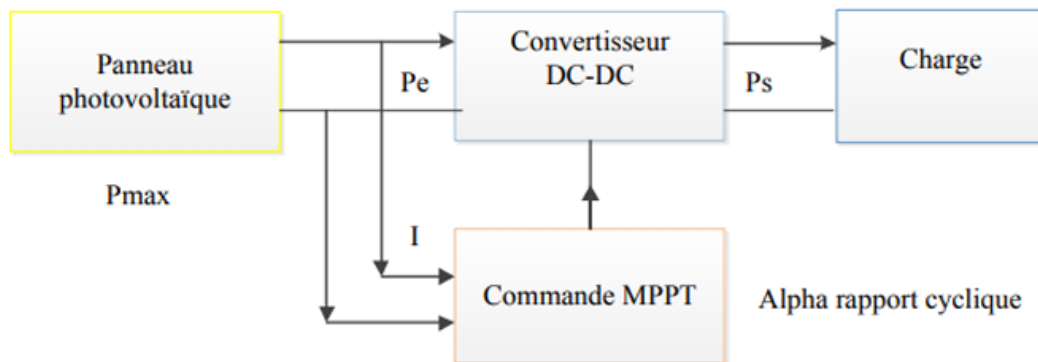


Figure II.13 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT

2.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons classé les systèmes hybrides en fonction des sources utilisées et de la façon dont ils sont reliés, De plus nous avons fourni une explication des éléments du système hybride photovoltaïque-éolien, en l'importance de chaque élément dans l'optimisation des performances

Ce cadre théorique sert de base essentielle pour passer à l'étape pratique, qui implique la modélisation et la simulation du système hybride étudié .

Chapitre III :
Modélisation et
simulation des
systèmes
photovoltaïque
et éoliens

3.1. Introduction :

La modélisation des systèmes photovoltaïques et éoliens consiste à représenter une fonction ou un processus technologique à l'aide de modèles mathématiques. Cette approche facilite l'examen du comportement du système dans diverses conditions pour évaluer ses performances et assurer la fonctionnalité de tous ses éléments. Elle a aussi pour objectif d'étudier certains paramètres, de les améliorer tout en tenant compte de contraintes particulières.

Par conséquent, la modélisation est cruciale pour renforcer l'efficacité des systèmes et assurer leur performance optimale en vue de satisfaire les exigences énergétiques. Dans cette section, nous nous sommes efforcés de modéliser et de simuler les systèmes photovoltaïque et éolien. Chaque élément du système étudié a été simulé en utilisant le logiciel MATLAB, ce qui a facilité l'analyse et la gestion du système hybride dans différentes conditions.

3.2. Modélisation d'un système hybride éolien– photovoltaïque :

La modélisation est un instrument crucial pour exprimer mathématiquement une fonction ou un processus technique. Elle a pour but d'examiner théoriquement le comportement de certains paramètres, et de les optimiser tout en considérant une contrainte particulière. Dans ce cadre, la modélisation est essentielle pour créer un lien entre l'énergie générée par le système mixte éolien-solaire et les besoins de l'utilisateur. [55]

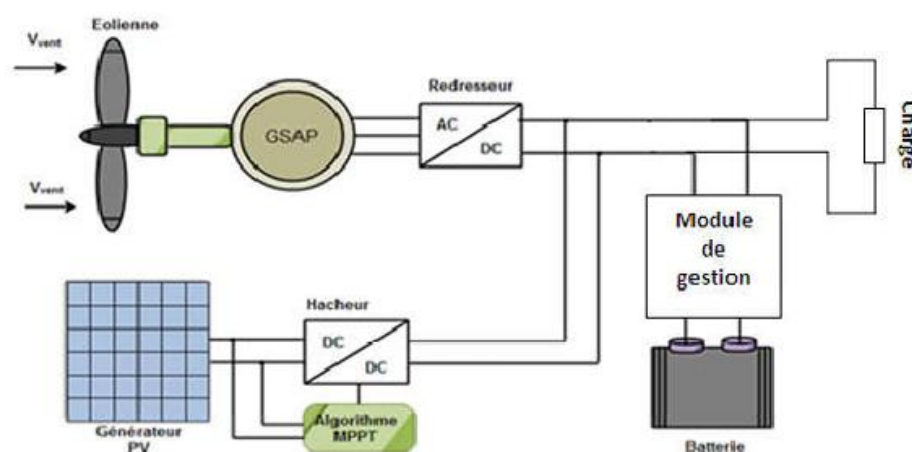


Figure III.1 : Système hybride d'énergie renouvelable. [66]

3.2.1. Système de conversion de l'énergie solaire :

Le dispositif comprend un panneau solaire qui transforme l'énergie solaire en électricité, un convertisseur DC-DC et un système de contrôle MPPT, comme illustré dans la figure III.2 :

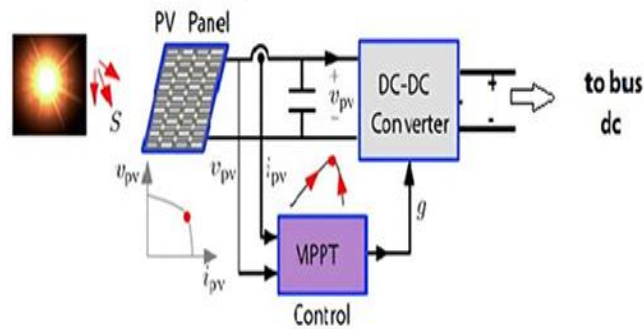


Figure III.2 : Modèle d'un système de conversion PV. [56]

3.2.2. Modèle De la cellule photovoltaïque (PV) :

Le choix judicieux d'un circuit électrique équivalent est crucial pour la modélisation des cellules photovoltaïques. Pour élaborer un modèle de cellule photovoltaïque sûr et fiable, il est crucial de saisir à la fois la constitution physique des éléments de la cellule et leurs propriétés électriques, avec un degré de précision variable en fonction des exigences.

En ce sens, plusieurs modèles mathématiques ont été conçus pour simuler le comportement hautement non linéaire provenant des jonctions semi-conductrices, qui constituent l'élément central de ces appareils. Ces modèles se différencient par les techniques de modélisation employées et par le nombre de paramètres pris en compte lors du calcul du courant et de la tension de la cellule.

Deux modèles couramment employés pour représenter un générateur photovoltaïque (GPV) sont présentés dans:

- Le modèle à une diode (modèle à simple exponentielle),
- Le modèle à deux diodes (modèle à double exponentielle). [57]

3.2.2.1.Modèle à une diode :

Une cellule photovoltaïque idéale peut être modélisée comme une source de courant idéale produisant un courant photoélectrique I qui est proportionnel à la puissance de l'éclairement, branchée en parallèle avec une diode comme illustré dans la figure III.3, Cependant, pour un modèle plus réaliste, il est indispensable de considérer les effets de résistance de la cellule. Ils sont représentés par une résistance en série R_s , qui symbolise les pertes ohmiques, et une résistance en parallèle R_{sh} , qui exprime les courants de fuite à l'intérieur de la cellule. [58]

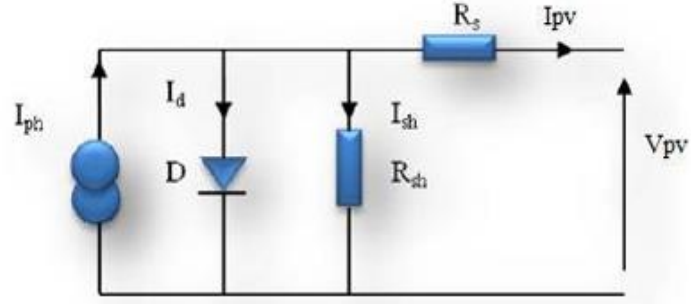


Figure III.3: Modèle de la cellule PV avec une seule diode

À partir de la loi de Kirchhoff on trouve l'équation du courant de cellule I_{pv} (Ampère):

$I_{pv} = I_{ph} - I_{sh} - I_d$ Soit:

I_{ph} : Photo-courant généré par la cellule

$$I_{ph} = I_{cc} \frac{\psi}{1000} \quad (16)$$

I_{sh} : Le courant dérivé via la résistance de shunt

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} \quad (17)$$

I_d : Le courant traversant la diode :

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + R_s \cdot I_{pv})}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (18)$$

Sur la base de ces diverses équations, on peut dériver l'expression implicite du courant généré par une cellule photovoltaïque, en plus de sa caractéristique courant-tension :

$$I_{pv} = I_{cc} \frac{\psi}{1000} - \frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{R_{sh}} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s \cdot I_{pv})}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

- V_{pv} : Tension de la cellule photovoltaïque, en volts [V].
- T : Température de jonction, exprimée en kelvins [K].
- q : Constante de charge de l'électron, égale à $1,602 \times 10^{-19}$ coulombs [C].
- I_0 : Courant de saturation inverse de la diode, en ampères [A].
- k : Constante de Boltzmann, égale à $1,38 \times 10^{-23}$ joules par kelvin [J/K].
- n : Facteur d'idéalité de la cellule photovoltaïque, généralement compris entre 1 et 5.

