

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité Energie renouvelable en mécanique

Par : **BENGOURAIN ISSAM**

Sujet

Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelables

Soutenu publiquement, le 26 / 06 / 2022 , devant le jury composé de :

M SAIM Rachid
M Aliane Khaled
M ZINAI Abdelhadi

Professeur
Professeur
MCB

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier Dieu « ALLAH » qui m'a aidé pour que ce travail soit achevé et pour que j'ai réussi.

*Je tien à remercier très sincèrement mon encadreur, **Mr. ZINAI Abdelhadi**, pour ses conseils précieux, ses orientations judicieuses, sa patience, sa diligence, ainsi que ses suggestions et critiques qui ont facilités l'achèvement de ce présent travail.*

Mes précieux remerciements vont également au président et membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin, pour élaborer ce travail.

BENGOURAIN Issam

Dédicaces

C'est grâce a Allah seul que j'ai pu achever se travail. Je le dédie à :

Mes très chères parents pour leur soutient et leur aide durant toute ma période d'étude, dont je leurs doit toute ma reconnaissances et mon respect

Toute la famille BENGOURAIN

A mes chers Frères Amin, Abderrahman.

A mes très chères Belles-Sœurs Nino, Khansa.

A mes très chères nièces Aridj, Tesnim, Selsabil.

A mes amis et tous ceux qui mon aidés de loin et de prés, Ahmed, Bilal, Youcef, Riyad, Fares,

Soufiane, Zakaria, Nedjib, Mohammed.

Tous mes enseignants

A toute la promotion ERM 2022 plus particulièrement la chacun par son nom.

BENGOURAIN Issam

Résumé

Le développement des ressources renouvelables prospère dans les pays industrialisés et même dans quelques pays sous-développés.

Le système hybride de production d'électricité (éolien - photovoltaïque) totalement autonome est la solution idéale pour ce genre de problème.

Nous présentons dans ce mémoire un système autonome hybride à énergies renouvelables. Ce Système étudié est constitué d'un sous-système photovoltaïque (panneaux Photovoltaïques et convertisseur de puissance), d'un sous-système éolien (turbine éolienne entraînant une génératrice et un redresseur), d'un sous-système de stockage d'énergie (batteries), d'un système de pompage d'eau (groupe motopompe et réservoir) et des charges électriques (réfrigérateur, climatiseur, lampes...etc.).

Mots clés: Système Photovoltaïque - Système éolien - Système hybride Photovoltaïque-éolien - Système de Stockage

Abstract

The exploitation of renewable resources has been rising in industrialized countries and even in some underdeveloped countries.

The production of electricity by an autonomous hybrid system (wind-PV) is the ideal solution for this type of problems.

We present in this project a hybrid autonomous system with renewable energies. This system consists of a photovoltaic subsystem (photovoltaic panels and power converter), a wind subsystem (wind turbine driving a generator and a rectifier), an energy storage subsystem (batteries), a water pumping system (motor pump unit and tank) and electrical loads (refrigerator, air conditioner, lamps, etc.).

Keywords: Photovoltaic system - Wind system - Hybrid system Wind-Photovoltaic - Storage System

الملخص

تزدهر تنمية الموارد المتجددة في البلدان الصناعية وحتى في بعض الدول السائرة في طريق النمو. يعد نظام إنتاج الكهرباء الهجين (ريحي كهروضوئي) المستقل تمامًا، الحل الأمثل لهذا النوع من المشاكل. نقدم في هذه الأطروحة نظام هجين مستقل مع الطاقات المتجددة. يتكون هذا النظام المدروس من نظام فرعي ضوئي (الألواح الكهروضوئية ومحول الطاقة) ، ونظام فرعي للرياح (توربين الرياح يقود مولدًا ومُقَوِّمًا) ونظامًا فرعيًا لتخزين الطاقة (البطاريات) ونظام ضخ المياه (وحدة ضخ بمحرك وخزان) و أحمال كهربائية (ثلاجة ، مكيف ، مصابيح ، الخ).

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي - نظام الرياح - النظام الهجين رياحي كهروضوئي - نظام التخزين

Sommaire

Remerciements	I
Dédicaces	II
Résumé	III
Sommaire	VI
Liste de figures	X
Liste des tableaux	XII
Liste des acronymes et des symboles	XIII

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I: Généralités sur les énergies renouvelables.....	3
--	----------

1. Les énergies renouvelables	4
1. 1. Les avantages d'énergies renouvelables	4
1. 2. Les inconvénients d'énergies renouvelables.....	5
2. Types d'énergies renouvelables	5
2. 1. Energie biomasse.....	5
2. 2. Energie solaire	6
2. 3. Énergie géothermique	6
2. 4. Energie hydroélectrique	6
2. 5. Energie éolienne.....	6

Chapitre II: Généralités sur l'énergie solaire.....	8
--	----------

1. Energie solaire :	9
1. 1. Généralités sur le soleil :	9
1. 2. Définition :	9
2. Energie solaire photovoltaïque :	10
2. 1. Définition :	10
2. 2. Historique :	11
2. 3. Électricité solaire par effet photovoltaïques :	11
2. 3. 1. Principe de fonctionnement :	11
2. 3. 2. Cellules photovoltaïque	13
2. 4. Différents types des cellules photovoltaïques	14

2. 4. 1. Cellules monocristallines	15
2. 4. 2. Cellules poly cristallines	15
2. 4. 3. Amorphes	16
2. 5. Module photovoltaïques	17
2. 6. Les avantages et les inconvénients	19
2. 6. 1. Les avantages :	19
2. 6. 2. Les inconvénients :	19
Chapitre III: Energie éolienne	20
1. Définition de l'énergie Eolienne	21
2. Historique de l'éolienne	21
3. Constitution d'une éolienne	22
4. Fonctionnement d'une éolienne	23
5. Caractéristique des turbines éoliennes	24
5. 1. Turbines à axe vertical	25
5. 2. Turbines à axe horizontal	25
5. 3. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	26
6. Notion théorique sur l'éolien	26
6. 1. Coefficient de Puissance Cp	26
6. 2. Couple Produit par L'éolienne	27
6. 3. Vitesse Spécifique de L'éolienne	27
6. 4. Limite de Betz	27
7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	31
7. 1. Les avantages	31
7. 2. Les inconvénients	31
Chapitre IV: Généralités sur un système hybride et le stockage de l'énergie	32
1. Introduction	33
2. Système hybride	33
2. 2. Définition d'un système hybride	33
2. 3. Les structures de systèmes hybrides	34
2. 3. 1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle	34
a. Systèmes photovoltaïque avec source conventionnelle	34
b. Systèmes éolien avec source conventionnelle	34

c. Systèmes photovoltaïque, éolien et diesel	34
2. 3. 2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle	34
2. 4. Classification des systèmes hybrides:.....	35
2. 4. 1. Le régime du fonctionnement :	35
2. 4. 2. La structure du système hybride :	35
2. 5. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides	36
2. 5. 1. Les avantages.....	36
2. 5. 2. Les inconvénients	37
3. Le stockage de l'énergie :	37
3. 1. Différents modes de stockage	37
3. 2. Les Batteries électrochimiques.....	39
3. 3. Constitution	39
3. 4. Différents types d'accumulateurs	39
3. 4. 1. Accumulateur à électrolyte aqueux.....	39
a. Accumulateur plomb-acide sulfurique	40
b. Batteries alcalines.....	40
c. Accumulateur Ni-MH	40
3. 4. 2. Accumulateurs à électrolyte non aqueux.....	41
a. Accumulateur Lithium-ion	41
b. Accumulateurs Lithium métallique	42
c. Accumulateurs Lithium-polymère	42
3. 5. Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion.....	43
Chapitre V: Représentation du système hybride photovoltaïque-éolien	45
1. Introduction.....	46
2. Représentation du système hybride photovoltaïque-éolien	47
2. 1. Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque	47
2. 1. 1. Système hybride avec un bus Courant continu (BUS CC) :	48
2. 1. 2. Système hybride avec un bus courant alternatif (BUS CA) :	48
2. 1. 3. Système hybride avec un bus mixte (bus CC et bus CA) :	49
3. Représentation d'un système hybride Photovoltaïque Diesel et éolien.....	50
3. 1. Modèle général d'un système hybride Photovoltaïque-éolien et diesel	51
4. Système d'exploitation d'un système hybride Photovoltaïque-Eolien	52
5. Représentation des éléments du système hybride	53

5. 1. Système photovoltaïque.....	53
5. 1. 1. Méthode d'optimisation de la puissance	53
5. 1. 2. MPPT :.....	54
5. 1. 3. Les hacheurs :	54
5. 2. Système éolien	55
5. 2. 1. Représentation d'un redresseur triphasé à MLI.....	55
5. 2. 2. Convertisseur MPPT pour l'éolienne	56
5. 3. Système de stockage d'énergie	57
5. 3. 1. Modèle électrique simplifié d'une batterie.....	58
5. 3. 2. Contrôleur de charge.....	58
5. 3. 3. Modèle du hacheur Buck-Boost	59
5. 4. Convertisseur CC/AC (Onduleur)	60
6. Conclusion	61
Conclusion générale	62
Références Bibliographique	63

Liste de figures

FIGURE 1: LES DEFERENTS TYPES D'ENERGIES RENOUVELABLES	4
FIGURE 2 : LES DEUX TYPES D'ENERGIE SOLAIRE	9
FIGURE 3 : SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	10
FIGURE 4 : EFFET PHOTOVOLTAÏQUE	12
FIGURE 5 : DIAGRAMMES DE BANDES D'ENERGIE AU VOISINAGE DE LA JONCTION	13
FIGURE 6: CONSTITUTION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	14
FIGURE 7 : CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	14
FIGURE 8: CELLULE AU SILICIUM MONOCRISTALLIN	15
FIGURE 9: CELLULE AU SILICIUM POLY CRISTALLIN	16
FIGURE 10: CELLULE AU SILICIUM AMORPHE (COUCHE MINCE)	16
FIGURE 11: MODULE PHOTOVOLTAÏQUE	18
FIGURE 12: CABLAGE DES CELLULES DANS UN MODULE	18
FIGURE 13: PHOTOGRAPHIE DE DEUX MOULINS A VENT	22
FIGURE 14: PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE	22
FIGURE 15: VARIATION DE MASSE DE LA NACELLE EN FONCTION DE DIAMETRE DU ROTOR ..	23
FIGURE 16: VARIATION DE LA MASSE D'UNE PALE EN FONCTION DE DIAMETRE DU ROTOR ...	23
FIGURE 17: DIFFERENT TYPES DE TURBINES EOLIENNE	24
FIGURE 18: COEFFICIENT DE PUISSANCE EN FONCTION DE LA VITESSE DE ROTATION .	25
FIGURE 19 : DIAGRAMME DE LA PUISSANCE UTILE SUR L'ARBRE EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT	26
FIGURE 20: COEFFICIENT DE PUISSANCE	27
FIGURE 21: TUBE DE COURANT AUTOUR D'UNE EOLIENNE .	28
FIGURE 22: CP EN FONCTION DE λ POUR DIFFERENTES TURBINES	30
FIGURE 23: CLASSIFICATION DES SYSTEMES HYBRIDES	36
FIGURE 24: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA BATTERIE LI-ION	42
FIGURE 25: FONCTIONNEMENT D'UN ACCUMULATEUR LITHIUM-ION	43
FIGURE 26 : SCHEMA PRESENTATIF D'UN SYSTEME HYBRIDE ETUDIE.....	46
FIGURE 27: SCHEMA PRESENTATIF D'UN SYSTEME PV	46
FIGURE 28 : SCHEMA PRESENTATIF D'UN EOLIEN.....	46
FIGURE 29: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME HYBRIDE ETUDIE	47
FIGURE 30: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME HYBRIDE AU BUS CC	48
FIGURE 31:SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME HYBRIDE AU BUS CA	49
FIGURE 32: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME HYBRIDE AU BUS MIXTE CC/CA	49
FIGURE 33: SYSTEME EOLIEN-PHOTOVOLTAÏQUE-DIESEL	51
FIGURE 34: MODELE GENERAL D'UN SYSTEME HYBRIDE PV /EOLIEN/DIESEL	52
FIGURE 35: SYSTEME D'EXPLOITATION POUR UN SYSTEME PV-EOLIEN-DIESEL	53
FIGURE 36: CIRCUIT DE PUISSANCE D'UN HACHEUR BOOST	54
FIGURE 37: MODELE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	55
FIGURE 38: CONFIGURATION GLOBALE DU SYSTEME EOLIEN	55
FIGURE 39 : SCHEMA DE PUISSANCE DU REDRESSEUR TRIPHASE A MLI	56
FIGURE 40 : SYSTEME EOLIEN AVEC CONVERTISSEUR MPPT	57
FIGURE 41 : SCHEMA DE STRUCTURE DE CONTROLE DU SYSTEME EOLIEN.....	57
FIGURE 42 : ARCHITECTURE GLOBALE DU SYSTEME DE STOCKAGE ETUDIE	58
FIGURE 43 : MODELE SIMPLE DE LA BATTERIE.....	58
FIGURE 44 : REGULATEUR DE CHARGE BATTERIE	59
FIGURE 45 : CIRCUIT DE PUISSANCE D'UN HACHEUR BUCK-BOOST.....	59

FIGURE 46 : RACCORDEMENT DES BATTERIES AU BUS CONTINU VIA UN HACHEUR BUCK-
BOOST 60
FIGURE 47: CIRCUIT DE PUISSANCE D'UN ONDULEUR..... 60

Liste des tableaux

TABLEAU 1: COMPARATIF DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES	17
TABLEAU 2: LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DE CHAQUE CONFIGURATION	50

Liste des acronymes et des symboles

Grandeur	Signification
CIGS	Cuivre Indium Gallium Sélénium/Soufre
Wafer	tranche de silicium
PV	photovoltaïque
SH	Système hybride
SHSER	Système hybride à sources d'énergie renouvelables
SEH	Système énergétique hybride
NiOOH	Oxyhydroxyde de nickel
°C	Degré Celsius
NiMH	Hydrures métalliques de nickel
Ni-Cd	Nickel cadmium
Li-ion	Ions de lithium
AC	Courant Alternatif (Alternating current)
DC	Courant Continu (Direct current)
CC	Courant Continu
CA	Courant Alternatif
MECCGOPSEH	Module Electronique de Contrôle de Charge et de Gestion Optimale de la Production pour Systèmes énergétiques Hybrides
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPPT	Poursuite du point de puissance maximale (Maximum power point tracking)
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent
h	Constante de Planck
E_g	L'énergie de gap de semi-conducteur
E_c	L'énergie de la bande de conduction
E_v	L'énergie de la bande de valence
V	Tension de cellule
λ_n	Vitesse spécifique ou normalisée
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne
P_n	Puissance nominale de l'éolienne
v_n	Vitesse nominale de l'éolienne
v_d	Vitesse de démarrage de l'éolienne
v_m	Vitesse maximale de l'éolienne
P_{vent}	Puissance du vent
ρ	Densité d'air
$P_{Turbine}$	Puissance aérodynamique
V	Vitesse de déplacement de la masse d'air
R	Rayon de la pale
Ω	La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s]
Γ	Couple Produit par L'éolienne
λ	Vitesse spécifique
V1	La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne
V2	la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne
P_m	Puissance absorbée par le rotor
P_{max}	Puissance maximale

C_{Pmax}	Coefficient de puissance maximal
P_{Rotor}	Puissance du rotor
$P_{MaxRotor}$	Puissance maximale du rotor
$P_{reelle, rotor}$	Puissance réelle du rotor

Introduction générale

La consommation globale d'énergie est très élevée et en croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, la consommation énergétique va continuer à augmenter, portée par l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant, sans égard aux chiffres pris en considération.

A cet effet, les énergies renouvelables apparaissent aujourd'hui et à long terme comme une solution adaptée, qui couvre cette exigence énergétique en réduisant le plus grand désavantage émis des combustibles fossiles et fissiles.

Les énergies renouvelables sont devenues une forme d'énergie indispensable à travers leur flexibilité, leur simplicité ainsi que la multiplicité des domaines d'activité dans lesquels ils sont appelés à jouer un rôle majeur. Ces modes de production et les moyens de distribution associés feront l'objet de profonds changements dans les décennies à venir.

Disponibles en plus grandes quantités, Les ressources d'énergie renouvelable représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes, habitant des régions isolées, d'accéder à l'électricité. Ces atouts, alliés à des filières de plus en plus performantes, favorisent le développement des énergies renouvelables.

Considérant les caractéristiques saisonnières respectives, l'énergie éolienne (issue du vent), et l'énergie photovoltaïque (solaire) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles.

L'objectif de notre travail est d'établir une chaîne de conversion énergétiques du système hybride photovoltaïque-éolien avec un sous-système de stockage totalement autonome et d'assurer un meilleur rendement.

