

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique et Énergies renouvelables

Thème

**Etude expérimentale d'un système hybride photovoltaïque-
éolien avec des batteries de stockage**

Devant le jury composé de :

Présenté par :

Mr.LAOUINI Abdejalil

Président

- BEHIR Badr Eddine .

Dr.AOUN Yacine

Examineur

- BAKER Yassine .

Mr.GUERFI Youcef

Examineur

Mr.GUERRAH Ayoub

Encadreur

2016-2017

Dédicace

Nous dédions ce modeste mémoire à mes parents qui ont su nous soutenir tout au long de nos études, parfois nous réconforter dans les moments difficiles, et qui sans eux nous n'aurions pu effectuer ce travail.

Nous dédions ce modeste travail :

À nos frères, et nos sœurs.

À toutes ma famille.

À tous nos fidèles amis .

À Tous nos professeurs depuis l'enfance à l'université

À tous nos fidèles amis .

À toute la promotion 2017.

Notre dédicace va également à ceux qui ont participer de près ou de loin à l'aboutissement de nos efforts .

Remerciement

Ce travail a été réalisé à l'unité de recherche des énergies renouvelables du département de génie mécanique de la faculté des sciences de l'université Echahid Hama Lakhdar - El Oued .

Avant tout, nous remercions notre Dieu le tout puissant de Pour nous donner la force d'atteindre nous but et d'accomplir nous travail.

avec mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur Monsieur GUERRAH Ayoub et Nous remercie également tous les membres du jury à l'université de El-oued présence et son pragmatisme exemplaire qui a donné un véritable sens à notre travail.

Nous remercions également toutes les mères et les pères et les frères et amis qui ont été portés au crédit de ce succès et les enseignants à tous les niveaux de l'éducation dans l'enseignement primaire et moyen, l'enseignement secondaire et l'enseignement supérieur.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ne mentionnent pas qui prés ou ont participé à ce jour dans la réalisation de ce travail.

Sommaire

<i>Listes de figure.....</i>	<i>i</i>
<i>Liste de Tableau.....</i>	<i>iv</i>
<i>Listes de termes.....</i>	<i>i</i>
<i>Introduction Générale.....</i>	<i>1</i>
Chapitre I Généralité sur le système photovoltaïque	
<i>I.1. Introduction:</i>	<i>2</i>
<i>I.2.Energie solaire :.....</i>	<i>2</i>
<i>I.3.Rayonnement solaire :</i>	<i>2</i>
<i>I.4.Les effets photoélectrique :.....</i>	<i>3</i>
I.4.1 .Un matériau semi-conducteur :	4
I.4.2.un jonction P-N:	6
<i>I.5.Influence de l'éclairement:</i>	<i>7</i>
<i>I.7.Les types de cellules:.....</i>	<i>10</i>
I.7.1. cellules cristallines :	10
I.7.1.1.Les cellules polycristallines :	10
I.7.1.2.Les cellules monocristallines :	11
I.7.2. couches minces "Le silicium amorphe" :	11
<i>I.8. les caractéristiques électriques des cellules et modules :</i>	<i>12</i>
<i>I.9.Raccordement des cellules entre elles:.....</i>	<i>13</i>
I.9.1.Association en série :	14
I.9.2.Association en parallèle :	14
I.9.3.Les diodes de by-pass :	15
<i>I.10. Rendement et puissance crête des cellules :</i>	<i>16</i>
I.10.1. L'angle d'incidence :	16
I.10.2. L'angle d'inclinaison :	18

I.10.3.Influence de l'éclairement :	19
I.10.4.Influence de la température :	20
I.11.Conclusion :	20
Chapitre II Généralité sur le système éolien.	
II.1.Introduction:.....	22
II.2. Le Vent :	23
II.2.1.Les variations de vent en fonction de l'altitude :	24
II.2.2.Énergie du vent récupérable :	25
II.3. Définition de l'énergie éolienne:	26
II.4. Les différents types d'éoliennes:.....	27
II.4.1.Eoliennes à axe horizontal :	27
II.4.1.1.Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :	27
II.4.1.2. Théorie de betz :	29
II.4.1.3.Etude de l'action aérodynamique sur l'élément de pale:.....	31
II.4.2.Eoliennes à axe vertical:	34
II.4.3. Comparaison des différents capteurs presents :	35
II.5. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne:	36
II.5.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone:	36
II.5.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :	38
II.6. Conclusion :.....	39
Chapitre III Généralité sur le système du stockage de batterie.	
III.1.Introduction :	40
III.2. Le stockage de l'énergie :	40
III.4.l'accumulateur électrochimique :	44
III.4.1.Principe :	45
III.4.2. Les différents accumulateurs électrochimiques :	46