3.2.2.2. Modèle à deux diodes :

On peut représenter le fonctionnement d'une cellule solaire à travers le schéma électrique équivalent présent dans la figure. Ce modèle est basé sur l'expression mathématique d'un circuit qui incorpore deux diodes branchées en parallèle, définies par leurs courants de saturation I_{s1} et I_{s2} respectifs, ainsi que leurs facteurs d'idéalité n_1 et n_2 . Le circuit comprend aussi une source de courant qui produit un photo-courant I_{ph} directement lié à l'irradiance solaire.

La valeur de la résistance en série R_s est calculée à partir de l'inverse de la pente de la courbe $I(V)$ pour une tension V correspondant à V_{co} . Idéalement, ce terme doit être le plus faible possible afin de limiter son impact sur le courant de la cellule.

La résistance parallèle (ou shunt), aussi appelée R_{sh} , se réfère à la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur, liée à un défaut. [57]

Le modèle à deux-diodes est représenté par une équation caractéristique est directement dérivée de la loi de Kirchhoff : $I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} = I$

I_{ph} : Courant photonique

I_{d1} : Courant dans la diode 1

I_{d2} : Courant dans la diode 2

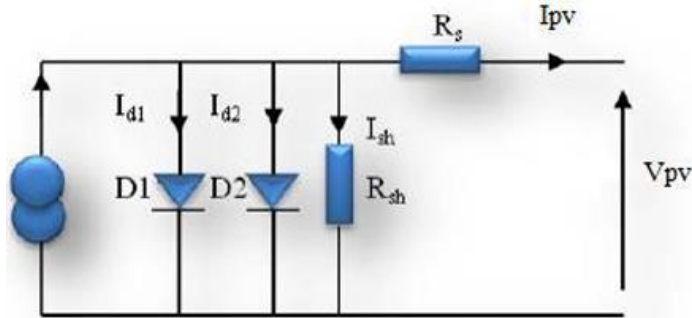


Figure III.4 : Modèle de la cellule PV avec deux diodes

$$I_{d1} = I_{s1} \left[\exp \left(\frac{V_d}{n_1 V_t} \right) - 1 \right] \quad (20)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left[\exp \left(\frac{V_d}{n_2 V_t} \right) - 1 \right] \quad (21)$$

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (22)$$

Avec: $V_t = \frac{KT_c}{q}$ soit : T_c : La température de cellule.

Ainsi, l'expression suivante décrit le courant électrique généré par la cellule :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t n_1} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t n_2} \right) - 1 \right] - \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (23)$$

3.2.3. Caractéristique électrique d'une cellule photovoltaïque:

Dans une cellule photovoltaïque, deux types de courants se manifestent : le courant photo qui provient de l'absorption de la lumière et le courant d'obscurité qui découle de la polarisation électrique du dispositif.

Le courant-tension d'une cellule en absence de lumière correspond à celui d'une cellule exposée à la lumière, mais sans l'apport du courant photo produit. [59]

3.2.4. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire:

3.2.4.1. Puissance optimale :

L'optimisation du produit courant-tension permet d'obtenir la puissance utile maximale, soit :

$$\frac{I_m}{V_m} = - \left(\frac{dI}{dV} \right) M \quad (24)$$

L'expression de la puissance des panneaux photovoltaïques se fait en Watts crête. Cette dernière indique la capacité qu'un module peut délivrer lorsqu'il est en phase avec sa charge nominale (optimale). [59]

3.2.4.2. Facteur de forme FF :

C'est le rapport entre la puissance maximale accessible à une cellule et la puissance qu'on pourrait théoriquement obtenir (puissance optimale) :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_{opt}} = \frac{V_m I_m}{I_{cc} V_{co}} \quad (25)$$

Il dépeint l'impact Mixte de résistances en série et en parallèle sur la caractéristique $I=F(V)$ [59]

3.2.4.3. Courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit est défini comme le courant pour lequel la tension à la cellule est inexistante. Dans l'idéal (avec une résistance série R_s est nulle et une résistance de shunt R_{sh} infinie), ce courant correspond essentiellement au courant photo-généré I_{ph} . [60]

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{R_i I_{cc}}{n V_t} \right) - 1 \right] - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (26)$$

$$\text{Alors : } I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (27)$$

3.2.4.4.Tension en circuit ouvert V_{co} :

La tension à circuit ouvert se mesure lorsque le courant traversant la cellule est nul. Elle est conditionnée par la barrière d'énergie et la résistance en dérivation et diminue avec la température et change peu avec l'intensité de la lumière : [60]

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{co}}{nV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (28)$$

Dans le cas idéal, sa valeur devrait être un peu moins que :

$$V_{co} = V_t \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (29)$$

3.2.4.5.Rendement énergétique maximum η_m :

Le rendement énergétique maximum est le rapport de la puissance maximale délivrée (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire qui arrive en incidence (P_i).

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m \cdot V_m}{S \phi} = \frac{P_{max}}{P_{opt}} \quad (30)$$

S: Surface de la cellule solaire.

ϕ : Flux incident.

(I_m, V_m): Coordonnées de point de fonctionnement.

On peut améliorer ce rendement en haussant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. [61]

3.2.5. Groupement des cellules solaires :

3.2.5.1.Module photovoltaïque :

Les charges généralement utilisées nécessitent des tensions plus élevées que celles fournies par les cellules élémentaires, il est donc nécessaire de considérer des assemblages. Afin d'y parvenir, les cellules sont regroupées pour constituer un module.

Le raccordement en série de plusieurs cellules augmente la tension tout en maintenant le même courant, tandis que le branchement en parallèle amplifie le courant tout en préservant la tension.

Un panneau solaire est typiquement constitué d'un ensemble de 36 cellules connectées en série, elles sont protégées de l'eau par une couche de verre et de plastique. Le tout est par la suite équipé d'un châssis et d'une boîte de raccordement électrique. [62]

3.2.5.2.Panneau photovoltaïque:

Pour obtenir une puissance de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts, avec une tension appropriée, il est indispensable d'arranger les modules en série (pour augmenter la

tension) et en parallèle (pour accroître le courant) afin de constituer un panneau ou un champ photovoltaïque.

La quantité d'énergie générée par chaque composant du panneau PV est influencée par :

- La demande en électricité.
- La taille du panneau .
- L'exposition au soleil de l'endroit où il est installé .
- La période de l'année pendant laquelle il est utilisé. [63]

3.2.6. Système de conversion de l'énergie éolien :

Ce système fonctionne en captant l'énergie cinétique du vent grâce à des turbines spécialement conçues pour la faire tourner. Cette turbine est ensuite connectée au générateur (PMSG), qui convertit l'énergie cinétique en énergie électrique. Ce type de générateur a été choisi pour son faible coût et sa facilité d'entretien.

Cette énergie produite est envoyée à la charge ou au réseau par l'intermédiaire de plusieurs transformateurs, comme le montre la figure. La diode est utilisée pour redresser la sortie triphasée du générateur. Le niveau de tension est augmenté par un amplificateur de courant continu. [56]

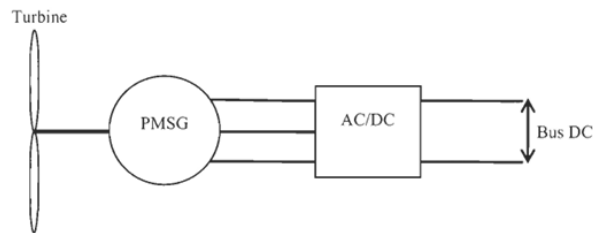


Figure III.5: Chaîne de conversion éolienne [64]

3.2.7. Modèle de la turbine éolienne :

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne est illustré sur la figure III :