Le mémoire présenté et rédigé en cinq chapitres principaux qui se résument dans ce qui suit :

Le premier chapitre présente une généralité sur les énergies renouvelables et ces différentes sources disponible.

Le deuxième et le troisième chapitre présente et expose les deux sources d'énergies renouvelables, qui sont l'énergie solaire et éolien, ainsi que le principe de fonctionnement des systèmes qui les entraînent.

Le quatrième chapitre se compose de deux parties dans la première une description générale, et le principe de fonctionnement du système hybride et dans la deuxième les différents types de stockage.

Le cinquième chapitre est consacré à la représentation de chaque éléments constitue le système hybride éolien-photovoltaïque et élaborer un système d'exploitation.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui résume les résultats.

Chapitre I

Généralités sur les

énergies

renouvelables

1. Les énergies renouvelables

Le monde d'aujourd'hui a connu une transformation fondamentale du domaine des systèmes de production de l'électricité, qui est la dérégulation du marché de l'électricité. Les raisons de cette dérégulation sont variées et multiples selon les pays. Cependant une de ces conséquences est l'apparition de nouveaux moyens de production nommés les énergies renouvelables au sein des réseaux électriques existants.

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisable, disponibles à volonté, diverses et variées. Grâce à ces énergies peu polluantes, on peut envisager un système de production énergétique prolifique qui possède de nombreux avantages. Elles sont plus propres, plus respectueuses de la nature que les énergies fossiles et fissiles, écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont gratuites une fois les installations de production rentabilisées [1].



Figure 1: Les différents types d'énergies renouvelables [2]

1. 1. Les avantages d'énergies renouvelables

- Les énergies renouvelables sont disponibles naturellement.
- Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre.

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

- Les conséquences des accidents, dus à ces énergies, ne sont pas importantes et ils sont faciles à résoudre par rapport aux énergies conventionnelles (centrale nucléaire ou pétrolière).
- Le coût d'une énergie renouvelable est principalement fixé par l'investissement industriel.
- La destruction des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteux.

1. 2. Les inconvénients d'énergies renouvelables

- L'intermittence des sources des énergies renouvelables (à l'exception de l'énergie géothermique).
- Les énergies renouvelables demandent de l'espace et ont un impact sur les usages des territoires.
- Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre, et inversement (l'énergie issue de la combustion de la biomasse est propre à condition que la production ne soit pas excessive et permette à la flore de réabsorber tout le dioxyde de carbone dégagée).
- La construction des installations influence l'aspect visuel du paysage.
- Les sources renouvelables offrent une variation indépendamment de la demande, comme les énergies solaire et éolienne qui exigent l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie.

2. Types d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont diverses et variées, allant du solaire à l'éolien, géothermie, biomasse, et hydroélectrique.

2. 1. Energie biomasse

Le terme, Biomasse, désigne l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale (bois, déchets végétaux, algues) pouvant devenir source d'énergie par combustion. La biomasse constitue parmi les premières sources d'énergies renouvelables produites en Europe devant l'énergie hydraulique, éolienne et géothermique. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. Elle rejette des gaz à effet de serre mais qui sont toutefois absorbés naturellement par les arbres. Cependant, elle pourra procurer l'énergie la moins chère et surtout la plus locale du marché [3].

2. 2. Energie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée. Le solaire peut être exploité à grande échelle dans des parcs prévus à cet effet ou à petite échelle chez les particuliers. Cette énergie est propre, n'émet aucun gaz à effet de serre et sa matière première, gratuite, inépuisable et disponible partout dans le monde [3].

2. 3. Énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (la terre) et thermos (la chaleur) est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Par extension, la géothermie désigne aussi parfois l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur.

Pour capter l'énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe d'eau chaude captive naturelle, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et remonte chargé de calories (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou converties partiellement en électricité [4].

2. 4. Energie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique est une énergie qui utilise l'énergie hydraulique pour produire de l'électricité grâce à une turbine hydroélectrique. Celle-ci convertit l'énergie mécanique de l'eau en mouvement (chute d'eau, cours d'eau, courant). Elle produit donc de l'électricité de manière renouvelable et en émettant très peu de gaz à effet de serre. Ce n'est pas tout à fait une énergie durable, puisqu'elle implique le plus souvent la création d'un barrage, donc d'un obstacle à la circulation des espèces, des sédiments et des embarcations [3].

2. 5. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [5].

L'énergie éolienne, sans conteste est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre ou off-shore, les éoliennes démontrent d'excellentes capacités de production et sont des alternatives viables pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile [6].

Chapitre II

Généralités sur

l'énergie solaire

1. Energie solaire :

1. 1. Généralités sur le soleil :

Le Soleil est une étoile située à 149 597 870 km (soit 1210 rayons terrestres) de la Terre. Les dernières estimations remontent à 4,6 milliards d'années sa naissance : le soleil s'est formé environ 100 millions d'années avant la Terre. Comme la plupart des étoiles, le soleil est entièrement composé de gaz : ces gaz sont en grande majorité l'hydrogène et l'hélium. [7]

Le rayonnement solaire qui parvient sur la Terre en un an représente plus de 10 000 fois la consommation mondiale d'énergie, toutes formes et usages confondus et notre étoile bienfaitrice a une durée de vie prévisible de 5 milliards d'années. [8]

1. 2. Définition :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui est dépendante du soleil. Cela signifie que la matière première est le soleil. Elle se place dans la catégorie des énergies renouvelables puisqu'on la considère comme inépuisable. On dit aussi que c'est une énergie 100% verte car sa production n'émet pas directement de CO₂. Grâce à cette énergie, il est possible de produire de l'électricité. Elle sera captée par des panneaux solaires ou des centrales thermiques (Figure 2). Ces installations captent les rayons produits par le soleil. Elles convertissent ensuite l'énergie du soleil en électricité. [9]

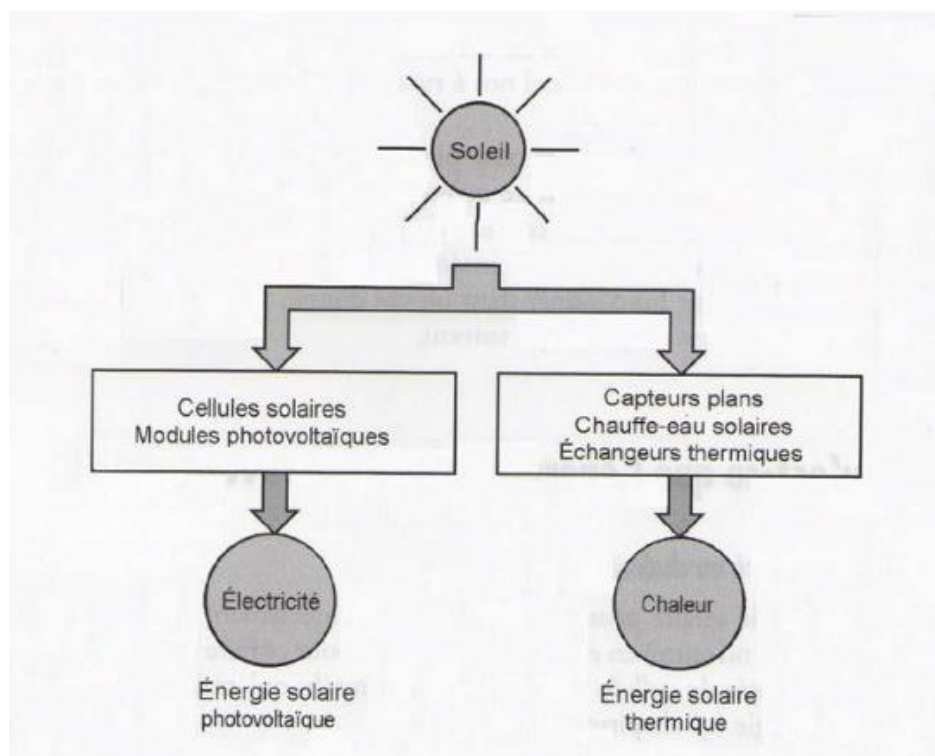


Figure 2 : Les deux types d'énergie solaire [9]

Chapitre II : Généralités sur l'énergie solaire

Plus précisément, le principe est de transformer l'énergie portée par les photons dans la lumière, en électricité. C'est là que rentre en jeu la cellule photovoltaïque : lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux. Ces derniers génèrent un courant électrique continu qui sera converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur.

Cette électricité produite peut être immédiatement employée pour faire fonctionner vos appareils ou vous éclairer.

2. Energie solaire photovoltaïque :

2.1. Définition :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micropuissance calculé en watt crête (W_c) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur.

L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau.

Un générateur solaire photovoltaïque est composé de modules photovoltaïques eux même composés de cellules photovoltaïques connectées entre elles.

Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles vous vous trouvez. [10]

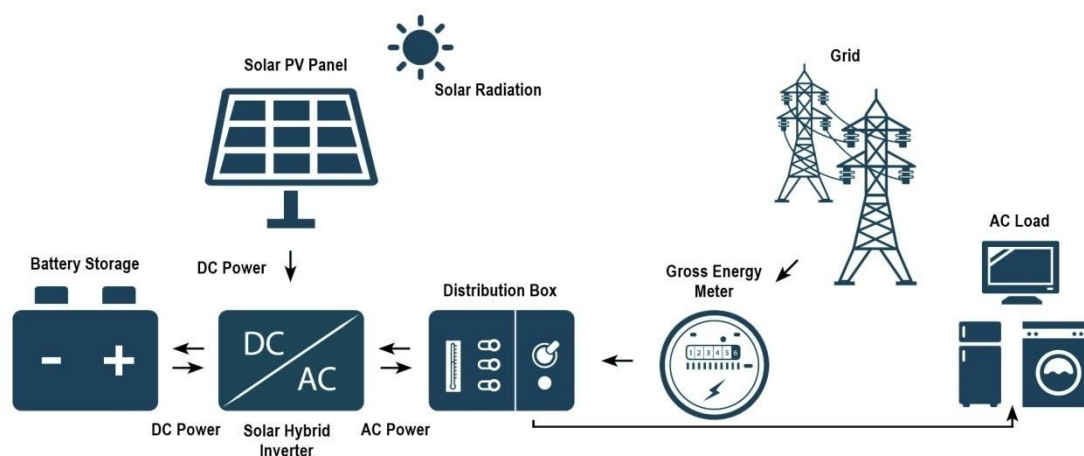


Figure 3 : Système photovoltaïque [11]

2. 2. Historique :

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par un physicien français, Antoine Becquerel. En 1921, Albert Einstein explique l'effet photoélectrique à la base du photovoltaïque, travaux qui lui valent le prix Nobel de physique la même année.

Les années 1960 voient les premières applications industrielles de l'énergie photovoltaïque, plus précisément dans l'aérospatiale. La NASA équipe ainsi ses premiers satellites de panneaux solaires pour les alimenter en électricité.

Les premières installations photovoltaïques terrestres voient le jour dans les années 1970. La première centrale résidentielle est construite en 1973 aux États-Unis, dans le Delaware.

Aujourd'hui, le photovoltaïque est partout, avec une augmentation constante des capacités installées. Entre 2007 et 2012, la capacité mondiale a ainsi été multipliée par 10.

2. 3. Électricité solaire par effet photovoltaïques :

2. 3. 1. Principe de fonctionnement :

L'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français BECQUEREL dès 1839, l'effet photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité (Volt), par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous vers la zone p. [12]

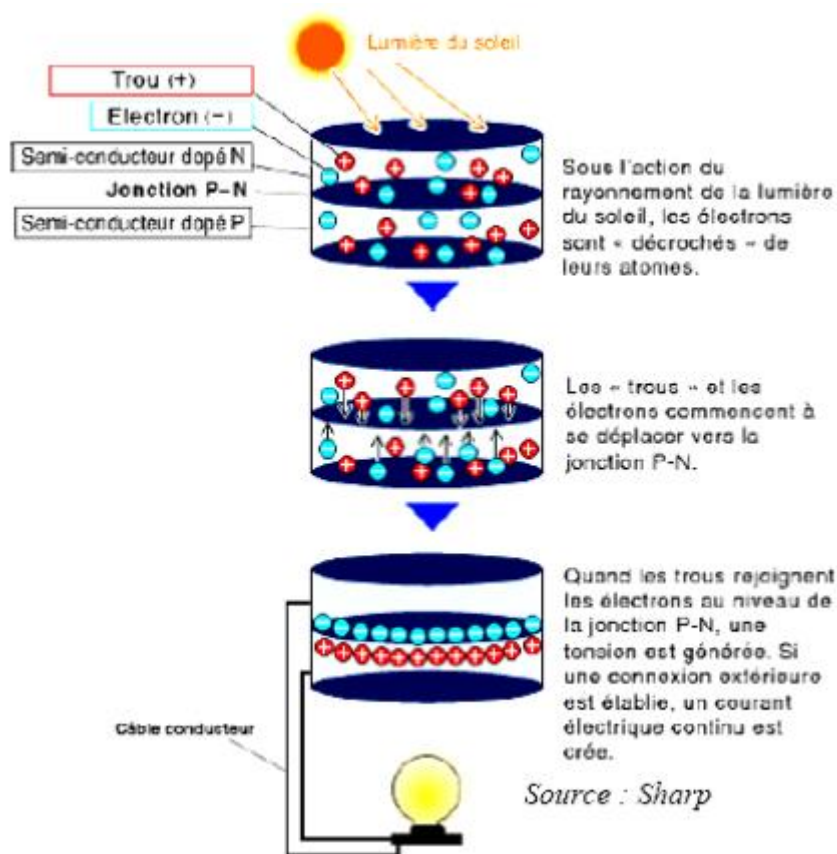


Figure 4 : effet Photovoltaïque [12]

Donc ce principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$).[12]

- ❖ Si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron- trou dans différents points de la jonction. Donc toute particule minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires (Figure 5).
- ❖ Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de photons réseau cristallin puis perdue en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.
- ❖ Si les photons ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

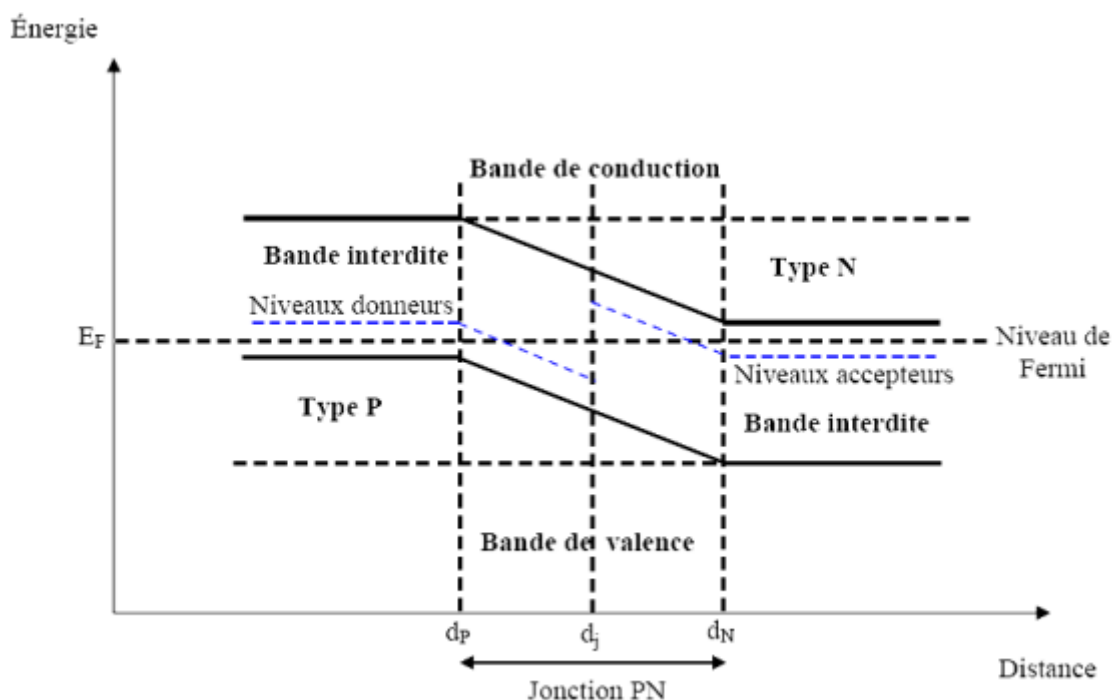


Figure 5 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction [12]

2. 3. 2. Cellules photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. [12]