III.4.2.1.Les accumulateurs Nickel-Fer (Ni-Fe) :.....	46
III.4.2.2.Les accumulateurs au plomb (Pb-PbO ₂) :	46
III.4.2.3.Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd):	47
III.4.2.6.Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn) :	48
III.4.2.8. Les accumulateurs à négative de lithium (LiNiO ₂):	48
III.4.2.9. Les accumulateurs Zinc-halogènes :	48
III.4.2.10. Les piles à combustibles :.....	49
III.5. Les phénomènes de vieillissement :	50
III.5.1. La sulfatation de l'électrode négative :	50
III.5.2. La corrosion de l'électrode positive :	50
III.6.Conclusion :	50
Chapitre IV expérimentale d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec des batteries de stockage.	
IV.2. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien:	51
IV.3.Analyse et discussion des résultats du système hybride PV-éolien disponible à El-OUED:	54
IV.3.1.L'énergie produite au cours des 20 jours du système hybride(PV-éolien):.....	54
IV.3.2.Energies d'un seul jour produites par le système hybride (PV-éolien):	58
IV.4.Conclusion :	60
Conclusion générale.....	60
Annexes.....	65
Résumé	

Listes de figure

Figure I.1: Rayonnement solaire	03
Figure I.2: spectre du rayonnement solaire	03
Figure I.3: Les effets photoélectrique et électroluminescent	04
Figure I.4 : Formation des bandes d'énergie pour les électrons d'atomes de Si arrangés en mailles cristallines de type diamant	05
Figure I.5: Semi-conducteur de type N	05
Figure I.6: Semi-conducteur de type P	06
Figure I.7: Un jonction P-N	07
Figure I.8: les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction.	07
Figure I.9: caractéristique d'une photodiode.	08
Figure I.10: caractéristique d'une cellule Photovoltaïque.	09
Figure I.11: encapsulation des cellules.	10
Figure I.12: cellules cristallines.	11
Figure I.13: Les cellules polycristallines.	11
Figure I.14: une cellule monocristalline	11
Figure I.15: Le silicium amorphe.	12
Figure I.16 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.	12
Figure I.17: Puissance et facteur de forme d'une cellule solaire.	13
Figure I.18 : Caractéristique de la mise en série des cellules solaires.	14
Figure I.19 : Caractéristique de la mise en parallèle des cellules solaires	14
Figure I.20: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.	16
Figure I.21: Schéma d'un module photovoltaïque.	16
Figure I.22: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque .	17
Figure I.23: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence.	17
Figure I.24: Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.	18

Figure I.25: Dimensionnement de l'entre-axe entre deux capteurs.	18
Figure I.26: le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement avec l'éclairement.	19
Figure I.27 : Influence de la température sur la cellule	20
Figure II.1: Eolienne de Brush.	22
Figure II.2: Eolienne de Gedser .	23
Figure(II.3): Effet de la force de Coriolis sur la direction des vents	24
Figure (II.4): Répartition de vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude	25
Figure (II.5) : Conversion de l'énergie cinétique du vent.	26
Figure (II.6): Petite éolienne à axe horizontal	27
Figure (II.7): Les différentes composantes d'une éolienne à axe horizontal	28
Figure (II.8): Capteur à axe horizontal : définition des vitesses.	29
Figure (II.9): Coefficients de puissance C_p , de couple C_m et de poussée axiale C_f en fonction du λ paramètre de vitesse pour des éoliennes à axe horizontal	31
Figure (II.10): Caractéristiques d'un profil de pale d'éolienne.	32
Figure (II.11): Évolution des profils le long d'une pale quelconque $\Lambda = f(\lambda)$.	32
Figure (II.12): Évolution des profils le long d'une pale quelconque $r = f(\lambda)$	33
Figure (II.13): Petites éoliennes à axe vertical.	34
Figure (II.14): Principe du éolienne axe vertical et de l'incidence variable.	35
Figure II.15: Courbe limite de Betz et courbes caractéristiques des principaux rotors à axes vertical ou horizontal.	36
Figure II.16 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles. .	37
Figure II.17 : Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau	38
Figure II.18: Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI.	39