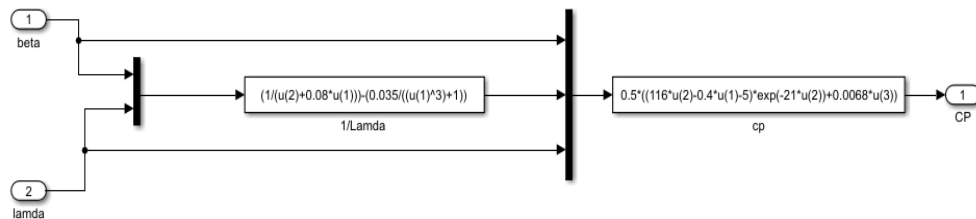


Figure III.6 : Configuration d'une éolienne

L'énergie produite par les éoliennes est donnée par l'équation suivante

$$P = \frac{1}{2} \rho s C_P(\beta, \lambda) v^3 \quad (31)$$

ρ : La densité de l'air

S : la surface

λ : Le rapport de vitesse de pointe

β : L'angle de tangage

V^3 : la vitesse du vent

Le coefficient de puissance CP est donné par la relation :

$$C_P = (\beta, \lambda) = c_1 \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3} \right)} + c_6 \lambda \quad (32)$$

$$c_1 = 0.5$$

$$c_4 = 5$$

$$c_2 = 116$$

$$c_5 = 21$$

$$c_3 = 0.4$$

$$c_6 = 0.0068$$

La courbe de $C_P(\lambda)$ pour la valeur de β (deg) obtenue par la relation est représentée dans la figure III.7 :

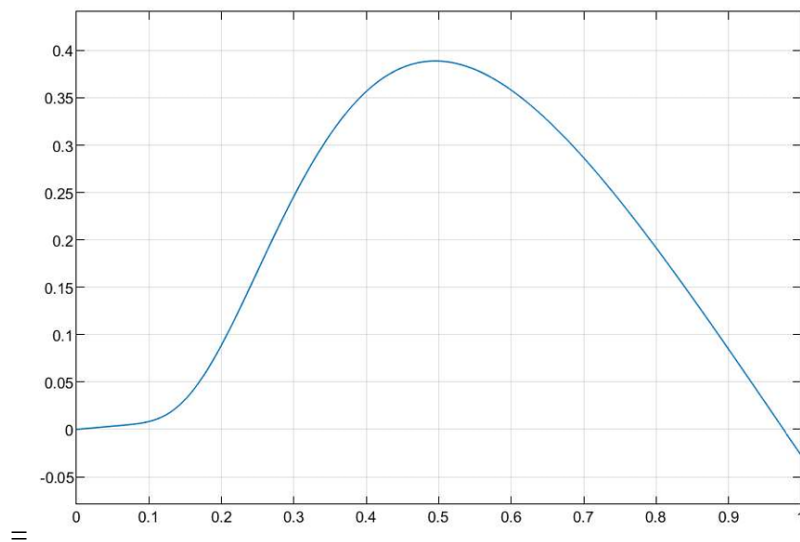


Figure III.7 : Courbe du coefficient CP (λ, β)

La formule de la puissance aérodynamique au niveau du rotor est donc exprimée par :

$$P_t = C_p \cdot P_{pv} \quad (33)$$

3.2.8. Modélisation générateur synchrone à aimant permanent :

La modélisation des générateurs est essentielle en particulier pour le designer que pour l'automaticien. On l'utilise généralement pour étudier le comportement du système.

En général, les générateurs à courant alternatif sont représentés par des équations non linéaires (équation différentielle). Cette non-linéarité est attribuée aux inductances ainsi qu'aux coefficients des équations dynamiques qui sont fonction de la position du rotor et du temps.

Il est nécessaire de simplifier le modèle (figure III.8) en effectuant une conversion triphasée-biphasée. [65]

La puissance active : $P = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}$

La puissance réactive : $Q = u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}$

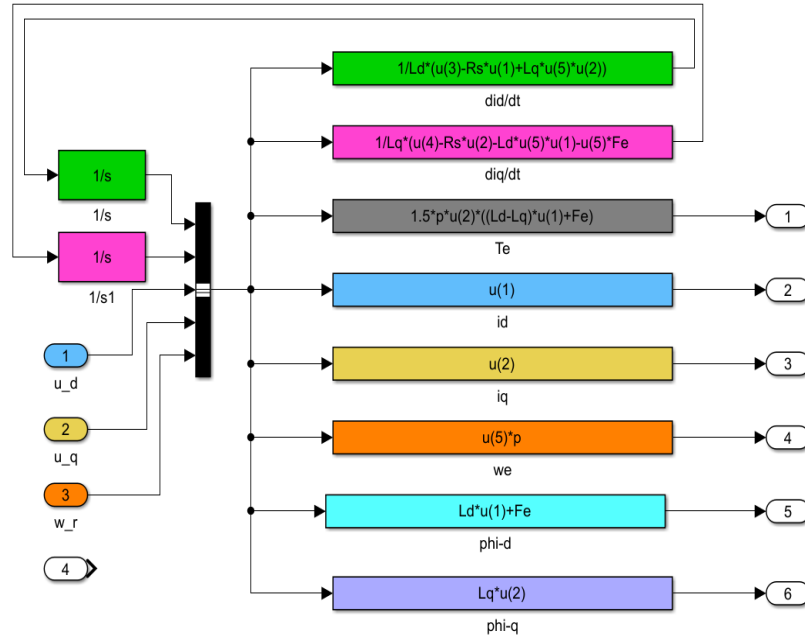


Figure III.8 : générateur à aimant permanent en Matlab/Simulink

3.2.9. Modélisation du système de stockage :

L'énergie est souvent stockée dans les systèmes hybrides de petite taille afin de fournir une alimentation à la charge pour une période prolongée (des heures, voire des jours). On l'utilise parfois également avec les SEH reliés à d'importants réseaux de courant alternatif isolé. Dans ce contexte, il sert à supprimer les variations de puissance à court terme. [61]

On utilise habituellement des batteries pour le stockage d'énergie, vue la grande diversité de type d'éléments de batterie ainsi le nombre très varié de paramètres qui interviennent,

Une représentation hautement empirique du comportement de la batterie peut être formulée. On trouve divers types de modèles pour la charge de batterie. [62]

3.2.9.1. Modèle de la charge de la batterie :

Lorsque la puissance de production du générateur photovoltaïque dépasse la consommation, les batteries se chargent. La capacité des batteries à un instant donné t peut être décrite par :

$$C_{Bat}(t) = C_{Bat(t)}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + (P_{pv}(t) - \frac{PL(t)}{\eta_{ond}}) \cdot \eta_{Bat} \quad (34)$$

$C_{Bat}(t)$: la quantité de la charge de batterie au temps (t) e

$C_{Bat}(t-1)$: la quantité de la décharge de batterie au temps $(t-1)$

P_{pv} : la puissance de générateur PV

PL : la charge demandée au temps t

η_{Ond} : le rendement de l'onduleur

η_{bat} : le rendement de la batterie

Le rendement varie entre 0.65_0.85 selon le chargeant courant Durant le chargement de la batterie. [55]

3.2.9.2.Modèle de la décharge de la batterie :

Lorsque la demande de charge dépasse la puissance générée, la capacité des batteries à un instant t peut s'exprimer comme suit :

$$C_{\text{Bat}}(t) = C_{\text{Bat}}(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(\frac{PL(t)}{\eta_{\text{inv}}} - P_{pv}(t) \right) \quad (35)$$

Pendant le processus de décharge de la batterie , le rendement de batterie égal à 1.

La quantité de charge des batteries est réduit aux restrictions suivantes :

$$C_{\text{Bat min}} \leq C_{\text{Bat}}(t) \leq C_{\text{Bat max}}$$

La capacité maximale de la batterie est équivalente à sa capacité nominale

($C_{\text{Bat max}} = C_{\text{Bat min}}$) tandis que la capacité minimale est définie par la profondeur de la charge (DOD).

$$C_{\text{Bat min}} = \text{DOD} \cdot C_{\text{Bat.N}} \quad (36)$$

Si DOD prend les valeurs de 30-50% la durée de vie des batteries peut être prolongée au maximum. [55]

3.2.9.3.La tension de la batterie :

Le modèle suivant, décrit la relation entre le voltage, courant et l'état de charge .Ce modèle est construit sur la base du schéma électrique présenté dans la figure : [55]

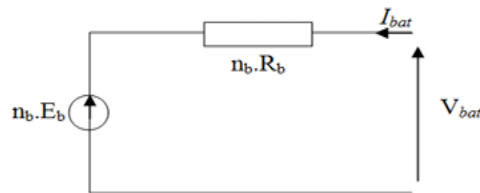


Figure III.9: Schéma électrique équivalent de nb élément de batterie en série

3.3. Simulation système hybride PV-éolien :

La simulation d'un système hybride éolien-photovoltaïque permet d'étudier le comportement dynamique du système, d'améliorer sa conception et d'évaluer ses performances sous des conditions météorologiques spécifiques. L'outil de simulation MATLAB se présente comme une plateforme robuste et adaptable pour le développement et

l'analyse de ces systèmes complexes. Il permet de modéliser mathématiquement les divers composants (panneaux solaires, éoliennes, convertisseurs, batteries, charges, etc.), de les relier entre eux et de simuler leurs interactions dans le temps.

3.3.1. Méthodologie et gestion de l'énergie :

La partie suivante explique la méthodologie utilisée pour modéliser un système hybride d'énergie renouvelable, combinant l'éolien et le photovoltaïque (PV) avec un stockage par batterie, conçu pour deux emplacements en Algérie : Mila et Adrar.