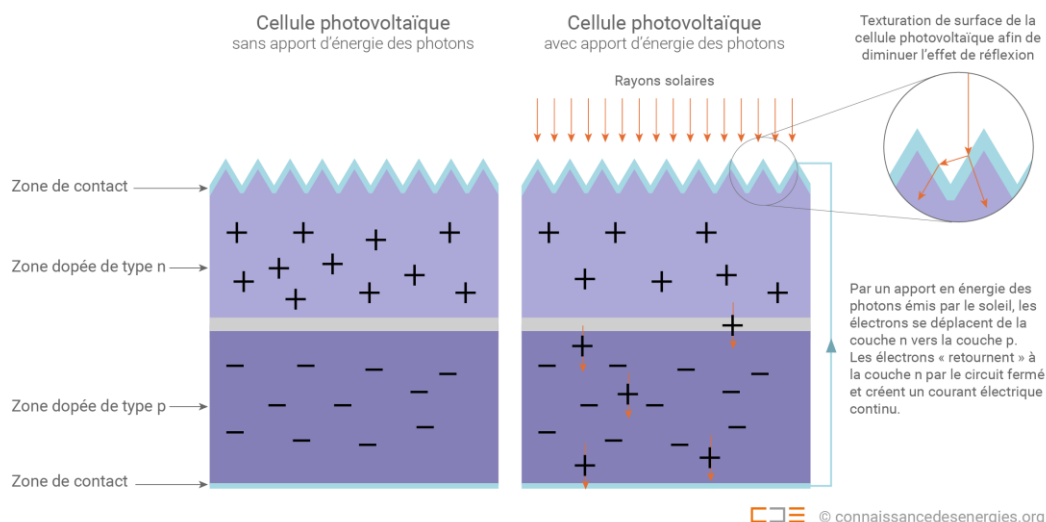


Figure 6 : Constitution d'une cellule photovoltaïque [12]

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n. Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité. [12]

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V. [13]

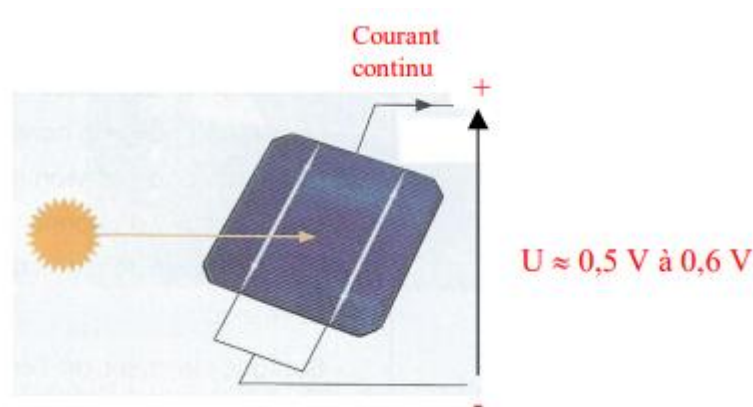


Figure 7 : Cellule photovoltaïque [13]

2. 4. Différents types des cellules photovoltaïques

On rencontre plusieurs technologies au niveau des cellules photovoltaïques. Tout d'abord celles basées sur le silicium cristallin (les cellules bleues) avec 85% de part de marché, qui se déclinent en monocristallines ou en multi cristallines (la plus courante

aujourd'hui). Dans cette technologie, les cellules sont mises en série et assemblées dans les modules photovoltaïques. Sa maturité garantit des performances élevées et une fiabilité reconnue. On trouve aussi des modules basés sur des technologies en couches minces inorganiques sur trois filières : le tellure de cadmium, le silicium en couche minces dont le silicium amorphe et les chalcopyrites dont le CIGS (Cuivre Indium Gallium Sélénium/Soufre). [14]

2. 4. 1. Cellules monocristallines

Sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer (tranche de silicium) est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse. [15]

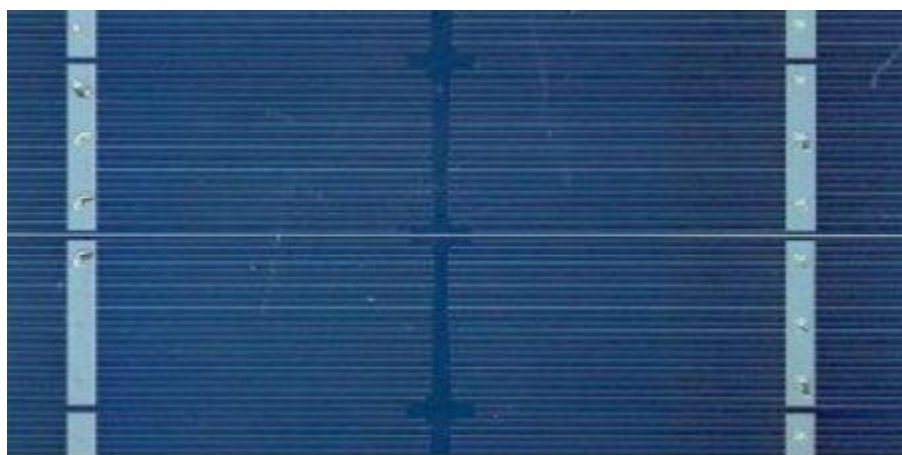


Figure 8: Cellule au Silicium Monocristallin [15]

2. 4. 2. Cellules poly cristallines

Sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est

qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure poly-cristalline. Durée de vie estimée: 30 ans. [16]



Figure 9: Cellule au Silicium poly cristallin [16]

2.4.3. Amorphes

Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé dévalorisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly cristallines ou Monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grande surface à bas coût en utilisant peu de matière première. [16]

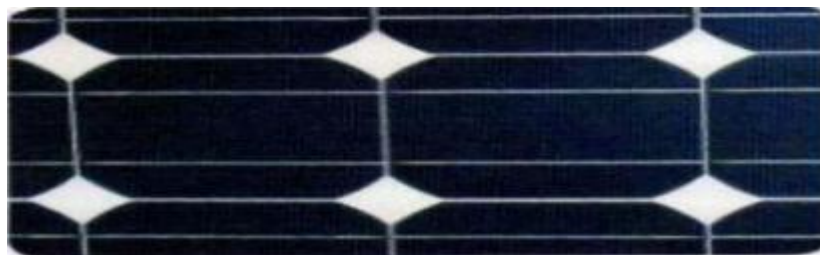





Figure 10: Cellule au Silicium amorphe (couche mince) [16]

Chapitre II : Généralités sur l'énergie solaire

Tableau 1: Comparatif des différentes technologies [17]

Technologies	Monocristallin	Poly cristallin	Amorphe
Cellule et module			
Caractéristiques	<ul style="list-style-type: none"> - Très bon rendement : 14 à 20 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : élevé. - Puissance : 100 à 150 Wh/m². 7 m²/kWh. - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bon rendement : 11 à 15 %. - Durée de vie : importante (30 ans) - Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins - Puissance: 100 Wh/m². 8 m²/kWh. - Rendement faible sous un faible éclairement. - perte de rendement avec l'élévation de la température. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rendement faible : 5 à 9 %. - Durée de vie : assez importante (20 ans) - Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies - Puissance : 50 Wh/m². 16m²/kWh. - Fonctionnement correct avec un éclairement faible. - Peu sensible aux températures élevées.
Part de marché	43%	47%	10%

2. 5. Module photovoltaïques

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés, délivre au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN). Pour produire plus de puissance,

Chapitre II : Généralités sur l'énergie solaire

plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque. En effet, les modules PV sont composés d'un ensemble de cellules mises en série, réalisant la conversion proprement dite de la lumière du soleil en électricité. Ils sont eux-mêmes associés en série et parallèle pour former un champ photovoltaïque d'une puissance crête définie selon des conditions spécifiques d'éclairement, de température et de spectre solaire. La plupart des modules commercialisés sont constitués de deux à quatre réseaux de cellules en silicium cristallins connectés en série. [18]

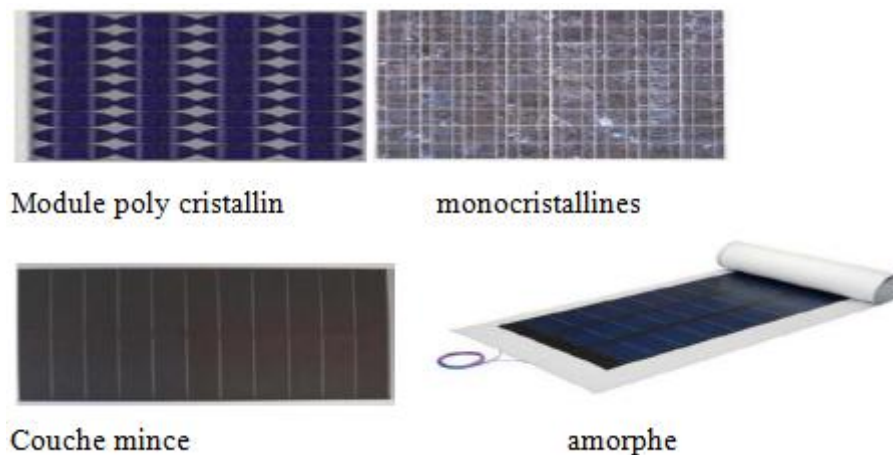


Figure 11: Module photovoltaïque [18]

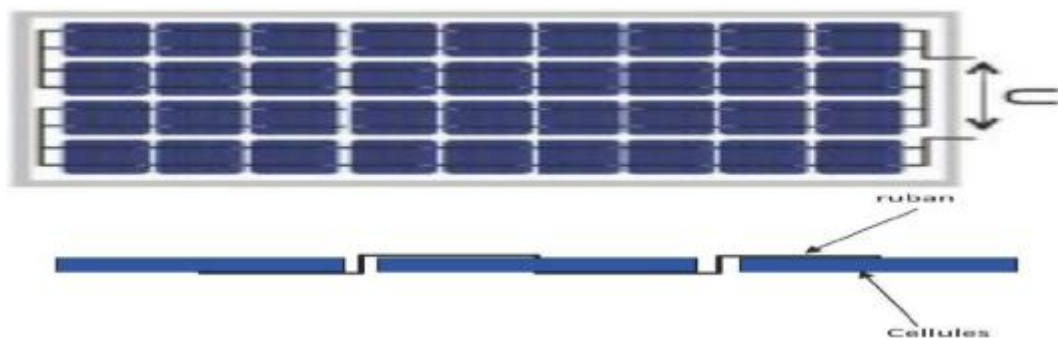


Figure 12: Câblage des cellules dans un module [18]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur. [18]

2. 6. Les avantages et les inconvénients

2. 6. 1. Les avantages :

- D'abord, une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu. [19]

2. 6. 2. Les inconvénients :

- Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.
- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée. [19]

Chapitre III

Energie éolienne

1. Définition de l'énergie Eolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [20].

2. Historique de l'éolienne

Depuis l'Antiquité, les « moulins à vent » convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre du grain (Figure 13). De nos jours, on trouve encore des éoliennes couplées à des pompes à eau, souvent utilisées pour irriguer des zones sèches, assécher des zones humides ou abreuver le bétail. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à « Poul La Cour » en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisé (dans les années 40 au Danemark, 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite et il faudra attendre la crise pétrolière de 1974 qui a relancé les études et les expériences sur les éoliennes.



Figure 13: Photographie de deux moulins à vent [20]

3. Constitution d'une éolienne

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux [20]:

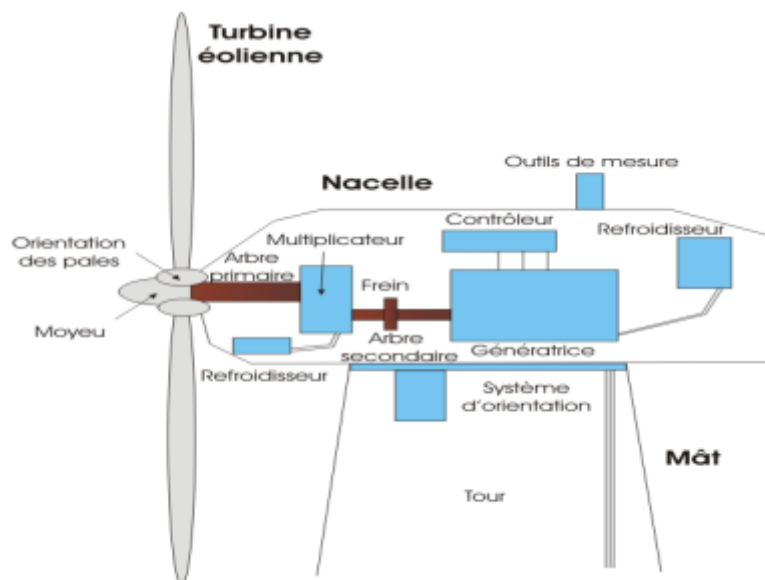


Figure 14: Principaux composants d'une éolienne [20].

- **Le mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.
- **La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle

(nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent), la variation de la masse d'une nacelle en fonction de diamètre du rotor évolue de manière exponentielle selon la (Figure 15).

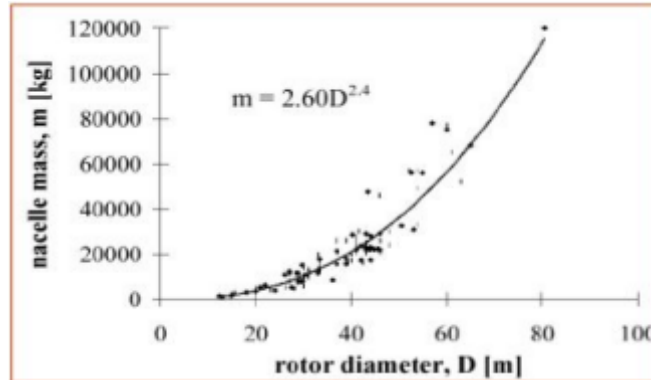


Figure 15: variation de masse de la nacelle en fonction de diamètre du rotor [21]

- **Le rotor**, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3 (rotor tripale). Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées ; actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'augmentation du diamètre du rotor va accroître la masse des pales comme indiqué (Figure 16) [20].

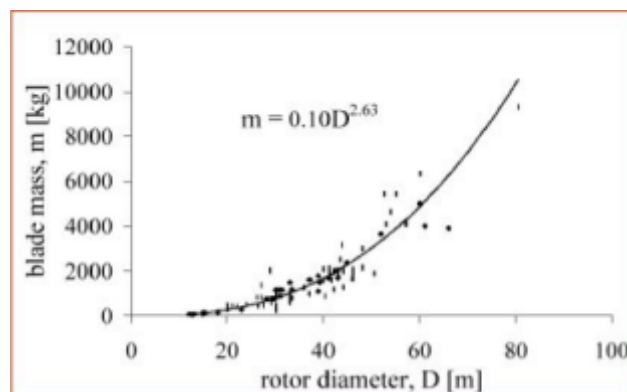


Figure 16: variation de la masse d'une pale en fonction de diamètre du rotor [21].

4. Fonctionnement d'une éolienne

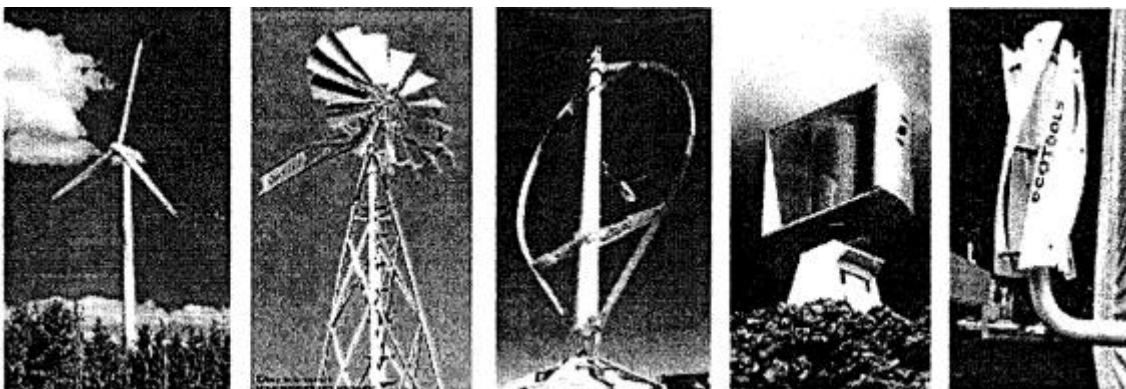
On utilise un aérogénérateur, plus communément appelé « éolienne ». Son fonctionnement est simple et s'inspire des moulins à vent. La machine se compose de trois pales (en général) portées par un moyeu constituant le rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet

ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter le rotor afin qu'il soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent (énergie que possède un corps du fait de son mouvement) en énergie mécanique (mouvement mécanique des pales). Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales dépend de leur taille : plus elles sont grandes, moins elles tournent rapidement. Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. Il faut donc d'abord que l'énergie mécanique des pales passe par un multiplicateur qui a pour rôle d'accélérer le mouvement de l'arbre lent de transmission, couplé aux pales, à l'arbre rapide couplé à la génératrice. L'électricité produite par le générateur a une tension d'environ 690 volts. Ne pouvant pas être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur et sa tension est augmentée à 20000 volts. Elle est alors injectée dans le réseau électrique et peut-être distribuée aux consommateurs. [22]

5. Caractéristique des turbines éoliennes

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne, il existe deux grandes catégories d'éoliennes, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice (figure 17) [23] :

- Turbines à axe horizontal
- Turbines à axe vertical



Éolienne à axe horizontal

Éolienne à axe vertical

Figure 17: Différent types de turbines éolienne.[24]

5. 1. Turbines à axe vertical

Les turbines à axe vertical sont très peu répandues et assez mal connues. Le rotor de ce type de turbine fonctionne grâce à la portance et se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple résistant au démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro ce qui constitue un avantage. Les turbines à axe vertical présentent certains avantages : machinerie au sol, pas besoin d'orientation en fonction de la direction du vent, construction souvent simple. Elles tournent à faible vitesse et sont de ce fait peu bruyantes. Elles présentent par contre des difficultés pour leur guidage mécanique du fait que, le palier bas devant supporter le poids de l'ensemble de la turbine. [24]

5. 2. Turbines à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pâles (les plus courantes) et les multipâles. La caractéristique de puissance C_p dépend principalement du nombre de pâles utilisé. La figure (18) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pâles [25]. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée, λ_n , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale. [24]

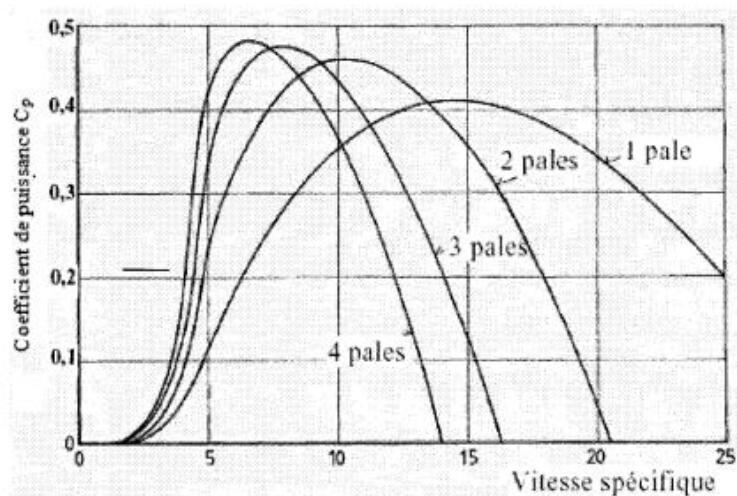


Figure 18: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse de rotation [25].