Figure III.1 : <i>Comparaison des énergies et puissances spécifiques de différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques</i> [3]	42
Figure III.2: <i>Densité d'énergie et de puissance massique de différentes batteries rechargeables</i> [4].	43
Figure III.3: <i>Principe d'un accumulateur électrochimique.</i>	45
Figure III.4: <i>Batterie au plomb.</i>	46
Figure III.5: <i>Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle</i> [Robert et Alzieu 2005].	47
Figure III.6: <i>« Principe du générateur H₂-air » d'après [11].</i>	49
Figure IV.1: <i>Synoptique de l'installation expérimentale - Système de production hybride éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie.</i>	52
Figure IV.2: <i>assemblage batteries (série/parallèle).</i>	52
Figure IV.3: <i>le courant le sortie au cours 20 jour du système hybride (PV-éolien)</i>	55
Figure IV.4: <i>les changements de température dans les 20 jours</i>	56
Figure IV.5: <i>les changements de énergie solaire [w/m²] dans les 20 jours</i>	56
Figure IV.6: <i>les changements de puissance du système dans les 20jours</i>	57
Figure IV.7: <i>le courant de sortie au cours un jours du système hybride (PV-éolien)</i>	58
Figure IV.8: <i>les changements de température en seul jour</i>	59
Figure IV.9: <i>les changements de puissance en seul jour</i>	59

Liste de Tableau

Tableau III.1: <i>principales caractéristiques des différentes technologies d'accumulateurs[20]</i>	42
Tableau III.2: <i>caractéristiques pratiques des technologies de batteries commercialisées les plus courantes [24]</i>	44

Listes de termes

ΔE [J]	quantum d'énergie.
λ [μm]	la longueur d'onde.
ν [Hz]	fréquence .
h [J]	étant la constante de Planck.
UV	Ultra-violet.
IR	Infra-rouge.
LV	Lumière visible.
Bv	Bande de valence .
Bc	Bande de conduction.
I_{cc} [A]	courant de court-circuit dû à l'éclairement E.
V_{co} [V]	tension en circuit ouvert.
I_p [A]	courant de photopile .
V_p [A]	tension de photopile.
Si	silicium.
CdTe	Tellurure de cadmium.
CIS	Cuivre indium.
MPP	point de puissance maximal.
V_{opt} (V_{mpp}) [V]	tension optimaux.
I_{opt} (I_{mpp}) [A]	courant optimaux.
STC	Standard Test Conditions.
R	Rendement.
α [°]	angle d'inclinaison.
h	dimension du capteur.
α	hauteur solaire minimum .
β	inclinaison des capteurs.
PV	photovoltaïque.
C [N.m]	Couple sur le capteur.
C_f	Coefficient de poussée
C_m	Coefficient de couple.
C_p	Coefficient de puissance.
C_x	Coefficient de trainée.

C_z	Coefficient de portance.
D [m]	diamètre du capteur.
F_x [N]	Force de trainée.
F_z [N]	Force de portance.
L [m]	Longueur de pale.
P [N]	Poussée axial sur la capteur.
R [m]	Rayon du capteur ou rayon minimal de l' aubage.
S [m ²]	Surface.
P [W]	puissance.
i [rad]	Angle d'incidence ou d'attaque du profil.
I	Longueur de la corde d'une pale.
m [Kg.s]	Débit-masse du vent à travers l'éolienne.
n [tr/s]	Vitesse de rotation du capteur.
u [m/s]	Vitesse tangentielle de déplacement de l'aubage.
V	Vitesse instantanée du vent.
V_m [m/s]	Vitesse moyenne du vent.
V_n [m/s]	Vitesse nominal du vent.
V_R [m/s]	Vitesse relative du vent.
η	Rendement .
Λ	Portance.
ρ [Kg/m ³]	Masse volumique de l'air.
ω [red/s]	Vitesse angulaire de rotation du capture.
NiCd	Nickel Cadmium.
NiMH	Nickel Metal Hydride.
Li-Ion	Lithium Ion.
Ni-Fe	Nickel-Fer.
Ni-Zn	Nickel-Zinc.
Na-S	Sodium-Soufre.