La simulation s'appuie sur les données météorologiques moyennes mensuelles pour évaluer la production d'énergie et l'interaction avec le réseau, fournissant ainsi un cadre solide pour optimiser le déploiement des énergies renouvelables.

3.3.2. Données et paramètres du système :

Les données météorologiques, y compris la vitesse du vent, l'irradiation solaire (GHI) et la température ambiante, proviennent de la base de données POWER de la NASA, couvrant une période de 30 ans (1984-2013). Couvrant une période de 30 ans (1984-2013). Pour Mila (latitude 36,25°N, longitude 6,25°E),

La vitesse du vent a varié de 4,07 m/s (juin-juillet) à 5,72 m/s (décembre), avec une moyenne annuelle d'environ 4,82 m/s. L'irradiation solaire a atteint un maximum de 7,80 kWh/m²/jour en juillet, et les températures ont varié de 10°C (janvier) à 27°C (juillet-août), avec une moyenne annuelle de 17,83°C. Pour Adrar (latitude 27,75°N, longitude-0,25°E), la vitesse du vent a varié de 6,07 m/s (décembre) à 6,80 m/s (juillet-août), avec une moyenne annuelle de 6,346 m/s. L'irradiation solaire a atteint 7,934 kWh/m²/jour en juin, et les températures ont varié de 15°C (janvier) à 39°C (juillet), avec une moyenne annuelle de 25,23°C.

Les paramètres du système comprenaient une charge constante de 2 GW, ciblant 24 GWh/jour chacun provenant de l'éolien et du photovoltaïque, soutenus par une batterie d'une capacité de 4 heures (8 GWhs). Les éoliennes (Vestas V164-9,5 MW) fonctionnaient à une vitesse d'entrée de 3 m/s, à une vitesse nominale de 12 m/s et à une vitesse de sortie de 25 m/s. Vitesse nominale de 12 m/s et une vitesse de coupure de 25 m/s, avec un rendement (η_{wind}) de 0,4. de 0,4. Les panneaux photovoltaïques avaient un rendement (η_{pv}) de 0,2, ajusté en fonction de la température, avec une température nominale de fonctionnement de la cellule (NOCT) de 45°C et un coefficient de température de 0,004/°C. de 0,004/°C.

3.3.3. Méthodologie de simulation :

On a utilisé les équations suivantes pour Assurer l'équilibre énergétique entre la production d'énergie renouvelable, le stockage dans des batteries et réseau, tout en préservant un système durable et en assurant les besoins quotidiens (comme 48 GWh à Mila et Adrar) en se basant sur des données horaires sur un cycle de 24 heures pour chaque mois.

❖ **Puissance Éolienne ($P_{wind}(v)$):** La puissance éolienne a été calculée selon la formule suivante:

Si la vitesse du vent :

- $V < V_{cut-in}$ (3 m/s) ou $V > V_{cut-out}$ (25 m/s) : la puissance produite est nulle ($P=0$) car les turbines ne fonctionnent pas dans ces conditions.
- $V_{cut-in} \leq V < V_{rated}$ (12 m/s): $P = P_{rated} \cdot \eta_{wind} \cdot \frac{v^3}{v_{rated}^3}$
- $V_{rated} \leq V \leq V_{cut-out}$: $P = P_{rated} \cdot \eta_{wind}$

V : la vitesse du vent , avec une variation diurne $V(t) = V_{avg} \cdot (1 + 0.25 \cdot \sin(2\pi(t-15)/24))$ où V_{avg} est la vitesse moyenne mensuelle et t le temps en heures.

$P_{rated} = 2GW$ comme estimation initiale, ajustée pour correspondre à l'énergie cible.

❖ **La Puissance Photovoltaïque :** La puissance photovoltaïque est modélisée par l'équation :

$$P_{pv} (G, T_{cell}) = P_{pv, rated} \cdot \eta_{pv, adj} \cdot \frac{G}{1000} \quad (37)$$

G : L'irradiance solaire horaire (en W/m^2), divisée par 1000 pour la convertir en kW, alignant les unités avec la puissance.

$P_{pv, rated}$: La puissance nominale des panneaux solaires, soit la capacité maximale sous conditions idéales.

$\eta_{pv, adj}$: L'efficacité ajustée des panneaux, qui dépend de la température de la cellule (T_{cell})

L'irradiance Solaire Horaire G :

$$G(t) = 1000 \cdot \max \left(0, \sin \left(\frac{\pi(t-6)}{12} \right) \right) \cdot \frac{G_{monthly}}{G_{monthly}} \quad (38)$$

Le rayonnement instantané : $1000 W/m^2$

Ce rapport: $\frac{G_{monthly}}{G_{monthly}} = 1$ onc il n'a aucun effet mathématique .

L'efficacité Ajustée ($\eta_{pv, adj}$) :

$$\eta_{pv, adj} = \eta_{pv} \cdot (1 + temp_coeff \cdot (T_{cell} - 25)) \quad (39)$$

η_{pv} : L'efficacité de base des panneaux solaires.

T_{cell} : La température de la cellule solaire, influençant les performances.

Temp_coeff: Le coefficient de correction thermique

❖ Interaction Batterie et Réseau :

Équilibre Énergétique Net (P_{net}) : Représente la différence entre la demande (P_{load}) et la production renouvelable (P_{renew})

Evolution de l'État de Charge (SOC): L'état de charge de la batterie évolue selon l'équation :

$$SOC(t+1) = SOC(t) - \frac{P_{batt}(t) \cdot dt}{E_{batt, capacity} \cdot \eta_e} \quad (40)$$

$SOC(t+1)$: l'état de charge au moment suivant.

$SOC(t)$: l'état actuel.

$P_{batt}(t)$: la puissance de la batterie (positive pour le déchargement, négative pour le chargement)

$E_{batt, capacity}$: est la capacité de la batterie

η_e : est le coefficient d'efficacité électrique.

Contraintes sur le SOC:

$SOC_{min}=0.2$ (limite inférieure de 20 %) et $SOC_{max}=1$ (limite supérieure de 100 %)

❖ Puissance de la Batterie (P_{batt}) :

Décharge : Si $P_{net} > 0$ (manque d'énergie) et $SOC > SOC_{min}$

$$P_{batt} = \min(P_{net}, P_{batt, max} \cdot (SOC - SOC_{min}) \cdot \frac{E_{batt, capacity} \cdot \eta_e}{dt \cdot \eta_{batt}}) \quad (41)$$

P_{batt} : positive et limitée par le minimum entre le besoin net et la puissance maximale de décharge, basée sur le niveau de charge actuel.

$P_{grid} = P_{net} - P_{batt}$ est la puissance du réseau, utilisée pour couvrir le déficit restant.

Charge : Si $P_{net} < 0$ (excédent d'énergie) et $SOC < SOC_{max}$

$$P_{batt} = -\min(-P_{net}, P_{batt, max} \cdot (SOC_{max} - SOC) \cdot \frac{E_{batt, capacity} \cdot \eta_e \cdot \eta_{batt}}{dt}) \quad (42)$$

- P_{batt} : négative (chargement) et limitée par le minimum entre l'excédent et la puissance maximale de charge, basée sur l'espace disponible.
- $P_{grid} = -P_{net} - P_{batt}$ indique s'il y a exportation vers le réseau ou importation.

❖ Puissance du Réseau (P_{grid}) :

positive pour les importations et négative pour les exportations

L'énergie mensuelle nette (E_{grid}) est calculée comme suit :

$$E_{grid} = \sum P_{grid}(t) \cdot dt / 10^9$$

Le facteur 10^9 permet de convertir l'énergie en GWh. Cette formule permet d'évaluer le bilan énergétique mensuel entre le système hybride et le réseau.

3.3.4. Résultats et validation :

La simulation a donné des capacités de 5,8 GW (éolien) et 5,32 GW (PV) pour Mila, et 3,5 GW (éolien) et 4,11 GW (PV) pour Adrar. L'énergie photovoltaïque a culminé à 37,6 GWh/jour (Mila, juillet) et 37,2 GWh/jour (Adrar, juin), tandis que l'énergie éolienne a culminé à 32,7 GWh/jour (Mila, décembre) et 26,4 GWh/jour (Adrar, juillet-août). L'énergie nette du réseau a montré des exportations en été (par exemple, -7,3 GWh/jour pour Mila, -14,3 GWh/jour pour Adrar en juillet) et des importations en hiver (par exemple +8,3 GWh/jour pour Mila, +3,8 GWh/jour pour Adrar en janvier), validant l'alignement du modèle sur la disponibilité saisonnière des énergies renouvelables. L'alignement du modèle sur la disponibilité saisonnière des énergies renouvelables.