5. 3. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale P_n obtenue à partir d'une vitesse du vent v_n , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à v_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante [26].

A côté de la vitesse nominale v_n , on spécifie aussi :

- la vitesse de démarrage v_d , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- la vitesse maximale du vent v_m , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Les vitesses v_n , v_d et v_m définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (figure 19) :

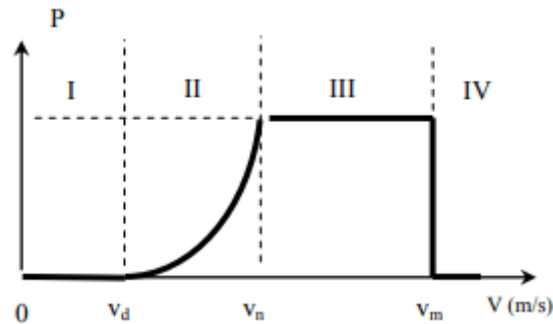


Figure 19 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent[27]

- la zone I, où $P = 0$, la turbine ne fonctionne pas.
- la zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent v .
- la zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .
- la zone IV, dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie [27].

6. Notion théorique sur l'éolien

6. 1. Coefficient de Puissance C_p

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface ($S=\pi R^2$ où R =rayon de pale) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse V [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (1)$$

Chapitre III : Energie éolienne

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance aérodynamique [20] :

$$P_{Turbine} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (2)$$

Ou :

$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible (récupérable)}) \quad (3)$$

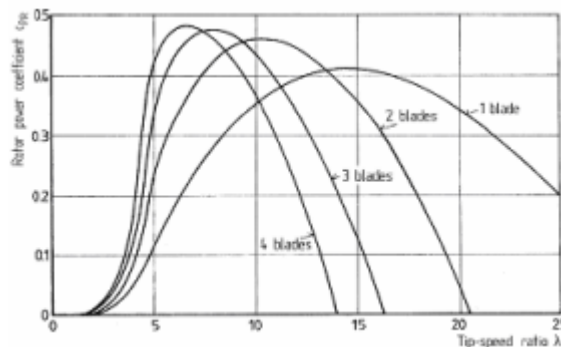


Figure 20: Coefficient de puissance [28]

6. 2. Couple Produit par L'éolienne

$$\Gamma = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (4)$$

Avec :

Ω : La vitesse de rotation de l'éolienne en [rd/s]

6. 3. Vitesse Spécifique de L'éolienne

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent:

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_{vent}} \quad (5)$$

6. 4. Limite de Betz

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée. Le théorème du physicien allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à $16 / 27$, soit environ 59 % de l'énergie totale du vent. La notion de coefficient de puissance C_p peut maintenant être présentée. Cette limite n'est en réalité jamais

Chapitre III : Energie éolienne

atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique normalisée λ [20].

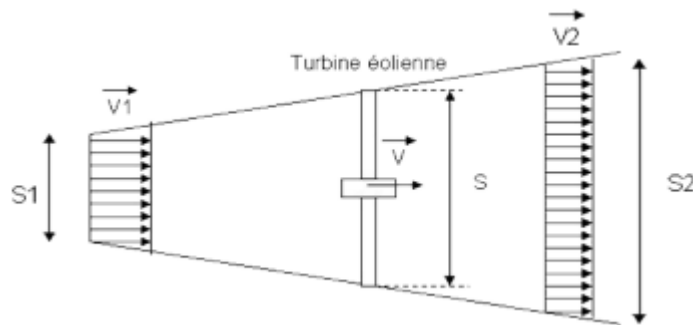


Figure 21: Tube de courant autour d'une éolienne [20].

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant (Figure 21).

Avec:

V_1 : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

V : la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, de l'ordre de quelques m/s.

V_2 : la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne

Où :

$V_1 \succ V \succ V_2$ Sont parallèles à l'axe du rotor.

La puissance récupérable du vent s'exprime par:

$$P = Cp \left(\frac{1}{2}\right) \rho S V^3 \quad (6)$$

On peut retrouver le $(Cp)_{\max}$ en faisant une étude des puissances, sachant que :

- la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation d'énergie cinétique du vent :

$$\Delta E_C = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) \quad (7)$$

- d'autre part, l'effort qui s'exerce sur l'éolienne crée une puissance P_m ; le théorème de la quantité de mouvement donne :

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (8)$$

Alors :

$$P_m = FV = \rho S V (V_1 - V_2) V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (9)$$

P_m : correspond à la puissance absorbée par le rotor, soit la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur.

On peut déterminer la vitesse V_2 pour laquelle la puissance est maximale :

$P_m = \Delta E_C$ soit :

$$\rho S V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_2^2 - V_1^2) \quad (10)$$

Chapitre III : Energie éolienne

Par simplification :

$$V(V_2 - V_1) = \frac{1}{2}(V_2 - V_1)(V_2 + V_1) \quad (11)$$

Alors :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (12)$$

En reportant l'expression de V (12) dans l'expression (9) :

$$P_m = \rho S \frac{(V_1 + V_2)^2}{4} \rho S = \rho S \frac{(V_1 + V_2)}{4} (V_1^2 - V_2^2) \quad (13)$$

La puissance est maximale, pour V_2 telle que :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \quad (14)$$

Ce qui donne :
$$-3V_2^2 - 2V_1V_2 + V_1^2 = 0 \quad (15)$$

On résout alors cette équation du second degré, d'inconnue V_2 . On obtient deux solutions : l'une est négative donc impossible et l'autre correspondant à

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (16)$$

La puissance est maximale pour : $V_2 = \frac{V_1}{3}$

En reportant (12) et (16) dans l'expression (9) la puissance maximale P_{max} devient :

$$P_{max} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27}\right) \quad (17)$$

On déduit le coefficient de puissance maximal C_{Pmax} pour une éolienne.

$$P_{max} = \rho S V_1^3 \left(\frac{8}{27}\right) = \frac{1}{2} C_{Pmax} \rho S V_1^3 \quad (18)$$

On trouve alors :

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.59 \quad (19)$$

Le coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent :

$$C_P = \frac{P_{Rotor}}{P_{Vent}} \quad (20)$$

En tenant compte de la limite de Betz, C_{Pmax} vaut donc :

$$C_{Pmax} = \frac{P_{Rotor}}{P_{Vent}} = \frac{P_{Rotor}}{\frac{1}{2} \rho A v^3} = \frac{16}{27} \quad (21)$$

La puissance maximale du rotor sera égale à :

$$P_{MaxRotor} = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 = C_{Pmax} P_{Vent} \quad (22)$$

Chapitre III : Energie éolienne

En tenant compte de tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50% de la limite de Betz.

$$P_{reelle, rotor} = \frac{1}{2} \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (23)$$

Pour conclure, dans bien des cas :

$$P_{reelle, rotor} = 0.3 P_{vent} \quad (24)$$

Les courbes de La figure 22 montrent l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales ; notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Elles dépendent pratiquement du profil des pales. Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour $\lambda \cong 7$, c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale. Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients aérodynamiques de puissance ou de couple en fonction de la vitesse normalisée λ .

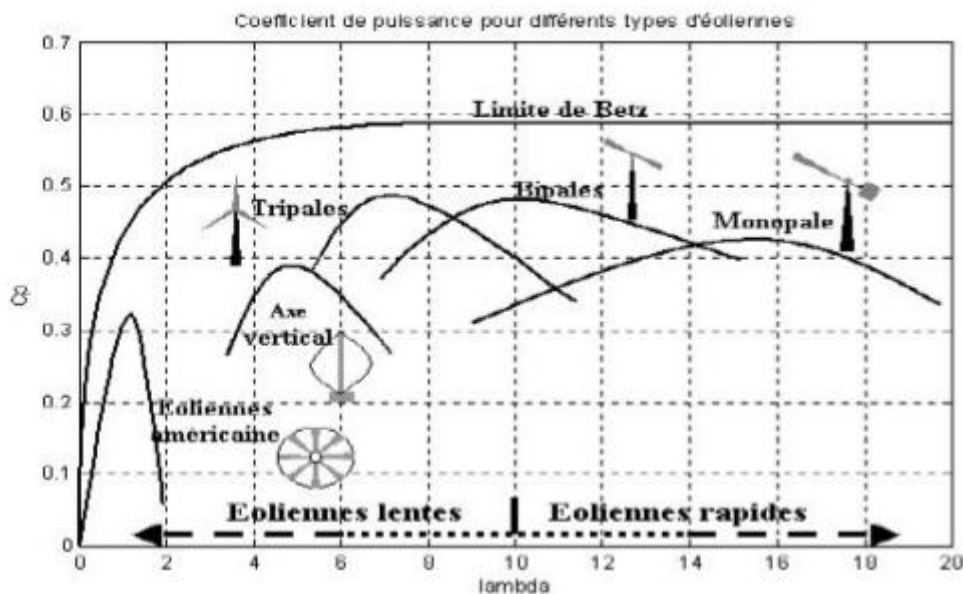


Figure 22: C_p en fonction de λ pour différentes turbines [29]

- D'après la (Figure 22), les courbes donnant le coefficient de couple dans les systèmes à axe vertical indiquent qu'il évolue de manière identique.

- Ces courbes $C_p(\lambda)$ montrent clairement l'avantage des axes horizontaux en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,...).
- Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (3, 2,1) par rapport aux axes verticaux ou aux multipales.

7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

7.1. Les avantages

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.[30]

7.2. Les inconvénients

- Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.
- Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs.[30]

Chapitre IV

Généralités sur un système hybride et le stockage de l'énergie

1. Introduction

La production d'électricité décentralisée par sources d'énergies renouvelables, offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux.

Considérant leurs caractéristiques saisonnières respectives, les énergies (solaire et éolienne) ne se concurrencent pas mais au contraire peuvent se valoriser mutuellement. C'est pourquoi on propose ici un système hybride composé de ces deux sources d'énergie, qui consiste en l'exploitation optimale de la complémentarité entre elles. Certes, du point de vue économique les résultats apparaissent assez convaincants quant à la rentabilité du système hybride ci-dessus désigné, mais cela n'exclut pas le fait que la combinaison des deux sources constitue un système assez complexe du point de vue technologique

Dans ce chapitre, on va présenter les systèmes d'énergies hybrides et les différents types de stockage de l'énergie.

2. Système hybride

2.1. Définition d'un système hybride

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH).

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue. Dans bien de régions, les journées ensoleillées sont en général caractérisées par une activité éolienne faible alors que les vents forts sont observés plutôt lors de journées nuageuses ou la nuit. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. [31]

Le but d'un système d'énergie hybride est d'assurer la fourniture de l'énergie demandée par la charge et de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable. [32]

2. 2. Les structures de systèmes hybrides

Ilya plusieurs différents types des configurations dans notre system de SEH :

2. 2. 1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle

a. Systèmes photovoltaïque avec source conventionnelle

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud. L'objectif de ces systèmes est d'alimenter sans interruption lorsqu'ils travaillent en mode autonome. Les moteurs diesel peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. Il y a différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel :

- Configuration Photovoltaïque avec Diesel série
- Configuration Photovoltaïque avec Diesel commuté
- Configuration Photovoltaïque avec Diesel parallèle

b. Systèmes éolien avec source conventionnelle

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel. De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride.

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. [33]

c. Systèmes photovoltaïque, éolien et diesel

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie.

Ces systèmes peuvent être autonome ou interconnectés avec le système électrique du pays. [33]

2. 2. 2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible [33]. Il y a quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage :

- Systèmes hybrides photovoltaïque avec stockage
- Système hybride éolien avec stockage

- Système hybride photovoltaïque éolien avec stockage
- Systèmes hybrides photovoltaïque éolien sans stockage

2. 3. Classification des systèmes hybrides:

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite sont présentées les classifications les plus répandues. [34]

2. 3. 1. Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, On trouve les systèmes hybrides, travaillant en parallèle avec le réseau électrique, appelés aussi connectes réseau. Ces systèmes contribuent à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe fonctionnent en régime isole ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc. [34]

2. 3. 2. La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complet, une centrale tout entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, des volants d'inertie, etc. ...

La dernière classification possible est celle relative au type de sources d'énergie renouvelables utilisées. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources. Un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté. Son

importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc. [34]

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la Figure (23).

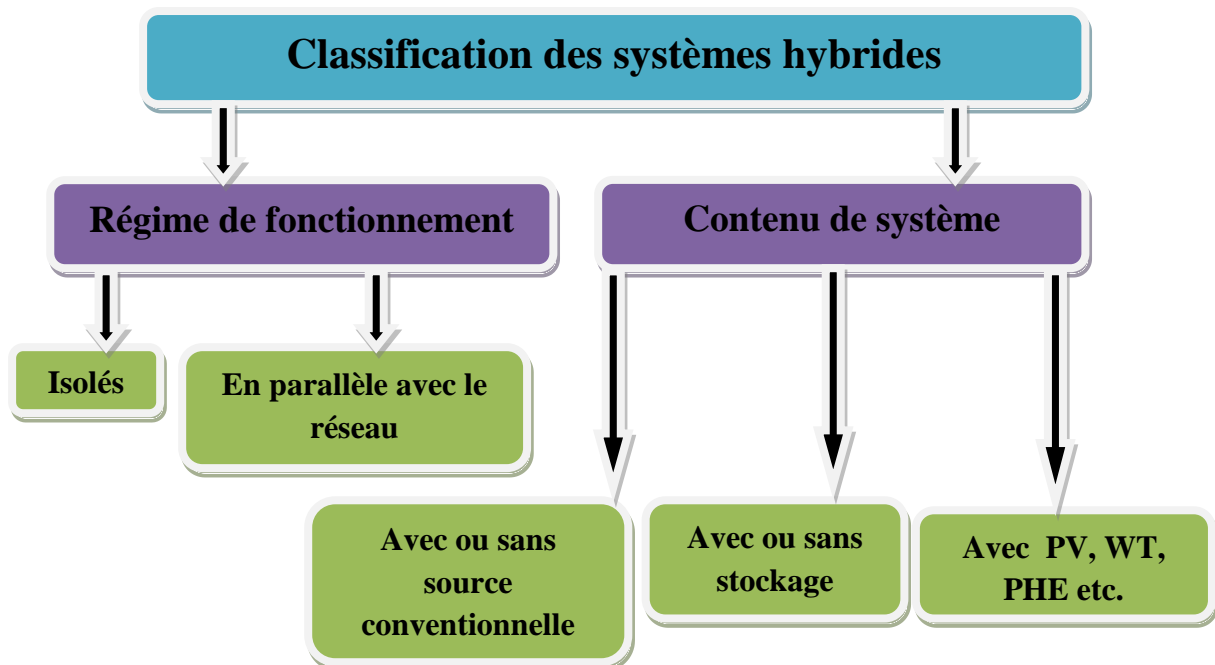


Figure 23: Classification des systèmes hybrides [34]

2. 4. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides

Le système d'énergie hybride peut présenter des avantages et des inconvénients qui peuvent résumés dans ce qui suit [35-36].