Introduction Générale

Introduction générale :

La production d'énergie est un grand défi pour les années à suivre. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées s'accroissent. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener le développement.

Aujourd'hui, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources fait des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. La consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse et fait un danger supplémentaire pour les générations[1].

L'énergie renouvelable, c'est des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. À la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro turbines.

L'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques. Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie.

Il est utilisé un système hybride PV-éolien entre les exportateurs de sources d'énergie renouvelables pour parvenir à une production durable. Est-il possible d'utiliser le système hybride PV-éolien dans le wilaya d'El Oued ?.

Dans le premier chapitre nous allons parler de la composition chimique et des types et des caractéristiques qui permettent d'augmenter le rendement et comment connecter les cellules solaires.

À le deuxième chapitre nous allons parler du vent et des types d'énergie éolienne et types, Nous allons nous concentrer sur le type de horizontal et Parce qu'il est utilisé dans l'expérience.

Dans le troisième chapitre nous allons parler du système de stockage de l'électrochimique et des types de batteries et leurs caractéristiques en général, et Déterminer l'équation de réaction pour chaque type et donner des détails.

Dans le quatrième chapitre nous allons parler de la définition du système hybride PV-éolien et Nous déterminerons la nature de l'état du climat dans le wilaya d'El Oued où on a fait la conception de courbes et discuter des résultats.

Chapitre I Généralité sur le système photovoltaïque

I.1. Introduction:

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

A la différence des autres énergies renouvelables, l'énergie solaire est disponible par tout sur la terre. L'Europe reçoit en moyenne chaque jour 3kWh par mètre carré même si les déserts les plus ensoleillés recueillent 7kWh. Il n'y a donc pas de problème de gisement pour cette source.

Les premières applications ont lieu dès les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés.

I.2.Energie solaire :

Le soleil est une étoile placée au centre du système solaire. Il est principalement composé d'hydrogène (74%) et d'hélium (24%). C'est une étoile diffuse de très puissante énergie. L'utilisation industrielle de cette énergie gratuite sont principalement le panneau solaire photovoltaïque et le chauffage solaire. Le principe du photovoltaïque est de transformer l'énergie solaire en électricité grâce à une cellule photovoltaïque. Ainsi l'homme peut produire de l'électricité gratuitement à partir du rayonnement solaire, sans passer par l'énergie nucléaire, qui a un effet néfaste pour l'environnement.

Étant constitués de tubes où circule un caloporteur, la plupart du temps avec de l'eau, les réchauffeurs solaires, qui servent alors à récupérer le rayonnement infrarouge du soleil pour chauffer un local ou toute autre installation comme les serres, etc.. [3]

I.3.Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "**quantum d'énergie**" et notée " ΔE ". L'énergie d'un photon de fréquence ν (en hertz), dont la longueur d'onde λ (en mètre) est égale à la célérité divisée par ν , est exprimée par la relation $\Delta E = h \times \nu = (h \times c) / \lambda$, h étant la constante de Planck c'est-à-dire $6,63 \times 10^{-34}$ Joules par seconde. Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons (Fig:I.1).

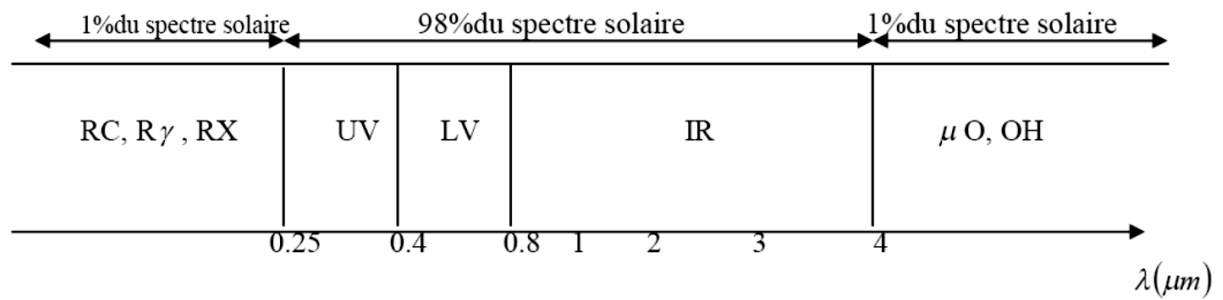


Figure I.1: Rayonnement solaire.

Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : **5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge**, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.[4]

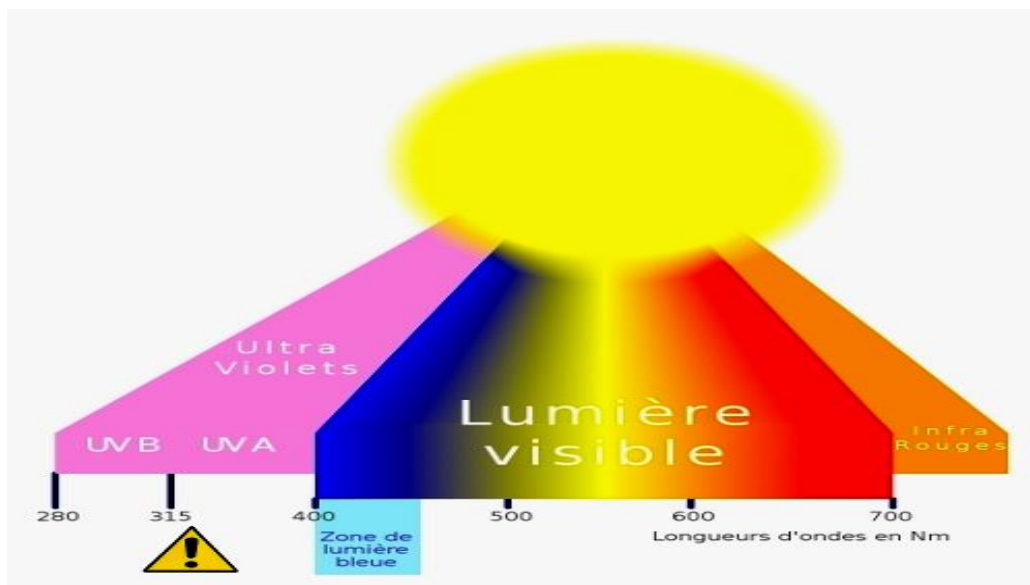


Figure I.2: spectre du rayonnement solaire

I.4. Les effets photoélectrique :

La réception des rayons solaires permettant la fabrication d'énergie se fait par l'intermédiaire de capteurs solaires, plus connus dans le commerce sous le nom de panneau solaires. La structure d'une cellule photovoltaïque se compose de trois bandes prises en sandwich par deux électrodes.

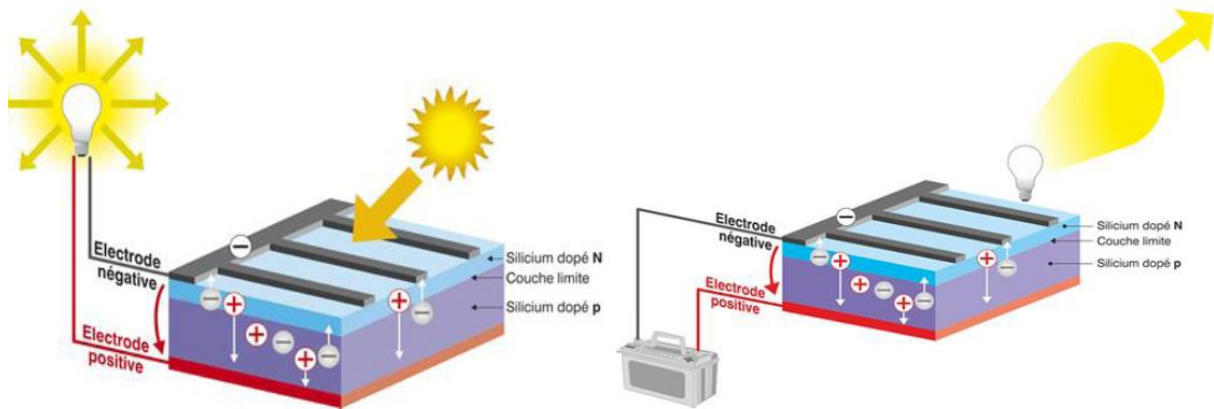


Figure I.3: Les effets photoélectrique et électroluminescent .