Cette méthodologie fournit un cadre évolutif pour la conception de systèmes hybrides, adaptable à d'autres sites avec des données similaires.

❖ Les résultats obtenus de la simulation :

Étude de la Production et de la Gestion Énergétique Hybride à Mila et Adrar en 2025 :

L'énergie PV :

❖ Ce diagramme illustre la production d'énergie du système photovoltaïque (PV) mois par mois en 2025 pour les cités de Mila et Adrar, exprimée en GWh/jour :

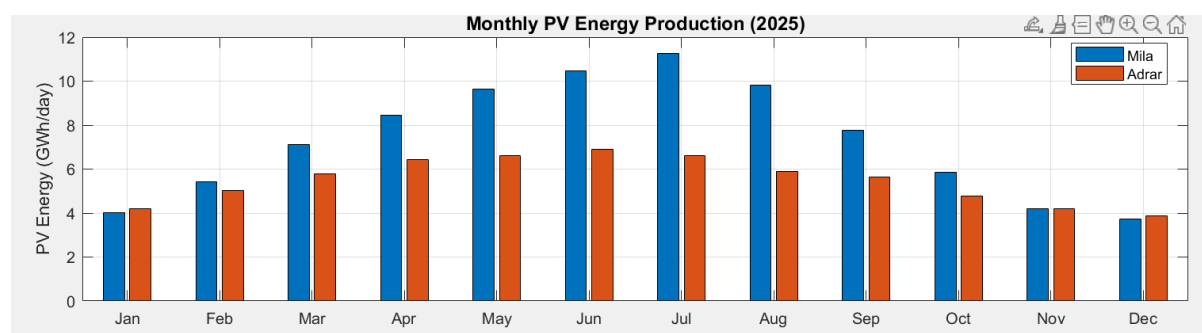


Figure III.10: la production d'énergie du système PV en GWh/jour

Commentaire :

Pour presque tous les mois, Mila affiche une production solaire supérieure à celle d'Adrar, peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- Efficacité des installations
- Consommation locale ou stockage
- Des facteurs réduire l'efficacité comme la poussière le sable, en novembre elles sont identiques.
- Mila enregistre sa production maximale surtout pendant l'été, surtout en juillet, elle dépasse 11 GWh par jour.

Les productions sont les plus basses durant les mois d'hiver, notamment janvier et décembre.

La production d'énergie éolienne :

Ce diagramme illustre la production d'énergie éolienne par mois à Mila pour l'année 2025.

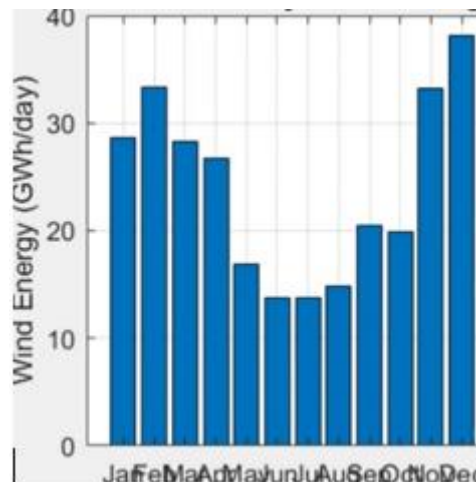


Figure III.11: la production mensuelle d'énergie éolienne à Mila

Commentaire :

La production atteint son apogée en Décembre, dépassant 39 GWh par jour.

On observe une chute significative au printemps, surtout en mai et juin.

Les autres mois montrent une production de niveau moyen à élevé, indiquant une stabilité relative du potentiel éolien.

L'énergie électrique de réseau :

- ❖ Ce diagramme représente l'énergie électrique nette extraite du réseau chaque mois en 2025 pour Mila et Adrar, en termes de GWh par jour.

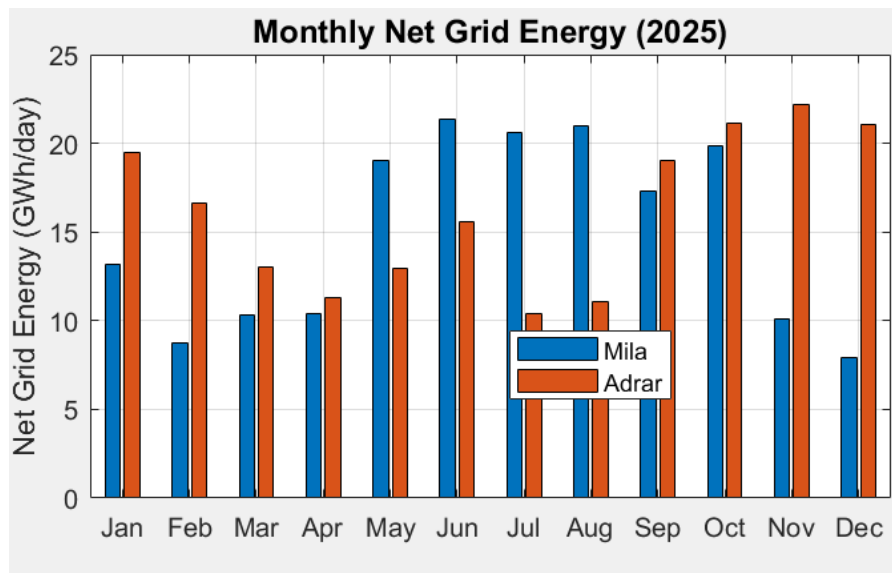


Figure III.12: l'énergie nette du réseau en GWh/jour.

Commentaire :

En Adrar la production élevée, en l'hiver de janvier à mars et vers la fin de l'année en novembre et décembre

Mila a une production nette plus élevée en mai à août (22 GWh) alors pendant ces mois la production d'énergie solaire et éolienne s'est améliorée.

- Adrar produit plus d'énergie nette que Mila en hiver et en automne
- Un meilleur équilibre saisonnier est obtenu avec Mila, offrant une production plus constante durant la période d'été.

Interprétation des résultats :

La puissance photovoltaïque à Mila s'élève approximativement à 5,32 GW, équivalente à environ 15,2 millions de panneaux solaires ayant une puissance unitaire de 350 W. À Adrar, on recense une puissance photovoltaïque installée de 4,11 GW, ce qui correspond à approximativement 11,7 millions de panneaux. Cette variation est due à une performance supérieure des panneaux à Mila, grâce à des températures ambiantes plus tempérées qui diminuent les pertes thermiques.

L'énergie éolienne en Mila prend également de l'avance avec une capacité installée de 5,8 GW qui correspond à 611 éoliennes de 9,5 MW, comparativement à 3,5 GW à Adrar, ce qui représente environ 369 éoliennes. Ces compétences ont donné à Mila la possibilité de générer plus d'énergie verte tout au long de l'année, diminuant ainsi sa dépendance vis-à-vis du réseau. La batterie de stockage, conçue pour une capacité de 4 heures à 2 GW, a eu un rôle crucial dans l'ajustement entre la production et la consommation.

En définitive, ces conclusions soulignent que l'efficacité d'un système hybride est influencée non seulement par les ressources naturelles à disposition, mais également par les

conditions climatiques locales comme la température, la présence de poussière et la vitesse du vent, sans oublier l'importance de la qualité du dimensionnement technique

La gestion de l'énergie :

Les graphiques dans les figures III.13 et III.14 représenter la gestion énergétique de Mila et adrar sur une durée de 24 heures, englobant la production pv-éolien la charge/décharge de la batterie, les échanges avec le réseau, et l'état de charge (SOC) de la batterie.

1. Pour Mila :

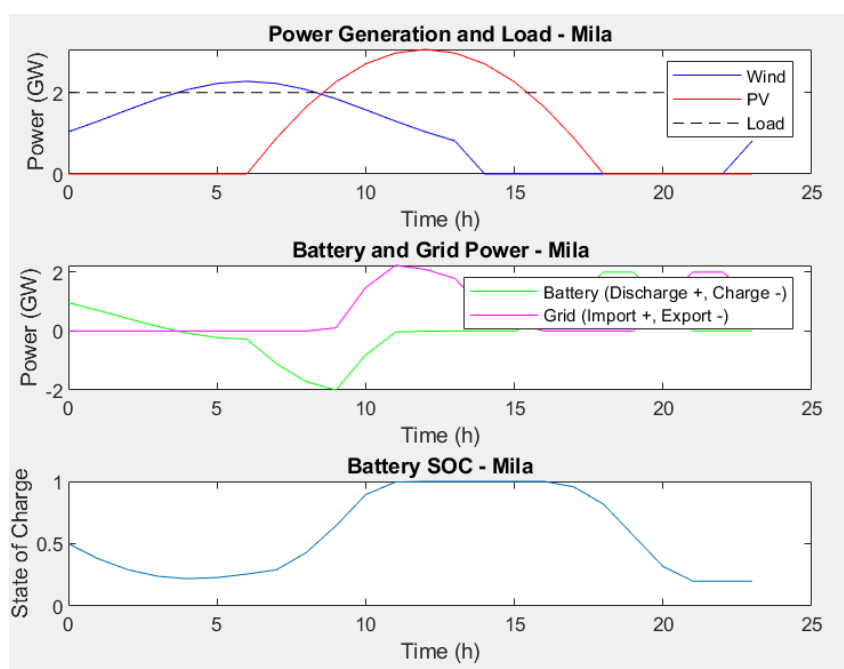


Figure III.13: la gestion de l'énergie pour Mila.