2. 4. 1. Les avantages

- Deux sources d'énergie renouvelable ou plus peuvent être intégrées dans un seul système, en fonction du potentiel d'énergie renouvelable local.
- Aucune forme d'émission n'est produite à partir de tous les systèmes hybrides d'énergie renouvelable (comme le photovoltaïque et l'éolienne).
- Modulaire (photovoltaïque et système de vent) sont faciles à installer et dans la plupart des cas ne nécessite aucune conception pour un usage domestique.
- Les systèmes hybrides plus petits sont moins chers que les systèmes plus grands et complexes comme le système nucléaire.

- Le carburant pour système énergétique hybride est abondant, gratuit et inépuisable, donc l'énergie électrique produite par ce système est indépendante du prix du carburant.

2. 4. 2. Les inconvénients

- Augmentation de la complexité du système.
- Difficulté d'optimisation des divers organes du système.
- Plus complexe que les systèmes mono source et nécessite du Stockage.
- Coût capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- La durée de vie des composants d'un SEH peut être beaucoup plus courte que la durée de vie normale des composants individuels (fonctionnement en connexion aux réseaux interconnectés). Les points les plus critiques sont en général la dégradation des batteries, l'endommagement des démarreurs diesel et du système mécanique de freinage des éoliennes et la carbonisation excessive des cylindres du moteur diesel.

3. Le stockage de l'énergie :

L'augmentation de la part de renouvelable dans la fourniture d'énergie nécessite la mise en œuvre de systèmes de stockage de cette énergie. La nature de stockage sera différente selon la durée à assurer. Le développement de moyens de stockage d'énergie performants et économiques est aussi indispensable pour diminuer la dépendance au pétrole extrêmement forte du secteur des transports. Le stockage d'énergie a aussi un rôle à jouer pour accompagner une pénétration accrue du nucléaire. Les centrales doivent en effet être opérées de façon aussi continue que possible et le stockage en période creuse pourrait permettre d'éviter les centrales thermiques ou les turbines à gaz utilisées en période de pointe, avec les pollutions associées [32].

3. 1. Différents modes de stockage

Le stockage de l'énergie électrique n'est pas possible directement. Il faut transformer l'énergie électrique en une énergie potentielle différente (mécanique, électrochimique...), elle même stockable, puis disposer d'une seconde transformation pour la ramener sous sa forme primitive.

Les transformations technologiquement disponibles sont très nombreuses. Quelques exemples pour le stockage d'électricité [37] :

- **Stockage électrochimique :**

Dans le cas du stockage électrochimique, l'énergie électrique est conservée sous une forme chimique. Le stockage s'effectue grâce à des réactions électrochimiques qui consistent à faire circuler des ions et des électrons entre deux électrodes. Le stockage électrochimique tire profit du fait que l'énergie électrique et chimique partage le même vecteur qui est l'électron. Cet avantage permet de limiter les pertes liées à la conversion de l'énergie d'une forme à une autre. [38]

- **Stockage mécanique :**

Cette forme de stockage permet de conserver l'énergie électrique sous une forme cinétique. Cette dernière est généralement utilisée pour faire tourner des turbines, qui à leur tour entraînent des générateurs électriques en vue de créer une énergie électrique. Cette catégorie de stockage regroupe principalement les voies de stockage à grande échelle, comme le stockage hydraulique, le stockage à air comprimé et les volants d'inertie.[38]

- **Stockage électromagnétique :**

Cette forme de stockage consiste à conserver l'énergie sous forme d'un champ magnétique généré par la circulation d'un courant électrique dans une bobine. Ces bobines sont généralement réalisées en matériau supraconducteur pour éviter la dissipation de cette énergie. [38]

- **Stockage thermique**

Le stockage de chaleur sous forme sensible consiste simplement à chauffer un liquide ou un solide en phase de stockage et à récupérer cette chaleur en phase de déstockage. Le stockage sous forme de matériaux à changement de phase permet de disposer de grandes quantités de chaleur à température fixe.

Le stockage de chaleur par transformation physicochimique fait appel à une transformation physico-chimique du milieu stocké dans l'enceinte par adsorption ou absorption réversible d'un liquide ou d'un gaz. Il permet de s'affranchir des pertes thermiques dans le temps.

Il existe plusieurs méthodes de stockage d'énergie qui peuvent être classées en trois catégories [39] :

- **Stockage court :** (de quelques heures à quelques jours), c'est le cas du rayonnement solaire, de l'énergie éolienne, l'énergie des vagues, l'énergie hydraulique au fil de l'eau, l'énergie marémotrice.

- **Stockage moyen** : (de quelques mois), c'est le cas des grands barrages hydrauliques, de l'énergie thermique des mers, des cultures annuelles à finalité énergétique.
- **Stockage long** : (une année et plus), c'est le cas de la biomasse forestière, la géothermie dans les nappes aquifères.

3. 2. Les Batteries électrochimiques

Les accumulateurs électrochimiques de type batteries permettent de stocker des énergies électriques importantes (de quelques Wh à plusieurs MWh selon leur taille) sur des durées de quelques minutes à quelques mois. Ce sont des systèmes fermés capables d'effectuer, à la demande, la conversion réciproque de l'énergie chimique en énergie électrique. Cette conversion est effectuée avec un rendement énergétique, variable selon les conditions d'utilisation, pouvant atteindre normalement, et parfois dépasser 80% [37].

3. 3. Constitution

Les accumulateurs se déchargent en convertissant l'énergie chimique contenue dans la batterie en énergie électrique. Ils se chargent en convertissant l'énergie électrique en énergie chimique et contrairement aux piles sont donc réversibles. Chaque élément de batterie comporte une quantité de matière dite masse active négative capable de fournir des électrons au circuit extérieur lors de la décharge, et une quantité de matière dite masse active positive capable d'accepter les électrons de retour vers l'accumulateur.[40]

3. 4. Différents types d'accumulateurs

On y distingue les accumulateurs en milieu aqueux, acide ou alcalin, les accumulateurs « chauds » et les accumulateurs en milieu organique. Le milieu aqueux présente l'avantage d'une conductivité ionique élevée, surtout en milieu acide, mais le choix des masses actives est limité. Les milieux non aqueux permettent des tensions élémentaires plus élevée et l'utilisation de masses actives plus variées [37].

3. 4. 1. Accumulateur à électrolyte aqueux

L'électrolyte aqueux, acide ou alcalin, est un milieu relativement bon conducteur ionique, mais la tension d'un élément y est limitée par la décomposition éventuelle de l'eau en oxygène et/ou hydrogène provoqué par le caractère oxydant (ou réducteur) des masses actives. [40]

a. Accumulateur plomb-acide sulfurique

Il a été inventé par GASTON planté en 1858, comme un générateur de puissance, à une époque où l'électricité n'était produite que par des piles. À l'état chargé la concentration en acide est au maximum de conductivité. Bien chargé l'accumulateur au plomb est puissant, capable de fournir des courants importants. À l'état déchargé, la concentration en acide sulfurique est relativement faible, l'accumulateur est beaucoup moins puissant, surtout à froid. Les différents constituants des matières actives, plomb, sulfate et peroxyde de plomb ont des densités très différentes, les matières actives gonflent à la décharge et dégonflent à la charge avec un risque de décohésion, ce qui nuit à la cyclabilité. Les collecteurs de courant sont en plomb, seul matériau économique capable de résister à la corrosion. La corrosion lente du collecteur positif est inévitable, c'est la cause normale de défaillance des batteries au plomb. Les batteries au plomb, dites étanches, sont apparues assez récemment sur le marché. Dans une batterie étanche, la négative est surcapacitive, il n'y a pas de dégagement d'hydrogène (très peu), mais il y a formation d'oxygène à la positive lors de la surcharge [37].

b. Batteries alcalines

Le développement des batteries alcalines est dû au Suédois WALDEMAR JUNGNER en 1900, qui a trouvé le moyen d'éviter la corrosion du collecteur positif. Le nickel est en effet le seul métal passivable en milieu alcalin par formation d'une couche d'oxy hydroxyde NiOOH parfaitement insoluble, mais conducteur électronique. La mousse de nickel constitue maintenant un des collecteurs les plus utilisés.

L'intérêt des batteries alcalines réside dans le fait que l'électrolyte n'est pas consommé, il est donc possible d'en mettre peu. D'autre part la solution aqueuse de potasse reste bon conducteur ionique jusqu'à $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, un avantage décisif dans certains cas par rapport aux batteries au plomb qui ne descendent pas en dessous de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [37].

c. Accumulateur Ni-MH

Sont construits principalement sous forme cylindrique spiralée, pour l'alimentation des appareils électroniques portables. Le coût de Ni-MH, supérieur à celui de Ni-Cd de même capacité reste un handicap pour les grosses capacités. Le remplacement du cadmium par un alliage métallique hydrurable (alliage métallique capable de stocker l'hydrogène, noté MH).

L'accumulateur Ni-MH fonctionne de façon très similaire au Ni-Cd, il a une capacité massique et volumique supérieure [37].

3. 4. 2. Accumulateurs à électrolyte non aqueux

L'utilisation de milieux non aqueux permet d'obtenir des tensions élémentaires supérieures à 2V, notamment en utilisant des masses actives négatives beaucoup plus réductrices que l'hydrogène comme le Lithium, matériau présentant à la fois un très grand potentiel électrochimique négatif et une grande légèreté. [40]

a. Accumulateur Lithium-ion

Les accumulateurs lithium-ion se différencient comme des accumulateurs lithium métal par le fait que l'électrode négative n'est pas constituée de lithium métal mais d'un composé d'insertion du lithium, typiquement du graphite. Ainsi, le lithium n'est théoriquement jamais sous forme métallique dans les accumulateurs Li-ion. Pendant la recharge, des ions lithium viennent s'insérer dans la structure de l'électrode négative en carbone graphité comme le montre la Figure 24. Lors de la décharge, l'anode libère ces ions qui viennent se replacer dans la structure de la cathode. L'électrode positive est constituée d'un oxyde du type $LiMO_2$. Actuellement, trois de ces oxydes sont utilisés dans ces batteries : $LiCoO_2$, $LiNiO_2$ et $LiMn_2O_4$. Le séparateur est constitué d'une membrane polymère microporeuse et l'électrolyte est une solution de $LiPF_6$ dans un mélange de solvants organiques.

Les accumulateurs Li-ion ont une densité d'énergie massique bien supérieure aux autres systèmes de l'ordre de 120 Wh/kg et 200 W/kg. Ils sont donc performants pour toutes les utilisations car ils stockent une grande quantité d'énergie pour une faible masse et un faible volume. Les avantages qui peuvent convenir par ce système : ils présentent une faible autodécharge, une cyclabilité élevée (>500 cycles), ils peuvent fonctionner à basse température typiquement jusqu'à $-20^\circ C$, et représentent un danger limité pour l'environnement contrairement aux batteries au plomb, malgré l'utilisation du cobalt qui se trouve en faible quantité. Ce type de batterie est sélectionné dans cette étude.

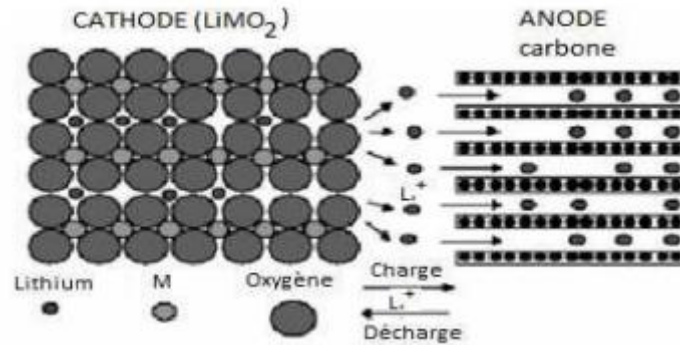


Figure 24: Schéma de principe de la batterie Li-Ion [39].

b. Accumulateurs Lithium métallique

Le lithium métal est utilisé dans les piles qui sont les plus performantes en termes de durée de vie et de capacité stockée mais pour les accumulateurs, l'utilisation du lithium sous forme métallique présente des problèmes de cyclabilité dus au changement de sa structure lors des cycles de charge/décharge. De plus, il est très réactif vis-à-vis des électrolytes liquides utilisés entraînant des risques d'échauffements excessifs, des dégagements gazeux, voire même l'explosion de l'accumulateur. La technologie « Lithium métallique » est de moins en moins explorée du fait de problèmes de sécurité qu'elle engendre.[40]

c. Accumulateurs Lithium-polymère

Une nouvelle technologie d'accumulateurs Li-ion a vu le jour récemment sur le marché des accumulateurs, c'est les accumulateurs Lithium-polymère ou Li-ion polymère. Ces accumulateurs se procèdent de la technologie Li-ion par leur procédure de fabrication différent, mais reprennent la même technologie d'électrodes. Le remplacement de l'électrolyte liquide par un électrolyte solide a été considéré. Les risques de contacts directs anode/cathode sont ainsi éliminés et la matrice d'insertion en carbone peut être supprimée qui augmentant la quantité d'énergie de la batterie. Ces batteries sont par conséquent compactes et présentent une énergie massique grande de l'ordre de 150 Wh/kg. Le processus permet d'utiliser un emballage multicouche souple contrairement à la technologie classique qui demande un emballage rigide pour assurer la tenue mécanique de l'accumulateur. De plus, aucune réaction chimique secondaire n'a lieu durant la charge, ce qui explique les rendements énergétiques très élevés (entre 90 et 100 %). [40]

3. 5. Principe de fonctionnement d'un accumulateur Li-ion

Durant la décharge, l'électrode négative est le siège de l'oxydation du lithium (Li_xC_6) qui produit x ions de Li^+ et x électrons. Les ions traversent l'électrolyte et vont à l'électrode positive où se produit la réduction d'un matériau par l'intercalation des ions Li^+ . Ce type de matériaux présente la particularité d'accepter des ions lithium en modifiant éventuellement leur structure. Les électrons alimentent en énergie le circuit extérieur. Durant la charge, les ions Li^+ effectuent le trajet inverse, les électrons étant fournis par le circuit extérieur comme montré la figure 25. La réaction générale d'un accumulateur Lithium-Ion à oxyde LiNiO_2 est donnée à travers l'équation suivante : [40]

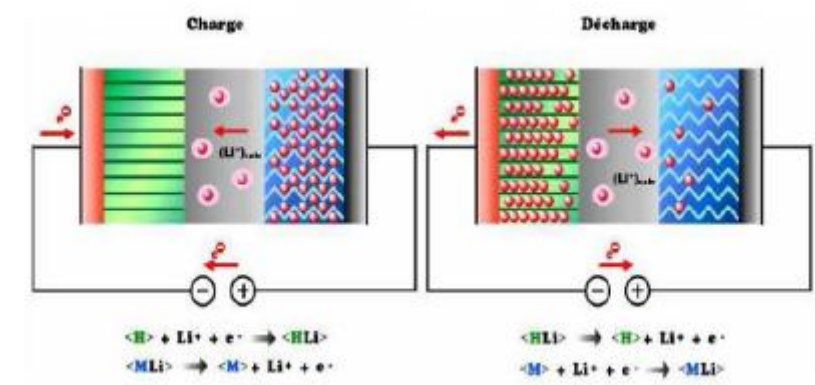
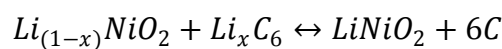


Figure 25: Fonctionnement d'un accumulateur lithium-ion [40]

- L'électrode positive :

Composée de structures en couches qui sont constituées d'un oxyde du type LiMO_2 (M pour métal) pour les accumulateurs Lithium-Ion. Actuellement, trois oxydes sont utilisables : LiCoO_2 , LiNiO_2 et LiMn_2O_4 . Vu le coût très élevé de l'oxyde de cobalt allié au lithium, seuls les deux autres oxydes sont utilisés. Pour une électrode positive composée de structures spinelles, on utilise des dérivés de LiMn_2O_4 , LiMnO_2 et de LiFeO_2 . Enfin, pour des accumulateurs lithium-métal ce sont l'oxyde de vanadium, l'oxyde de manganèse ou des polymères conducteurs qui sont utilisés.[40]

- L'électrode négative :

Achevée en composés carbonés : graphite, carbones hydrogénés, d'oxydes mixtes à base de titane. Elle sert de matériau d'insertion, elle n'est donc pas modifiée lors de la réaction.[40]

Chapitre IV : Généralités sur un SH et stockage de l'énergie

- **Le séparateur :**

Constitué d'une membrane polymère microporeuse qui reprend les mêmes propriétés que celles des accumulateurs au plomb.[40]

- **L'électrolyte :**

Une solution de LiPF_6 dans un mélange de solvants organiques. Il se trouve soit sous forme liquide, soit sous forme solide (polymère sec, polymère gélifié ou composé organique vitreux). Sa nature fixe la tension maximale d'utilisation de l'accumulateur. Pour un polymère sec, la tension maximale ne peut excéder 3.5V, alors qu'elle peut atteindre 4.8V pour un liquide ou un gel. De plus, le transport des ions ne modifiant pas l'électrolyte, la résistance interne est pratiquement indépendante de l'état de charge et ne varie notablement qu'avec la température. [40]

Chapitre V
Représentation du
système hybride
photovoltaïque-éolien

1. Introduction

La représentation est un moyen destiné à représenter par une forme mathématique une fonction ou un processus technologique ou des schémas de chaînes énergétiques. Elles ont pour but d'étudier théoriquement le comportement de certains paramètres et de les optimiser en respectant une contrainte donnée.