I.4.1 .Un matériau semi-conducteur :

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve.

C'est la mécanique quantique et la théorie des bandes qui permettent d'expliquer ce comportement. Schématiquement, le phénomène peut être représenté de la manière suivante :

Le niveau d'énergie d'un électron d'un atome ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs discrètes. Ces plages sont appelées "bandes d'énergie". Suivant leur niveau d'énergie, les électrons peuvent soit se trouver dans une bande de valence ou dans une bande de conduction. Dans le premier cas, ils contribueront aux liaisons de l'atome, dans l'autre, à la conductibilité du matériau. Entre ces bandes, il existe des bandes dites "interdites", correspondant aux valeurs énergétiques que l'électron ne peut prendre.

Pour les matériaux conducteurs, cette bande interdite n'existe pas. Les électrons de liaisons contribuent alors directement à la conductibilité. Pour les matériaux isolants, cette bande est quasi infranchissable tant l'énergie nécessaire est importante. Pour les semi-conducteurs, cette bande interdite est suffisamment petite pour permettre un passage aisé des électrons de la bande de valence à la bande de conduction.

Cette représentation permet d'expliquer la différence de comportement à la chaleur des conducteurs et des semi-conducteurs. Dans un métal, les électrons de valence soumis à la chaleur s'agitent, diminuant la zone conductrice de la bande d'énergie. Pour les semi-conducteurs, une augmentation de la température favorise le passage des électrons situés sur la bande de valence vers la bande de conduction, améliorant la conductibilité de l'atome (diminution de la résistance)[5].

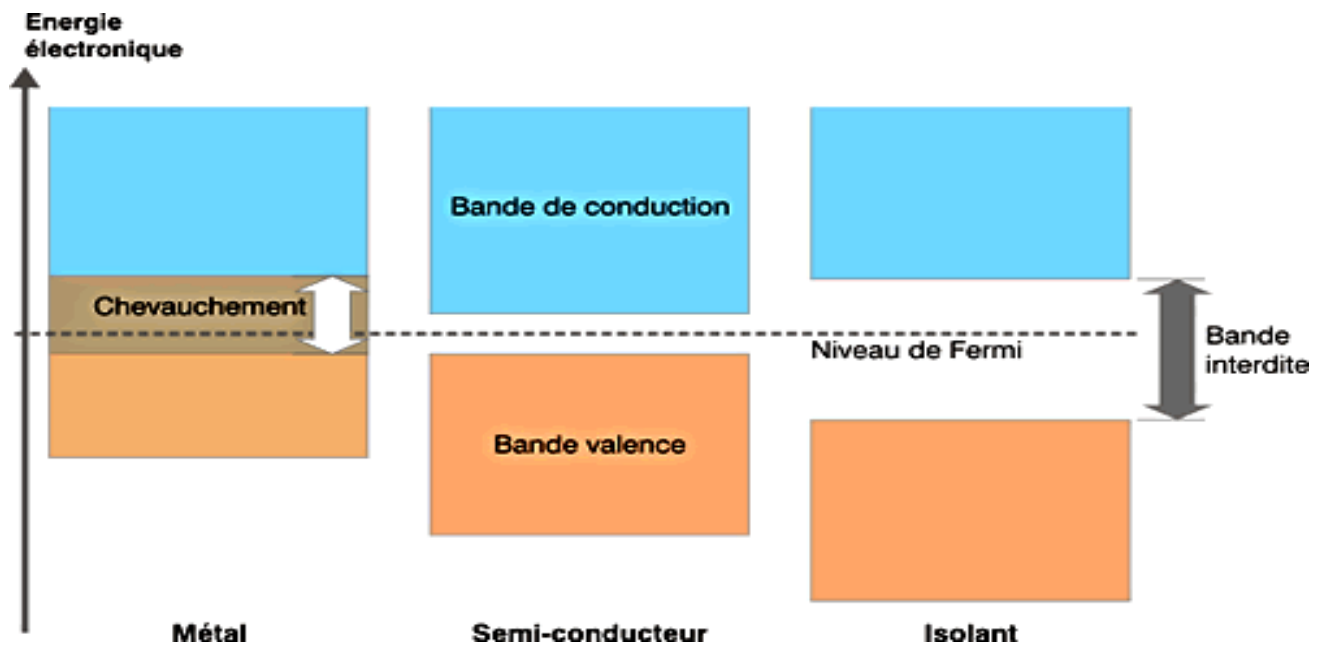


Figure I.4 : Formation des bandes d'énergie pour les électrons d'atomes de Si arrangés en mailles cristallines de type diamant .