Production d'énergie et charge:

Le système utilise l'énergie éolienne et solaire pour alimenter la charge :

- ❖ La production éolienne reste stable environ 1 GWh avec un pic entre 5 et 10 heures puis une diminution graduelle.
- ❖ La production photovoltaïque correspondant à la lumière solaire entre 5 et 15 heures elle atteint une valeur maximale 3 GWhs puis une chute après 15 heures
- ❖ La consommation énergétique pour la charge est constante à environ 2 GW

Batterie et réseau électrique :

- ❖ La batterie se décharge (valeurs négatives) notamment entre 5-10, lorsque la production excède la demande entre 10 et 15 heures elle se recharge (valeurs positives) .

- ❖ Les interactions avec le réseau sont minimales avec des importations /exportations pour un système durable.

SOC de batterie :

- ❖ Le SOC commence à 0.5, entre 10 à 15 heures il augmente jusqu'à environ 0.9 (le recharge par PV) puis diminue après 15 heures (décharge)

2. Pour adrar :

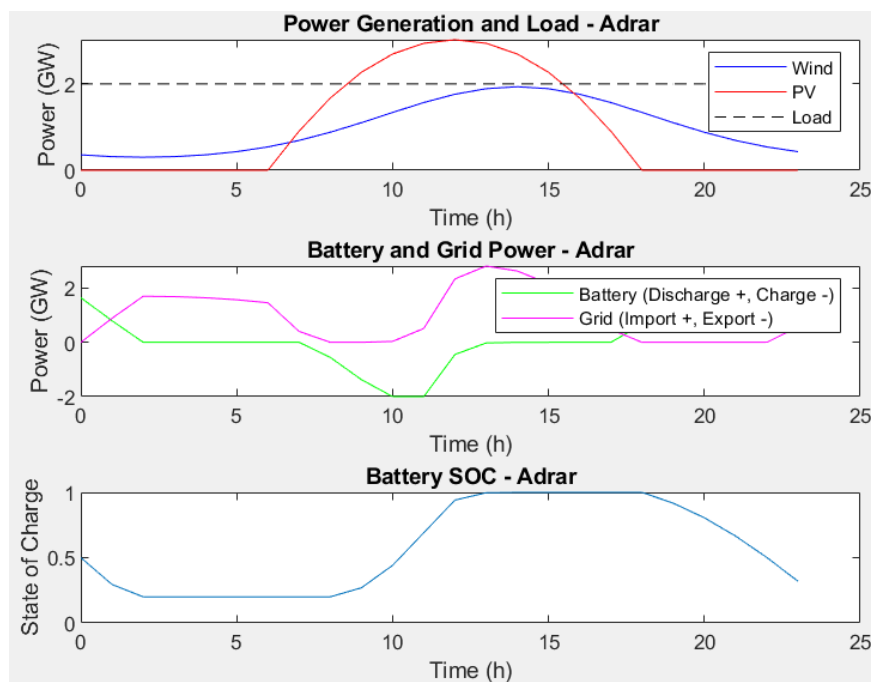


Figure III.14: gestion d'énergie pour adrar

- ❖ À Adrar, le système exploite l'énergie solaire photovoltaïque comme principale source principale durant la journée (de 10 à 15 heures) et l'éolien comme Source secondaire.
- ❖ La batterie stockée l'excédent énergétique et soutient la demande .
- ❖ Le système énergétique d'Adrar s'appuie sur les importations ou exportations d'énergie avec le réseau (le réseau équilibre les variations) par rapport au système de Mila.

Interprétation des résultats :

Les résultats obtenus de la simulation représentés dans les figures III.15 et III.16 dans lequel sont présentés la gestion d'énergie dans Mila et adrar :

une capacité éolienne de 5,81 GW à Mila (611 turbines) et de 2,85 GW à Adrar (300 turbines), la capacité photovoltaïque atteint 5,32 GW à Mila (environ 13,3 millions de panneaux de 400 W) et 4,11 GW à Adrar (10,3 millions de panneaux).

La dépendance au réseau varie de 6 à 19 GWh/jour à Mila et de 10 à 17 GWh/jour à Adrar, les coûts LCOE (13,51-15,01 \$/MWh à Adrar) prouvent une viabilité économique plus

élevée à Adrar, ce qui confirme la nécessité d'augmenter la capacité de stockage pour réduire la dépendance au réseau.

Évaluation des Performances d'un Système Hybride Solaire-Éolien avec Stockage par Batterie à Mila et Adrar en 2025:

L'objectif de ce système hybride est d'assurer un besoin quotidien en énergie de 48 GWh (2 GW de puissance constante sur une période de 24 heures) avec 50 % de l'éolien (24GWh/jour) et 50 % du solaire (24 GWh/jour).

Les résultats représentés à partir la figure III.15 jusque figure III.19 :

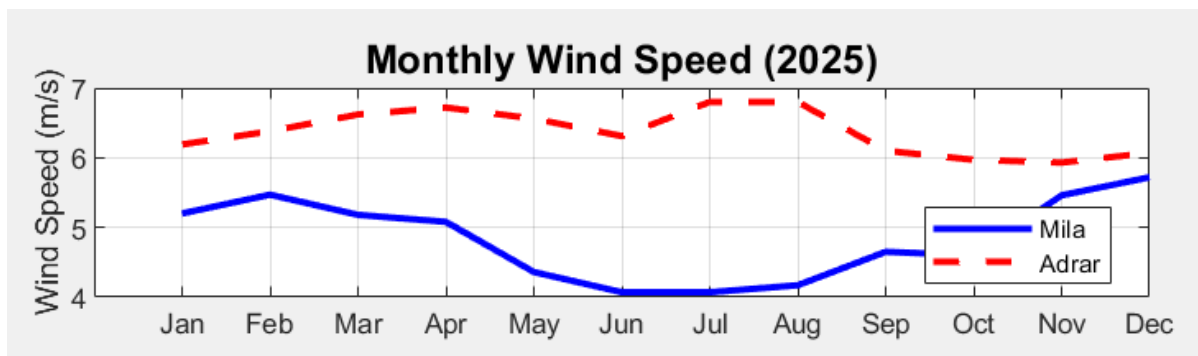


Figure III.15 : Vitesse du vent mensuelle

- Adrar affiche une vitesse plus stable et plus élevées avec un pic en été par contre Mila montre des vents plus faibles, surtout en été, mais augmente en hiver.

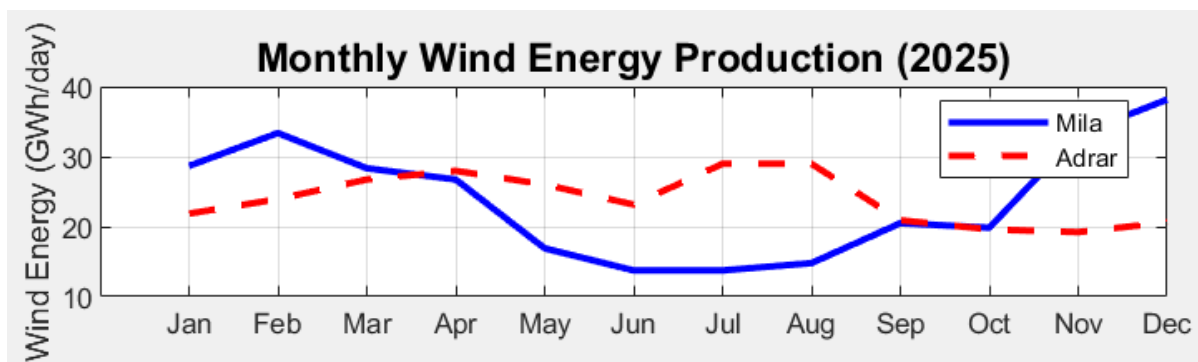


Figure III.16 : Production d'énergie éolienne mensuelle

- La production d'énergie éolienne est influencée par les saisons, Mila montrant une production plus élevée en hiver (décembre) et Adrar montrant une stabilité relative , cela correspond avec la vitesse du vent .