A cet effet, la représentation est nécessaire pour établir une relation entre l'énergie produite par le système hybride éolien-photovoltaïque et la demande de l'utilisateur.

Le système qui nous intéresse regroupe de trois sous-systèmes principaux, le générateur Éoliennes (figure 28), générateurs photovoltaïques (figure 27) et systèmes de stockage (batterie). Le système considéré est représenté par la figure 26.

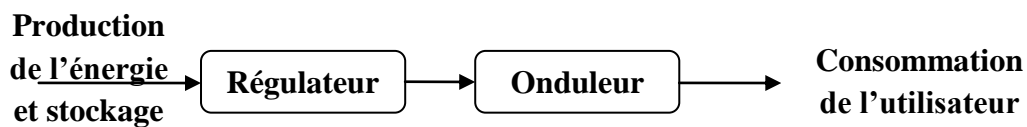


Figure 26 : Schéma présentatif d'un système hybride étudié

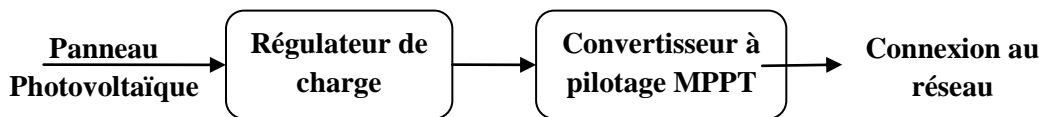


Figure 27: Schéma présentatif d'un système PV

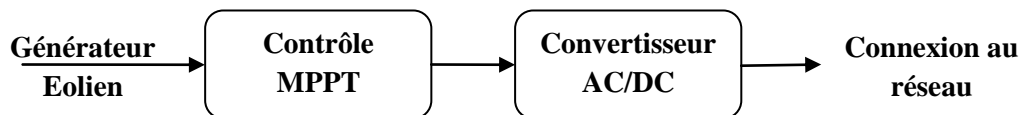


Figure 28 : Schéma présentatif d'un Eolien

2. Représentation du système hybride photovoltaïque-éolien

Dans notre cas précis, on s'intéresse aux systèmes de petites puissances qui regroupent deux parties à savoir l'éolienne et les panneaux solaires. Ces deux sources de production de l'énergie passent par un stockage électrochimique (Batterie) (Figure 29), et produisent du courant continu facilement convertible en courant alternatif, grâce à l'intégration d'un onduleur autonome dans le circuit.

En couplant ces systèmes et en les associant à un dispositif de stockage de l'énergie, nous aurons alors les avantages suivants :

- Exploitation du système sans interruption.
- Possibilité de préserver le surplus d'énergie produite par ce système.
- Sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.[41]

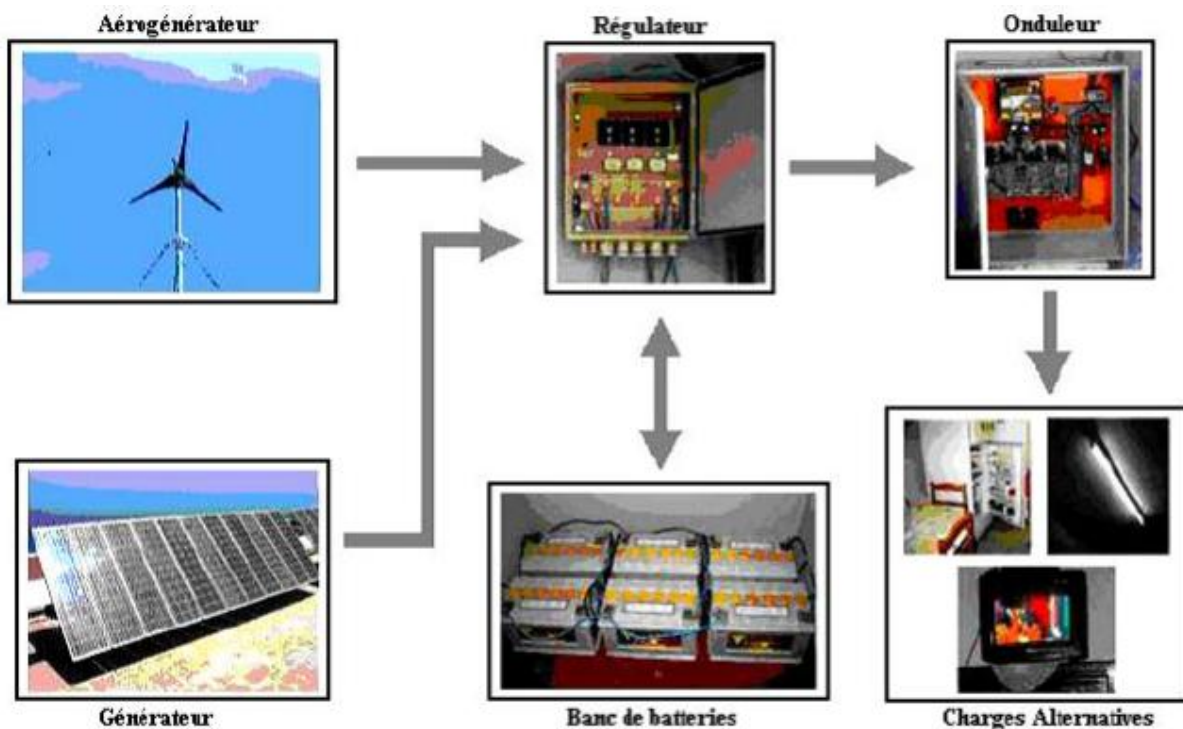


Figure 29: Schéma synoptique du système hybride étudié [41]

2. 1. Etat de l'art du système hybride éolien-photovoltaïque

Le système hybride de production d'énergie est celui qui combine et exploite plusieurs sources d'énergies. Les sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le photovoltaïque, ne délivrent pas une puissance constante, ce qui exige l'utilisation d'un système de stockage.

Chapitre V : Représentation d'un SH photovoltaïque-éolien

En plus des sources d'énergie renouvelable, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif(CA), un système à courant continu(CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides contiennent trois bus :

- Un bus à courant continu CC pour les sources, les charges à courant continu CC et les batteries.
- Un bus à courant alternatif CA pour les générateurs à courant alternatif CA et le système de distribution.
- Un bus mixte courant continu et alternatif CC/CA.

2. 1. 1. Système hybride avec un bus Courant continu (BUS CC) :

Dans le couplage courant continu CC présenté dans la figure 30, les chaînes de production se composent avec des panneaux photovoltaïques connectés au bus continu à travers des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT et une éolienne reliée au bus continu à travers un redresseur à diodes.

Le dispositif de stockage de l'énergie, composé des batteries électrochimiques, est relié au bus continu à l'intermédiaire d'un contrôleur de charge et décharge. Le bus continu est relié de son côté aux charges alternatives via un onduleur.

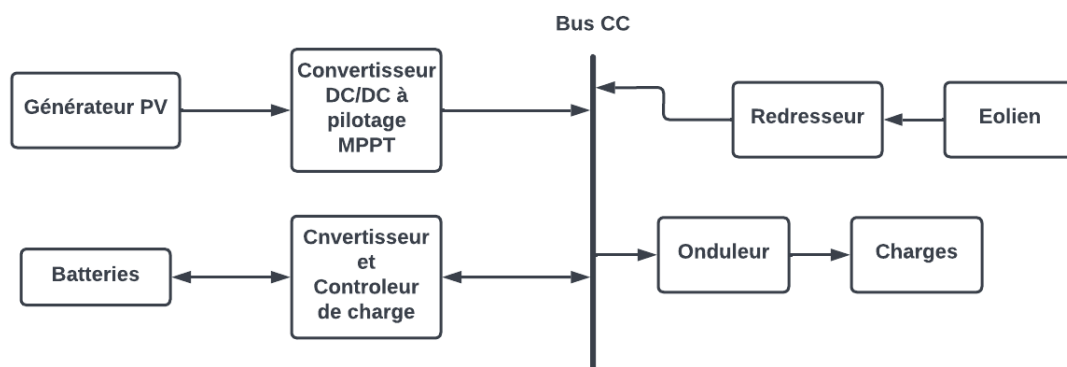


Figure 30: Schéma synoptique du système hybride au bus CC

2. 1. 2. Système hybride avec un bus courant alternatif (BUS CA) :

La puissance fournie par chaque composant de production d'électricité est centralisée sur un bus à courant alternatif (CA). Le générateur éolien peut être directement connecté sur le bus CA ou avoir besoin d'un convertisseur CA/CA. Le générateur panneau photovoltaïque

PV utilise un onduleur pour être connecté sur le bus CA. Les batteries sont liées au bus CA à travers un convertisseur bidirectionnel. (Figure 31)

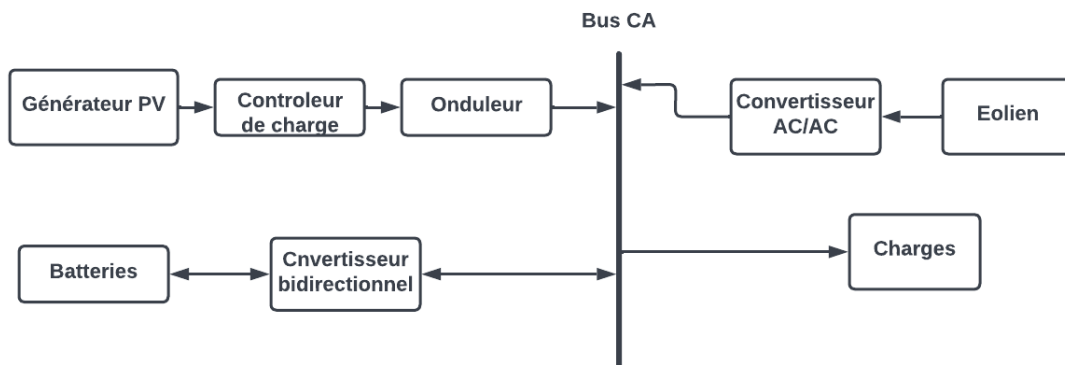


Figure 31: Schéma synoptique du système hybride au bus CA

2. 1. 3. Système hybride avec un bus mixte (bus CC et bus CA) :

Il s'agit d'une combinaison entre la structure ayant un bus CA et la structure ayant un bus CC où deux bus communs sont créés dans cette configuration (figure 32). Les charges CA sont alimentées par des sources CA via un bus CA et les charges CC sont alimentées par des sources CC via un bus CC. Ceci permet de limiter les pertes liées à la conversion de l'énergie d'une forme à une autre (de CC vers CA ou bien de CA vers CC) et ainsi augmenter le rendement énergétique du système hybride.

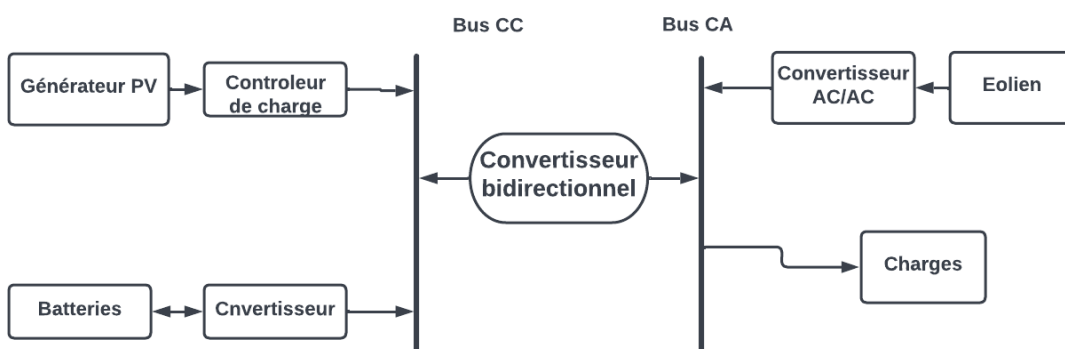


Figure 32: Schéma synoptique du système hybride au bus mixte CC/CA

Chapitre V : Représentation d'un SH photovoltaïque-éolien

Tableau 2: Les avantages et les inconvénients de chaque configuration

Configuration	Avantages	Inconvénients
Couplage DC	<ul style="list-style-type: none">- Simple et ne nécessite aucune synchronisation.- Moins de pertes de transmission, donc applicable pour des transmissions à longue distance.- Connexion à un seul câble.	<ul style="list-style-type: none">- Problème de compatibilité de tension- Problèmes de corrosion avec les électrodes DC.- Défaillance du convertisseur DC/AC de la charge conduisent à une défaillance complète du système, donc aucune alimentation de la charge.
Couplage AC	<ul style="list-style-type: none">- Très fiable, facilité d'isolement en cas de défaillance dans une source d'énergie.- Connexion au réseau souple.- Modularité de structure.- Support multi-tension et multi-terminal correspondant.	<ul style="list-style-type: none">- Synchronisme nécessaire pour le couplage des générateurs à l'AC bus.- La Nécessité de correction du facteur de puissance et le facteur des harmoniques de distorsion THD.- Inadapté à la transmission de longue distance (des pertes plus élevés).
Couplage mixte AC/DC	<ul style="list-style-type: none">- Très efficace et système de faible coût.- Faibles pertes de conversion.	<ul style="list-style-type: none">- Le Contrôle et la gestion de l'énergie sont complexes.

3. Représentation d'un système hybride Photovoltaïque Diesel et éolien

Nous proposons l'établissement d'un système hybride contenant un panneau photovoltaïque, une éolienne et un groupe de production diesel.

Dans cette perspective, une nouvelle architecture de système énergétique hybride a été proposée. Son schéma synoptique est donné à la figure 33. L'aérogénérateur et le panneau photovoltaïque assurent la production de l'énergie électrique pendant les vents favorables. Il est directement connecté à un Module Electronique de Contrôle de Charge et de Gestion Optimale de la Production pour Systèmes énergétiques Hybrides (MECCGOPSEH), qui assure la gestion automatique de l'énergie produite, ainsi que la protection de la batterie.