Remarque : le niveau de fermi représente le plus haut niveau d'énergie que les électrons peuvent prendre à une température de 0K.

Il est possible d'augmenter la conductibilité d'un semi-conducteur par un procédé chimique, appelé dopage, qui consiste à insérer des impuretés dans le semi-conducteur.

On réalise ainsi des semi-conducteurs de *type n* et des semi-conducteurs de *type p*.

Pour obtenir un matériau de *type n*, on dope le matériau semi-conducteur (généralement du silicium) avec un élément de valence supérieure (possédant plus d'électrons que le semi-conducteur), comme le phosphore, afin d'ajouter des électrons à la bande de conduction. La conduction est alors assurée par le déplacement de ces électrons.

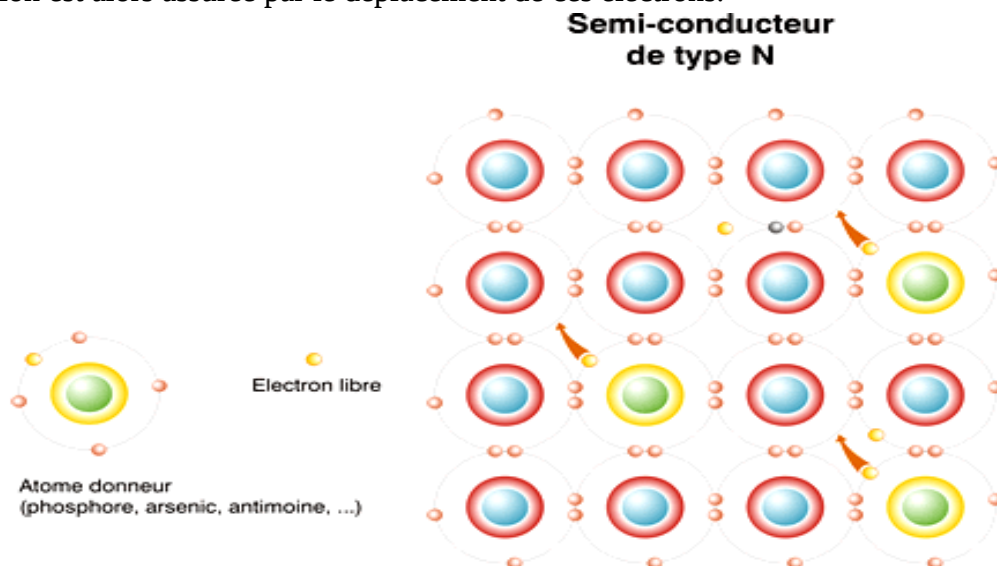


Figure I.5: Semi-conducteur de type N

Pour obtenir un matériau de type p, on dope le matériau semi-conducteur par un élément de valence moins importante, comme le Bore, afin de diminuer le nombre d'électrons de la bande de valence. La conduction est alors assurée par le déplacement de porteurs chargés positivement (trous correspondant au manque d'électrons) [5].