Interprétation des résultats :

La production d'énergie éolienne à Mila a atteint jusqu'à 39 GWh par jour, ce qui équivaut à peu près à 1 550 éoliennes de 3 MW (facteur de capacité de 35 %), tandis' à Adrar, la production a été de 27 GWh par jour, nécessitant environ 1 070 turbines.

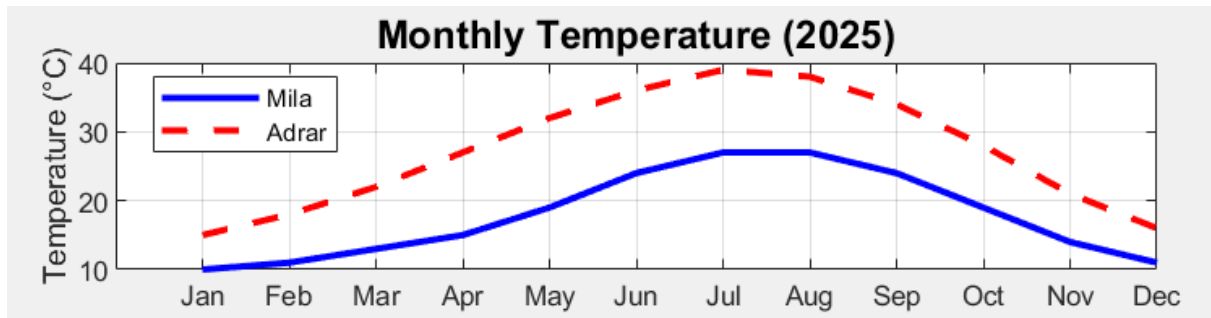


Figure III.17: Température mensuelle

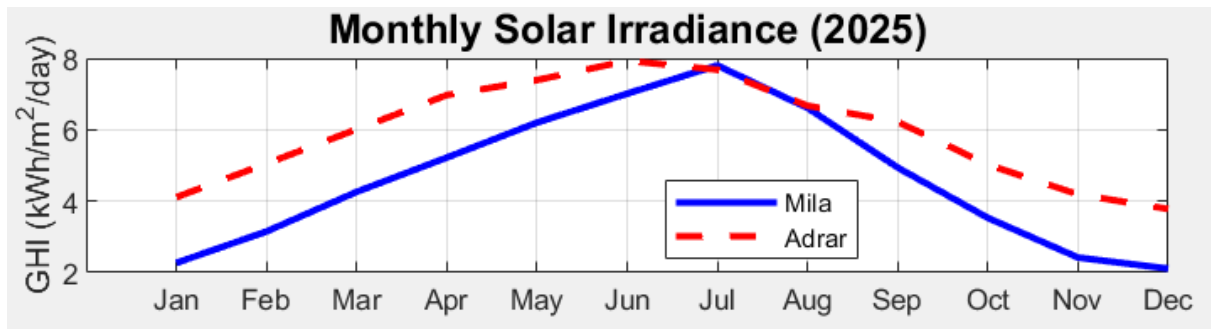


Figure III.18: Irradiance solaire mensuelle

- En adrar les températures plus élevées surtout en été et cela réduit l'efficacité des panneaux solaires mais les irradiances élevées .
- Mila maintient une meilleure efficacité solaire à cause des températures plus modérées mais l'irradiance plus faible limite la production.
- Les deux villes ont un pic en été

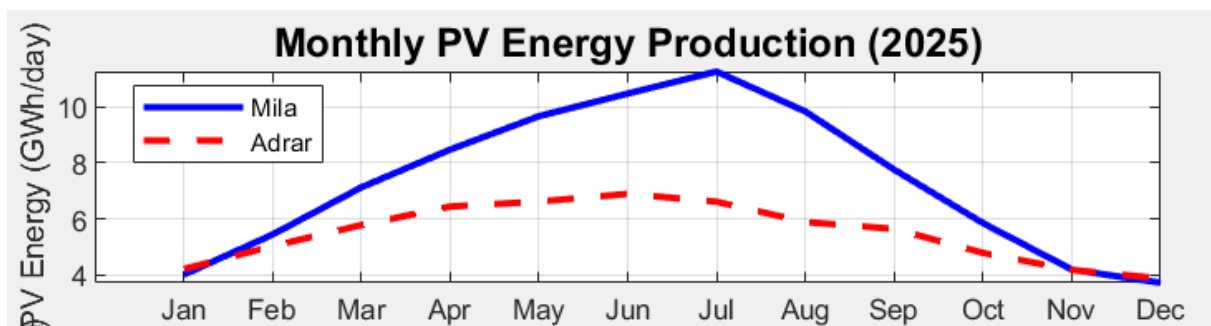


Figure III.19: Production d'énergie solaire mensuelle

- La production d'énergie solaire est liée à l'irradiation.
- Mila produit plus que Adrar en été (12GWh) à cause de la capacité solaire plus élevé.

Interprétation des résultats :

À Mila, la production solaire a été atteinte à 11 GWh par jour, ce qui a nécessité l'ajout d'environ 7,85 millions de panneaux solaires de 350 W chacun. À Adrar, bien que l'ensoleillement soit plus intense, la production d'énergie solaire ne franchit pas la barre des 7

GWh quotidiens à cause des températures élevées, ce qui nécessite près de 5 millions de panneaux solaires.

Malgré ce que Mila bénéficie d'une luminosité plus importante qu'Adrar, elle affiche des performances globales supérieures (PV, éolien, énergie nette). Ceci est dû au fait que :

À Mila, des températures plus basses entraînent une efficacité accrue du PV et la production d'énergie éolienne dépasse les prévisions.

Moins de perte due à la chaleur, à la poussière ou l'encrassement des panneaux.

3.4. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation d'un système hybride (combinant l'énergie éolienne et photovoltaïque) équipé d'une batterie de stockage. Ce modèle nous donnera la possibilité de simuler les performances du système global en question.

Nous avons également réalisé une simulation d'un système hybride photovoltaïque (PV) et éolien pour les sites de Mila et Adrar, en Algérie. Les résultats de cette simulation ont révélé un bon comportement du système face aux variations climatiques.

Conclusion Générale:

Le travail présenté dans ce mémoire vise à étudier, modéliser et simuler une chaîne hybride de production d'énergie électrique avec système de stockage, basée sur des sources renouvelables (photovoltaïque-éolienne).

Actuellement, les énergies renouvelables comme le solaire et l'éolien ont attiré une grande attention. L'intégration de sources d'énergie renouvelables dans un système hybride bien structuré peut réduire la dépendance aux combustibles fossiles et optimisant la fiabilité de l'approvisionnement électrique.

Nous avons étudié la première partie nous avons présentés deux sources d'énergie renouvelables existantes, notamment les énergies photovoltaïque et éolienne. et des systèmes de stockage.

Le deuxième point est consacré à la présentation de système hybride PV-éolien, a détaillé la conception et les configurations et les caractéristiques de chaque composante du système hybride éolien- photovoltaïque avec soin.

Le troisième point destiné à la modélisation et la simulation, cet effort a permis de quantifier les performances du système grâce à une simulation fondée sur les données climatiques de 2025. Les résultats ont montré une bonne réaction aux fluctuations climatiques.

Ce travail nous a permis :

- De fournir une description des systèmes d'énergies renouvelables (photovoltaïque et l'éolien).
- Modéliser et simuler les deux chaînes de conversion, éolienne et photovoltaïque, après passer vers le système hybride dans son ensemble.
- Réaliser une performance du système étudié .

Ces caractéristiques assurent au système une robustesse et une faisabilité pour fournir la puissance avec une faible consommation à partir de sources renouvelables. De plus, suite à deux simulations des systèmes présidentiels et à une analyse des résultats, il est évident que l'utilisation de méthodes mathématiques tant pour la puissance que pour l'énergie des mesures sont complémentaires afin de sélectionner le système le plus approprié pour notre nouveau système d'énergie renouvelable. Les résultats obtenus ont révélé que l'emploi du second système est plus adapté.