Chapitre V : Représentation d'un SH photovoltaïque-éolien

Le module électronique est au cœur de notre système énergétique. Le cahier de charge du MECCGOPSEH est le suivant:

- Protéger la batterie contre les charges excessives.
- Protéger la batterie contre les décharges profondes.
- Démarrer et arrêter automatiquement le générateur de secours au besoin.
- Brancher et débrancher automatiquement les charges dérivatives au besoin.
- Eviter autant que faire se peut les interruptions d'alimentation en énergie électrique.
- Permettre la charge de la batterie par le générateur diesel lorsque celui-ci a démarré. [42]

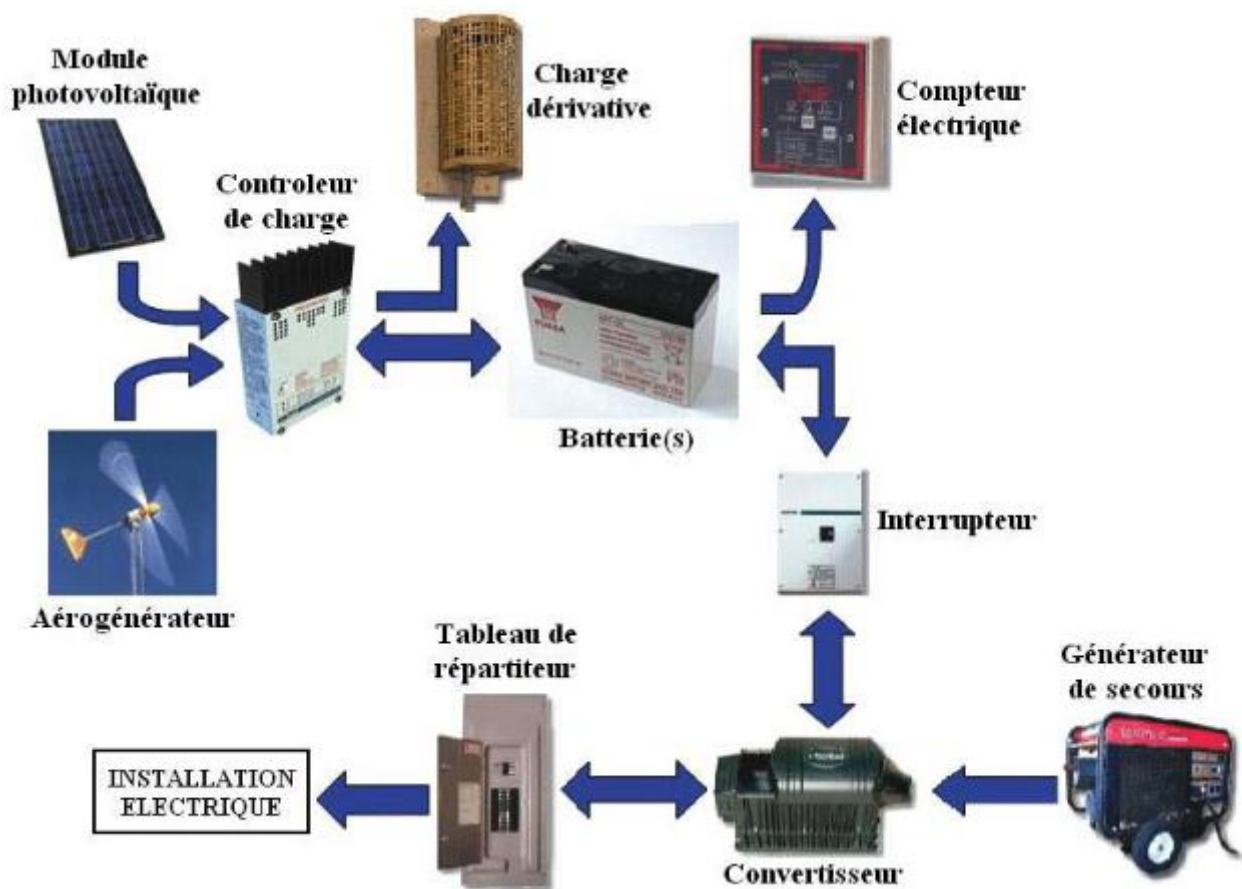


Figure 33: Système Eolien-Photovoltaïque-Diesel [42]

3. 1. Modèle général d'un système hybride Photovoltaïque-éolien et diesel

Dans cette perspective, l'énergie produite fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à AC fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. L'onduleur doit alimenter les charges à AC à partir du bus à DC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le

générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps (Figure 34). La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable.

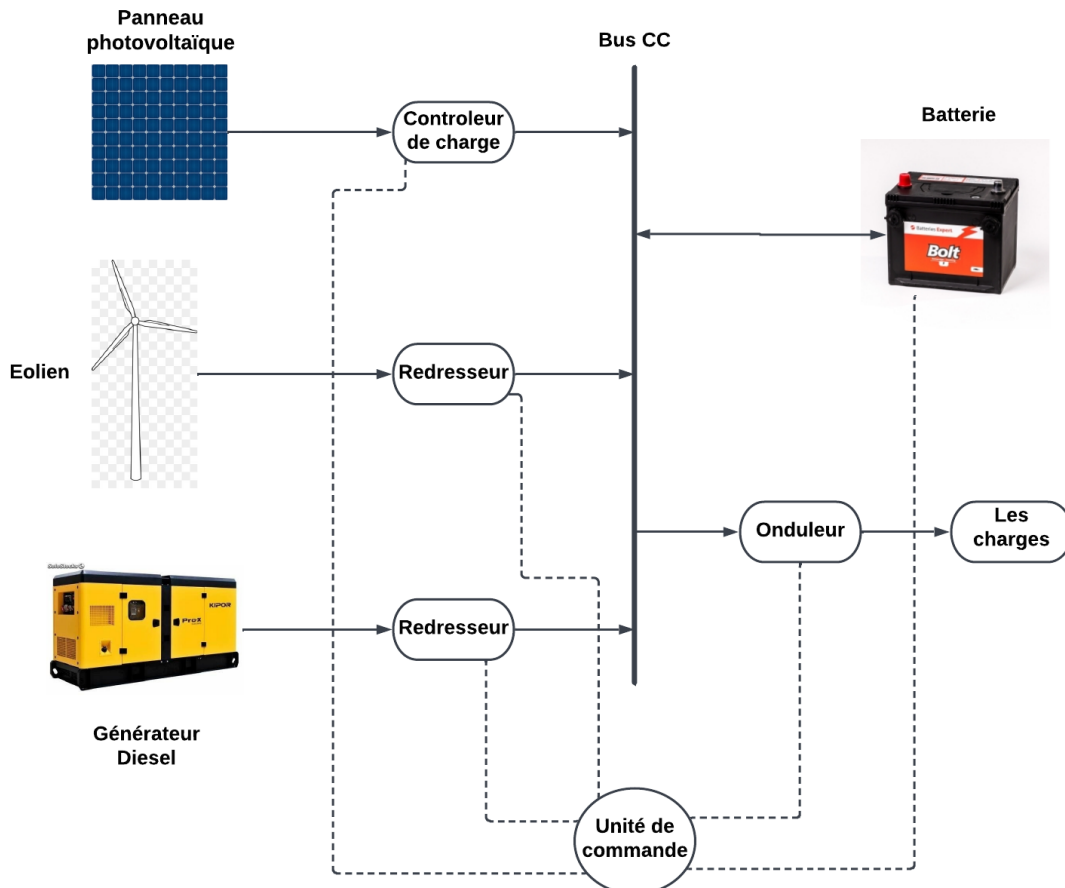


Figure 34: Modèle général d'un système hybride PV /éolien/diesel

4. Système d'exploitation d'un système hybride Photovoltaïque-Eolien

Le système d'exploitation est le cerveau de notre centrale électrique (figure 35).

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les Chargeurs des batteries, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop.

La commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système par exemple le régulateur de tension sur l'alternateur.

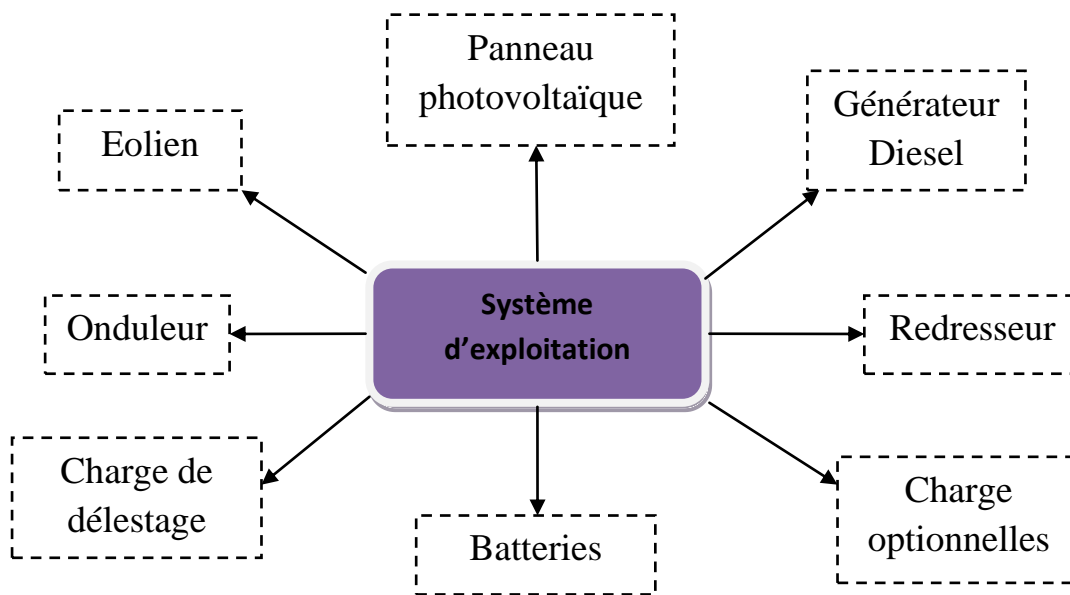


Figure 35: Système d'exploitation pour un système PV-Eolien-Diesel

Un autre type d'éléments de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Ce système de surveillance est d'habitude automatique.

5. Représentation des éléments du système hybride

5. 1. Système photovoltaïque

Une commande en puissance du système PV doit être réalisée par le biais de son convertisseur CC/CC (hacheur unidirectionnel), afin d'extraire le maximum de puissance des rayons solaires disponibles sur la surface des panneaux PVs. De plus, cette commande doit garantir la stabilité du système PV lors de variations rapides des niveaux d'éclairement.

5. 1. 1. Méthode d'optimisation de la puissance

Une cellule photovoltaïque PV présente des caractéristiques de sortie non linéaires et variant fortement selon l'irradiation et la température. Ceci se traduit par un point de puissance maximal (MPPT) qui dérive selon ces deux paramètres.

5. 1. 2. MPPT :

Le MPPT est un régulateur dans un circuit qui mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale (MPPT Max Power Point Tracker). Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. En général, ces régulateurs fonctionnent soit en élevant, soit en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et un deuxième circuit transforme le courant et la tension pour l'adapter au type de batterie. L'avantage de ce type de régulateur est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température et ainsi récupérer l'excès non négligeable de tension en hiver lorsque le point de puissance maximale peut monter au-dessus de 17 à 18 [V] dans un système 12 [V]. [43]

5. 1. 3. Les hacheurs :

Les hacheurs sont des types de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

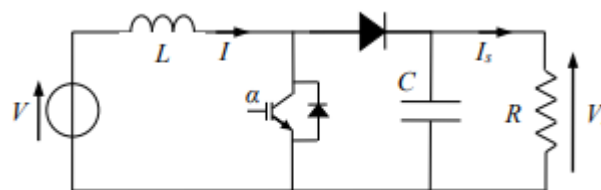


Figure 36: Circuit de puissance d'un hacheur Boost

Le système photovoltaïque étudié dans ce travail est connecté à un hacheur boost (hacheur parallèle), est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus grande valeur. Le circuit de puissance d'un hacheur Boost est montré par la figure 36. Il est essentiellement composé d'une inductance L à son entrée, d'un interrupteur commandé à l'ouverture et à la fermeture, d'une diode et d'un condensateur C à sa sortie.

Ce convertisseur permet de régler la tension aux bornes du générateur photovoltaïque pour extraire le point de puissance maximale (MPPT) comme indiqué sur la figure 37.

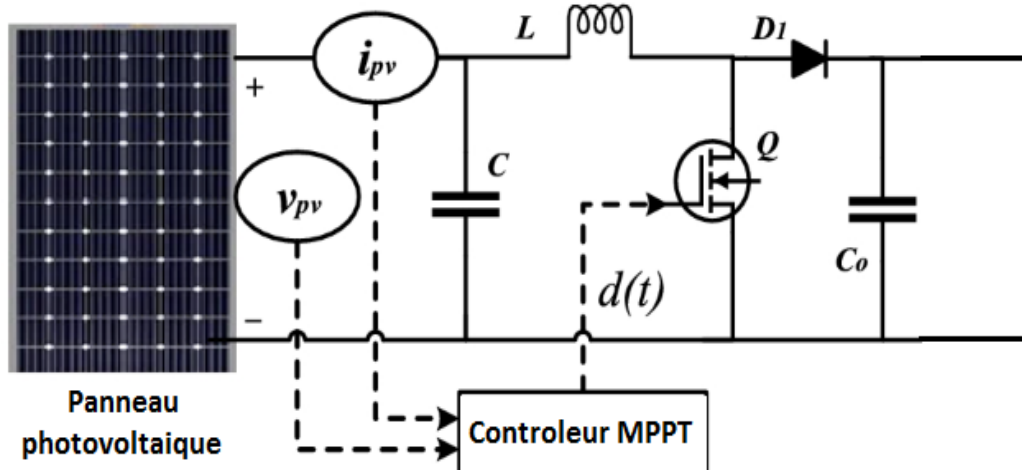


Figure 37: Modèle d'un système photovoltaïque

5. 2. Système éolien

Le système éolien indiqué sur la figure 38, est destiné à être intégré dans un système hybride avec un bus continu. Il est principalement composé d'une turbine raccordée au rotor d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Le stator de cette génératrice est connecté à un redresseur. La sortie du redresseur est raccordée à un bus continu de tension U_{dc} constante.

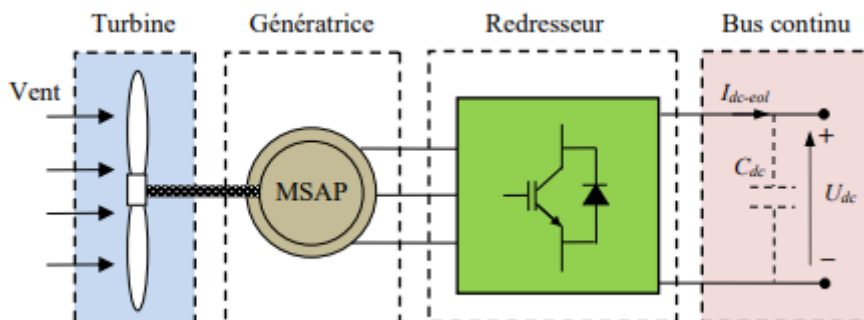


Figure 38: Configuration globale du système éolien [38]

5. 2. 1. Représentation d'un redresseur triphasé à MLI

La connexion de la turbine éolienne au bus continu est réalisée à l'aide d'un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

La modulation de largeur d'impulsion consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique

peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage ou la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer

L'utilisation de ce type de convertisseur dans un système de conversion de l'énergie éolienne offre plusieurs avantages par rapport à d'autres types de redresseurs classiques (à diodes ou à thyristors). Le redresseur à MLI permet la circulation des courants dans les deux sens, ce qui permet la réversibilité des puissances et on peut aussi contrôler la puissance active et la puissance réactive, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement à facteur de puissance unitaire. La commande à base de la technique MLI réduit les distorsions harmoniques dans les courants statoriques de la MSAP et permet donc la génération de courants quasi-sinusoïdaux. La figure 39 représente la structure du redresseur triphasé à MLI utilisé.[38]

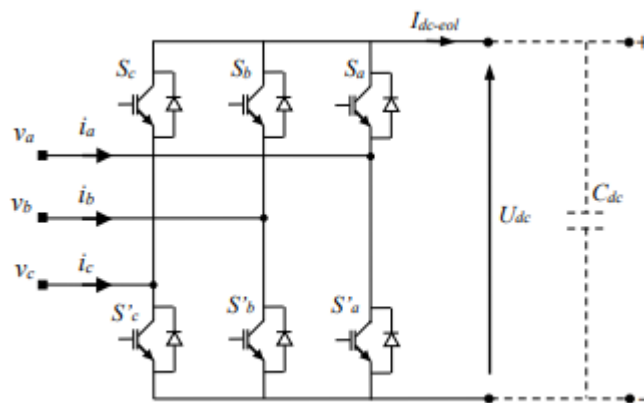


Figure 39 : Schéma de puissance du redresseur triphasé à MLI [38]

5. 2. 2. Convertisseur MPPT pour l'éolienne

L'éolienne présente des caractéristiques de puissance aérodynamique non linéaires et pour chaque vitesse du vent, il existe un seul point où la puissance est maximale (MPPT).

Le fonctionnement optimal de l'éolienne est obtenu lorsque la tension du bus courant continu DC varie en fonction de la vitesse du vent. Cette variation est obtenue en associant la génératrice synchrone au pont redresseur de type triphasé à modulation de largeur d'impulsion MLI chargé par un convertisseur DC/DC de type abaisseur-élévateur débitant sur un bus courant continu DC. La figure 40 donne le schéma global des circuits électroniques de puissance.