References:

- [1] S.M. Malik, X. Ai, Y. Sun, C. Zhengqi, Z. Shupeng, Voltage and frequency control strategies of hybrid AC/DC microgrid: a review, *IET Gener. Transm. Distrib.* 11 (2) (2017) 303-313.
- [2] Y. Yoldaş, A. Önen, S.M. Mueeen, A.V. Vasilakos, İ. Alan, Enhancing smart grid with microgrids: challenges and opportunities, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 72 (2017) 205-214 5//2017.
- [3] M. Moradi and M. Abedini, "A novel method for optimal DG units capacity and location in Microgrids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 75, pp. 236-244, 2016.
- [4] O.Deruelle, « Mise Au Point D'un Système De Spectroscopie Pour Mesurer Des Sections Efficaces Neutroniques Applicables A Un Possible Développement Du Nucléaire Comme Source D'énergie », Thèse De Doctorat En Sciences, Université De Paris Xi ; Pp.9-12, 2002.
- [5] S. Bull, "Renewable Energy today and tomorrow," *Proc. IEEE*, vol. 89, no. 8, pp. 1216-1226, Aug 2001.
- [6] <https://www.engadget.com/2017/10/04/solar-power-global-renewable-energy/>
- [7] international Energy Agency <https://www.iea.org/>
- [8] Adam Mirecki, Sujet « étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petit puissance »Thèse de doctorat polytechnique de Toulouse, spécialité génie électrique, setenu le 5/4/2005.
- [9] DERDOUBA, H. Études, Conception et réalisation d'une éolienne.
- [10] <http://www.eniplenitude.fr>
- [11] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980
- [12] the Energy institute statistical review of world energy 2023
- [13] rapport ember [http ://Ember-energy.org](http://Ember-energy.org)
- [14] B. Sorensen, « Renewable Energy Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy and Planning Aspects », Elsevier Academic Press, 2004
- [15] encyclopédie encarta 2008
- [16] S.M. Boudia. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2013

- [17] Frédéric POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones à double alimentation reliée au réseau » thèse de doctorat de l'université de Nantes, 2003
- [18] Saheb, D., & Koussa, M. (2017). An experimental intelligent simulator of a single household: Wind energy application. *Journal of Renewable Energies*, 20(4), 615-625.
- [19] F Benyarou « conception assistée par ordinateur des système photovoltaïque modélisation, dimensionnement et simulation » thèse de doctorat Université de Tlemcen 2004
- [20] B. Mehimmedetsi and R. Chenni, "Performances des réseaux hybrides solaires appliqués à l'électrification rurale," Université Frères Mentouri-Constantine 1.
- [21] www.heliciel.com
- [22] M.A. BENLAHRACHE et S. SADOUD. "Commandes Non-Linéaires et Adaptatives d'une Éolienne Basée sur une MADA". Projet de Fin d'Étude, École Nationale Poly technique, Alger, 2011
- [23] A. HAMID et H. DJELFAOUI. "Étude et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée par une Source Hybride (Éolien-Photovoltaïque)". Projet de Fin d'Étude, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, 2009
- [24] O. GERGAUD, G. ROBIN, B. MULTON et H. BEN AHMED. "Energy Modeling of a Lead-Acid Battery within Hybrid Wind / Photovoltaic Systems". EPE, Toulouse, France, 2003
- [25].Halouane Assia, thèse de Master, Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA BOUMERDES.
- [26] Livre Energie Solaire Photovoltaïque. Anne labouret. Michel Villos. 2ème édition.
- [27] Anne Labouret, Michel Villon, « Energie solaire PV », 3eme Edition Dunod ,2007
- [28] D. LU, « Conception et contrôle d'un générateur PV actif à stockage intégré », Thèse de doctorat, l'Ecole Centrale de Lille, 2010
- [29] S. VIGHETTI, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion », Thèse de doctorat, Institut polytechnique de Grenoble, 2010
- [30] A. Ricaud, « Modules et systèmes photovoltaïques », Septembre 2008.
- [31] S. Diaf, D. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, and A. Louche, "A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system," *Energy Policy*, vol. 35, pp. 5708-5718, 2007.
- [32] Hankins Mark, installation solaires photovoltaïques autonomes : conception et installation d'unités non recordées au réseau, Paris :Dunod 2012

- [33] A. KAABECHE, M. BELHAMEL, R. IBTIOUEN, S. MOUSSA et M. R. BENHADDADI, « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome », *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°3 199 – 209, 2006.
- [34] Hassini, H. (2010). 'Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque'. *Memoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid de Tlemcen*.
- [35] Tinaetal,2005,Musellietal, 2000;AsharietNayar,1999).
- [36] Kumar, P. S., Chandrasena, R. P. S., Ramu, V., Srinivas, G. N., & Babu, K. V. S. M. (2020). Energy management system for small scale hybrid wind solar battery based microgrid. *IEEE Access*, 8, 8336-8345
- [37] L. Stoyanov. "Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables". Doctorat en Énergétique, Université Technique de Sofia, 2011
- [38] V. Courtecuisse. "Supervision d'une Centrale Multisources à Base d'Éoliennes et de Stockage d'Énergie Connectée au Réseau Électrique". Thèse de Doctorat, CNAM, Paris, France, 2008
- [39] Wickert, B., Nayar, C.V., Lawrance, W.B., (1999). Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification. *International Journal of Renewable Energy Engineering*, vol. 1, n. 1, pp. 7-17, 1999.
- [40] M. Belatel, F. Benchikh, Z. Simohamed, F. Ferhat et F.Z. Aissous. "Technologie du Couplage d'un Système Hybride de type Photovoltaïque-Éolien avec la Pile à Combustible pour la Production de l'Électricité Verte". *Revue des Énergies Renouvelables* Vol. 14 No1, PP. 145– 162, 2011
- [41] H. Dehbonei, C. V. Nayar, and L. Chang, "A new modular hybrid power system," in *Industrial Electronics*, 2003. ISIE'03. 2003 IEEE International Symposium on, 2003, pp. 985-990
- [42] M. H. Rashid, *Power electronics handbook*: Butterworth-Heinemann, 2
- [43] Fahad Maoulida. Modélisation et optimisation d'un système hybride de génération d'énergie pour l'habitat rural en Afrique. *Energie électrique*. Université de Lorraine, 2024. Français. NNT: 2024LORR0043. tel-04700340
- [44] B. Brousse, « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique », Thèse Doctorat, Université De Limoges, 2004.
- [45] F. POITIERS, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée aux réseaux) », Thèse de Doctorat, Université de Nantes, France, 2003.

- [46] V. ROGEZ, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de Doctorat, Université d'Artois, France, 2004.
- [47] S. EL AIMANI, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans réseaux de moyenne tension », Thèse de Doctorat, Université Lille, France, 2004.
- [48] R. SEBAA, Y. BENAMMAR, « Etude de faisabilité et dimensionnement d'un système hybride à base d'énergies renouvelables », Projet fin d'étude, Ecole supérieure en science appliquée de Tlemcen, Algérie, 2021.
- [49] Maoulida F, Kassim M A and El Ganaoui M 2020 Étude technico-économique d'un système d'énergie hybride non connecté au réseau aux Comores
- [50] Y. Riffonneau, F. Barruel, and S. Bacha, "Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau," *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, pp. 407-422, 2008
- [51] K. Mertens, *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice*: John Wiley & Sons, 2018.
- [52] E. W. E. Association, *Wind energy-the facts: a guide to the technology, economics and future of wind power*: Routledge, 2012.
- [53] E. Kamal, M. Koutb, A. A. Sobaih, and B. Abozalam, "An intelligent maximum power extraction algorithm for hybrid wind-diesel-storage system," *International journal of electrical power & energy systems*, vol. 32, pp. 170-177, 2010.
- [54] A. Khalil, K. A. Alfajori, and A. Asheibi, "Modeling and control of PV/wind microgrid," in *Renewable Energy Congress (IREC)*, 2016 7th International, 2016, pp. 1-6.
- [55] Maini Abdelhafid, G. I. modélisation et simulation d'un système hybride éolien-photovoltaïque.
- [56] Kechida A, Gozim D, Toual B. Management stand-alone hybrid renewable energy system based on wind and solar with battery storage. 2023 2nd International Conference on Electronics, Energy and Measurement (IC2EM), 2023. IEEE: 1-6.
- [57] B. Brousse, « Réalisation Et Caractérisation De Cellules Photovoltaïques Organiques Obtenues Par Dépôt Physique », Thèse Doctorat, Université De Limoges, 2004
- [58] Y. Pankow, « Etude De L'intégration De La Production Décentralisée Dans Un Réseau Basse Tension. Application Au Générateur Photovoltaïque », Thèse De Doctorat, Ecole Doctorale De L'ensam Ed 432, Lille, 2004.
- [59] N. Benmeddah « Modélisation d'un panneau photovoltaïque » Mémoire de DES, université de Tlemcen, 1999

- [60] F. Poitiers, « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne (Machine Asynchrone A Cage Autonome, Machine Asynchrone A Double Alimentation Reliée Aux Réseaux) », Thèse De Doctorat, Université De Nantes, France, 2003.
- [61] S. El Aimani, « Modélisation De Différentes Technologies D'éoliennes Intégrées Dans Réseaux De Moyenne Tension », Thèse De Doctorat, Université Lille, France, 2004.
- [62] : F Benyarou « conversion des énergies » document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001-200
- [63] <http://membres.lycos.fr/tpepaillardbaroux/notions.htm>
- [64] Traoré, A. K. (2016). *Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles* (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [65] R. REDJEM «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire de magister en Electrotechnique université de Constantine, 2009.
- [66] ROUAS, Rabah. *Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque*. 2018. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.