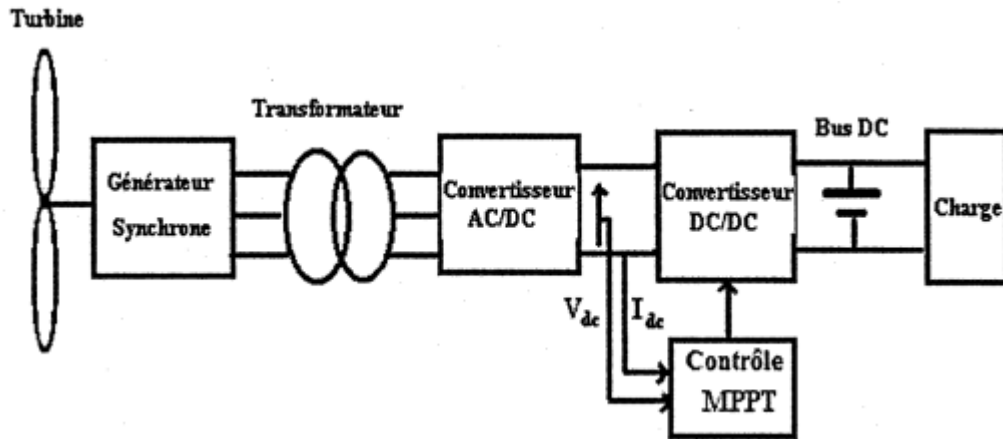


Figure 40 : Système éolien avec convertisseur MPPT

La figure 41 représente le schéma d'un système éolien connecté à un redresseur triphasé qui permet de convertir le courant alternatif AC en courant continu CC, puis relié à un hacheur dévolteur où un contrôle est appliqué au sein de l'interrupteur dont le but de faire fonctionner l'éolienne aux points de puissance maximale.[40]

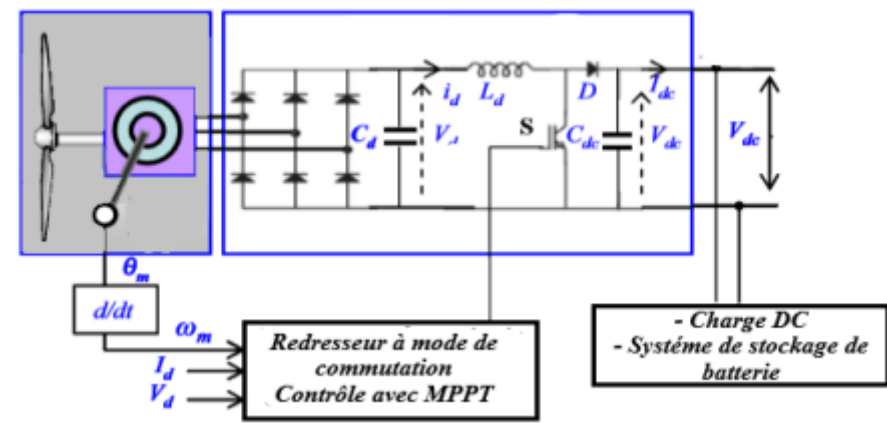


Figure 41 : Schéma de structure de contrôle du système éolien[40]

5. 3. Système de stockage d'énergie

La figure 42 illustre l'architecture globale du système de stockage étudié dans ce chapitre. Le stockage constitue pièce maîtresse de la chaîne de production, lorsque l'on produit plus que ce que l'on consomme, le système de stockage permet de conserver ce surplus pour être réutilisé plus tard, c.-à-d. qu'il stocke lorsque l'on consomme moins que ce que nous avons et refournis cette énergie lorsque l'on consomme plus que ce que le soleil nous offre, mais la batterie par exemple a bien aussi ses règles, on ne peut laisser une batterie sous charge infiniment, des phénomènes tels que l'électrolyse risquent de se produire, endommageant ainsi

notre batterie, on ne peut la décharger plus d'une certaine limite également, à cause de phénomènes tels que la sulfatation, un régulateur de charge est donc indispensable pour le maintien de la batterie. Ce dernier permet d'assurer une durée vie raisonnable.

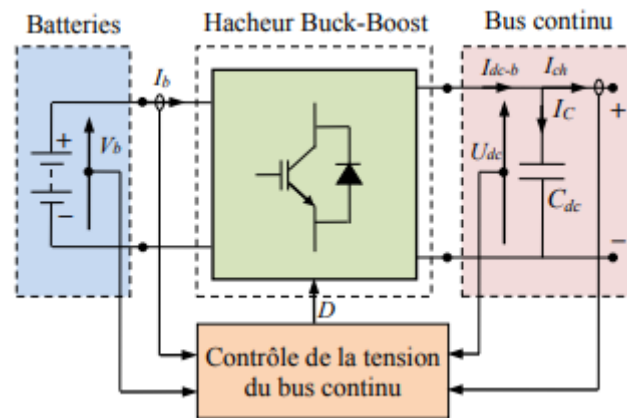


Figure 42 : Architecture globale du système de stockage étudié [38]

5. 3. 1. Modèle électrique simplifié d'une batterie

Le modèle électrique le plus simple est montré par la figure 43, comporte une source de tension idéale en série avec une résistance interne. Il ne prend pas en compte l'état de charge de la batterie. La résistance est supposée constante durant les cycles de charge et de décharge, et elle ne varié pas avec la magnitude du courant.

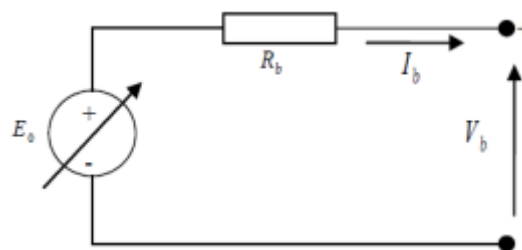


Figure 43 : Modèle simple de la batterie

5. 3. 2. Contrôleur de charge

Un contrôleur de charge est appelé aussi régulateur de charge figure 44, est un système ou appareil électronique fonctionnant de façon complètement automatique auquel sont raccordés le générateur (panneaux solaires, éolienne, etc.) à la batterie ainsi que d'éventuels équipements ou composants de l'installation. Le contrôleur de charge contient :

- Des millimètres et des ampèremètres volts.

- Une alarme de tension de batterie faible.
- Un capteur de température qui régule automatiquement la valeur de la tension de charge maximale.
- Des sectionneurs automatiques du circuit de consommation basse tension, ampèremètres et affichages numériques.
- Un module d'acquisition de données et un module de régulation avec suiveur de point de puissance maximale, etc.



Figure 44 : Régulateur de charge batterie [44]

5.3.3. Modèle du hacheur Buck-Boost

Le hacheur Buck-Boost est constitué d'une inductance à son entrée et de deux commandés à l'ouverture et à la fermeture et d'un condensateur à sa sortie. Chacun des deux interrupteurs est constitué d'une diode antiparallèle. La figure 45 représente le circuit de puissance d'un hacheur Buck-Boost

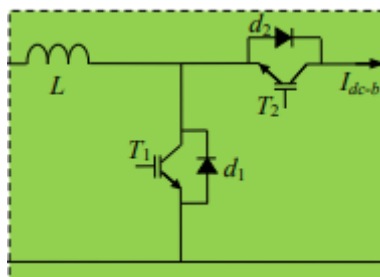


Figure 45 : Circuit de puissance d'un hacheur Buck-Boost

Le pack de batteries utilisé pour le stockage de l'énergie est relié au bus continu à travers un hacheur Buck-Boost (réversible en courant) comme montré dans la figure 46. Le rôle de ce convertisseur est d'assurer le transfert de l'énergie dans les deux sens (la charge et

la décharge des batteries) tout en maintenant la tension du bus continu U_{dc} constante, et ce quelle que soit la puissance fournie par les sources ou celle consommée par la charge.[38]

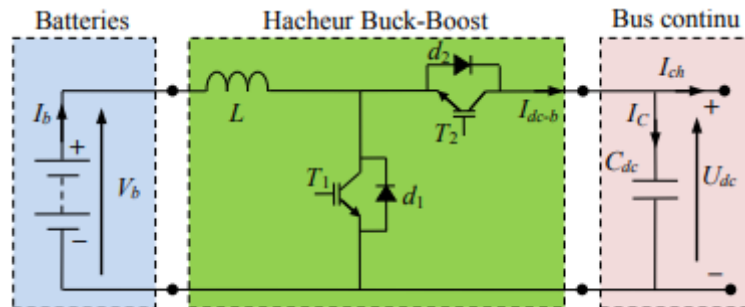


Figure 46 : Raccordement des batteries au bus continu via un hacheur Buck-Boost [38]

5. 4. Convertisseur CC/AC (Onduleur)

Les onduleurs convertissent le courant continu CC en courant alternatif CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à courant alternatif CA ou en parallèle avec des sources à courant alternatif CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil. La figure 47 représente le circuit de puissance d'un onduleur

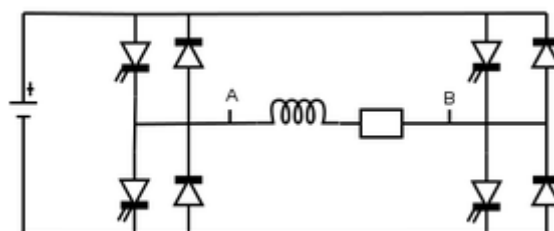


Figure 47: Circuit de puissance d'un Onduleur

6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu sur la représentation d'un système d'énergie hybride qui combine deux systèmes très demandés et utilisés actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable, les systèmes éoliens et les systèmes photovoltaïques.

La représentation de chaque composant du système hybride a été élaborée à partir des schémas (champ photovoltaïque, éolienne, batteries de stockage), cette représentation est une étape essentielle car permet d'introduire le modèle de chaque sous-système puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation.

Cette représentation permettra l'implantation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté avec le comportement des composants en fonction de certains paramètres.

Conclusion générale

Les deux ressources mondiale que sont l'énergie éolienne et photovoltaïque sont très importantes et qui apporteront une contribution importante à l'approvisionnement en électricité dans le monde entier dans les années à venir.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la représentation d'un système de production électrique à partir d'un système hybride (éolien- photovoltaïque) avec un système de stockage totalement autonome qui répond bien à la problématique posée par le contexte énergétique actuel, de ce fait le but de cette étude est d'établir une chaîne de conversion énergétiques du système hybride et assurer un meilleur rendement.

A cet effet, la représentation des deux chaînes de conversion d'électricité a été élaborée par des schémas.

Dans la première partie on a commencé par une généralité sur les énergies renouvelables pour avoir un aperçu général sur les différents types d'énergie renouvelables disponibles et on a vu deux types d'énergies qui concernent cette étude pour but d'étudier le principe l'influence de chaque composant constituant le système PV et l'aérogénérateur éolien.

Dans la deuxième partie on a défini le système hybride et ces différentes structures et classifications et on a cité quelques types de stockage pour déterminer le meilleur d'entre eux en termes de fiabilité et capacité de stockage.

Dans la dernière partie du mémoire on a présenté les caractéristiques de chaque composante du système hybride éolien-photovoltaïque avec soin. Nous avons étudié le principe et l'influence de chaque composant constituant le système photovoltaïque et l'aérogénérateur éolien et en ce qui concerne la chaîne de production photovoltaïque, nous avons utilisé un hacheur Boost commandé par la technique MPPT, pour maximiser la puissance optimale produite par le générateur photovoltaïque.

Pour conclure, la représentation d'un système hybride, nous aidera et nous permettra dans la future la mise en œuvre d'une modélisation et d'une simulation dynamique du système hybride photovoltaïque-éolien

Références Bibliographique

- [1]. J. Canard, “Impact de la génération d’énergie dispersée dans les réseaux de distribution” thèse doctorat, Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 2012.
- [3]. H. Kanchev, “Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d’énergie renouvelable” Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d’un micro réseau électrique urbain Hal Id école centrale de lille, 2015.
- [6]. K. Belmokhtar, “Contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène” Doctorat en génie électrique, université du Québec, 2015.
- [12]. Ferrah Billel, “Etude d’un système Hybride (photovoltaïque –éolien)”, Mémoire de master, Université de Annaba, 2015.
- [14]. Soltane Belakehal, “Conception & Conception des Machines à Aimants Permanents dédiées aux énergies renouvelables”, Thèse doctorat, université de Constantine, Département d’Electrotechnique, 2010.
- [15]. B. Flèche et D. Delagnes, “Production D’énergie Electrique : Energie Solaire Photovoltaïque”, juin 2007.
- [16]. Stéphane PETIBON, “Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques”. Thèse de Doctorat de l’Université de Toulouse France, 2009.
- [17]. Belhadj Mohammed, “Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome”, Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008
- [18]. J. Royer, T. Djiako, E. Schiller et B. Sada Syn, “Le pompage photovoltaïque”, IEPF Université d’Ottawa /EIER/CREPA, 1998.
- [19]. Messaoud MAKHLOUF, “Etude et optimisation d’un modèle de conversion d’énergie photovoltaïque application au pompage”. Mémoire de magistère, Université de Constantine.
- [20]. Khaled Ferkous, “Etude d’une chaîne de conversion d’énergie éolienne” Mémoire de Magister, université de Constantine, 2009
- [23]. J.F. Walker, N. Jenkins, “Wind energy technology”, ed. John Wiley & Sons, Inc., 1997.
- [24]. Tahar Tafticht, “Analyse et commande d’un système hybride photovoltaïque-éolien”
- [25]. E. Hau, “Wind-Turbines” ed. Springer, 2000.
- [26]. B. Multon, “Etat de l’art des aérogénérateurs électriques”, rapport ECRIN mai 2002.

Références bibliographique

- [27]. Meny Ivan, “Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance” Laboratoire d'électrotechnique de Montpellier (LEM).
- [28]. Bernard Multon “Aérogénérateurs électriques” Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.
- [29] Frédéric Poitiers “Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome - machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau)” Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes 2003.
- [30]. C. Zidani, F. Benyarou Et B. Benyoucef, “Simulations De La Position Apparente Du Soleil Et Estimation Des Energies Solaires Incidents Sur Un Capteur Plan Photovoltaïque Pour La Ville De Tlemcen (Algérie)”, Revue Energies Renouvelables, Vol.6, Pp.69-76, 2003.
- [31]. A. El Khadimi, “Modélisation De L'irradiation Solaire Globale D'un Plan Horizontal Et De La Vitesse Du Vent En Vue De Leur Utilisation Dans Le Dimensionnement D'un Système Hybride”, Thèse De Doctorat De 3ème Cycle, Université Cadi Ayyad, Faculté Des Sciences Semlalia, Marrakech, 1998.
- [32]. Zaida Assani Dahouénon. (2006). Modèle d'électrification rurale pour localités de moins de 500 habitants au Sénégal, composante électrification rurale. Sénégal: Ministère d'énergie de Mine.
- [33]. Ludmil Stoyanov, “Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables, thèse de doctorat en énergétique”, Université TECHNIQUE DE SOFIA, 2011
- [34]. Dris Mida, “Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride « Eolien-Photovoltaïque » ”, Thèse de doctorat en sciences, Université de Biskra, 2019
- [35]. Binayak Bhandari, Kyung-Tae Lee, Gil-Yong Lee, Young-Man Cho, et Sung-Hoon Ahn, “Optimization of Hybrid Renewable Energy Power Systems: A review”, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, Vol.2, No.1, pp. 99-112,2015.
- [36]. Ludmil Stoyanov, "Structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables”, revue de génie industriel, vol.5, pp.1-19,2010.
- [37]. François Badin, Stéphane Biscaglia, Jean Bonal, Régine Clavreul, Jean François Fauvarque, Juliette Kouv, Walid Lajnef, Philippe Lefevre, Herve Lesueur, Bernard Multon, Sandrine Pincemin, Alexandre Rojey, Jaques Ruer, Philippe Stevens, “Le stockage de l'énergie”, Dunod, Paris, 2013.

Références bibliographique

- [38]. Yacine Triki, “Contribution à l’optimisation des systèmes hybrides de production d’énergies renouvelables”, Thèse de doctorat, Université de Tizi-Ouzou, 2020
- [39]. Achaibou Nadia, “Optimisation du stockage des énergies renouvelables”, Thèse de Doctorat en électronique, soutenu le 15/11/2011 Ecole Nationale Polytechnique EL-Harrach Alger, Algérie
- [40]. Melle. SAIB Samia, “Contribution à l’optimisation d’un système hybride (PV/éolien) avec stockage d’énergie connecté au réseau électrique”, Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2018
- [41]. “Revue des Energies Renouvelables” Vol. 9 N°3 (2006) Pp.200
- [42]. “Revue des Energies Renouvelables” Vol. 13 N°4 (2010) 591 – 602
- [43]. Melle BRIHMAT Fouzia, “L’Etude conceptuelle d’un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien”, Mémoire de Magister en Electrotechnique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Webographie

- [2]. <http://la-biomasse.e-monsite.com/pages/introduction-les-differents-types-d-energies-renouvelables.html>. Consulter le 09/06/2022
- [4]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_\(énergie\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Biomasse_(énergie)) Consulter Le 03/05/022
- [5]. <http://jeunes.edf.com/> Consulter le 03/05/2022
- [7]. <http://www.meteolafleche.com/Soleil/soleil-generalites.html> Consulter le 18/03/2022
- [8]. http://newewa-sn.com/images/telechargements/systeme_solaire.pdf Consulter le 18/03/2022
- [9]. <https://opera-energie.com/energie-solaire/> Consulter le 18/03/2022
- [10]. <http://www.energies-renouvelables.org/> . Consulter le 18/03/2022
- [11]. <https://www.ion-e.ch/fr/fonctionnement-panneaux-solaires> Consulter le 20/03/2022
- [13]. https://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique/IMG/pdf/energie_solaire_photovoltaique.pdf Consulter le 29/03/2022.
- [21]. [AWEA] American Wind Energy Association: <http://www.awea.org>. Consulter le 10/03/2022
- [22]. <https://www.mtaterre.fr/dossiers/comment-ca-marche-lenergie-eolienne/le-fonctionnement-de-lenergie-eolienne>. Consulter le 10/03/2022

Références bibliographique

[44]. <https://www.amazon.fr/Regulateur-Controleur-panneaux-solaires-batterie/dp/B008KWPFGO>. Consulter le 04/06/2022