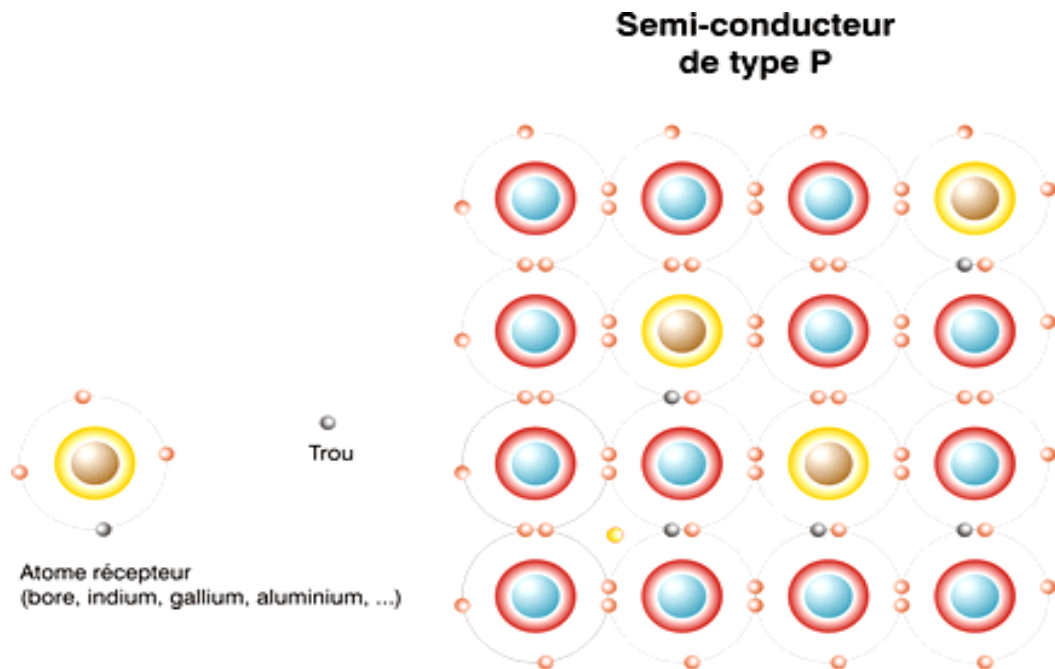


Figure I.6: Semi-conducteur de type P.

I.4.2. une jonction P-N:

Une diode électroluminescente ou une cellule solaire photovoltaïque est composée d'une jonction p-n, la couche supérieure étant un matériau de type n et la couche inférieure de type p. Pour fabriquer ces jonctions, on effectue un traitement de surface pour déposer un semi-conducteur de type n sur la surface externe d'un matériau de type p.

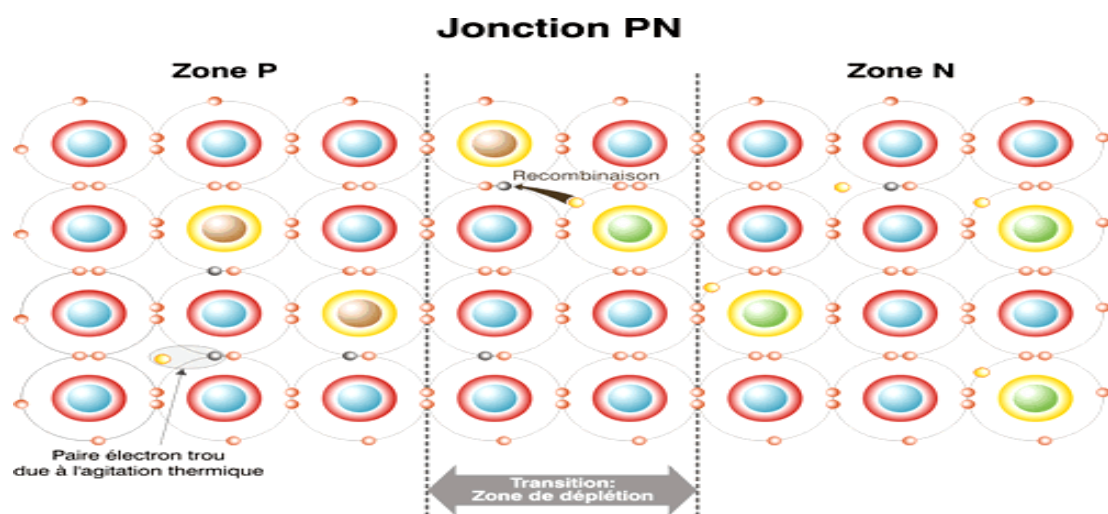


Figure I.7: Une jonction P-N.

La mise en contact de ces matériaux génère une barrière de potentiel à la base du champ électrique permanent. Cette barrière, appelée zone de déplétion, est formée par recombinaison du surplus de trous et d'électrons des zones *p* et *n* remise en contact. Le schéma suivant représente les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction Figure I.8.

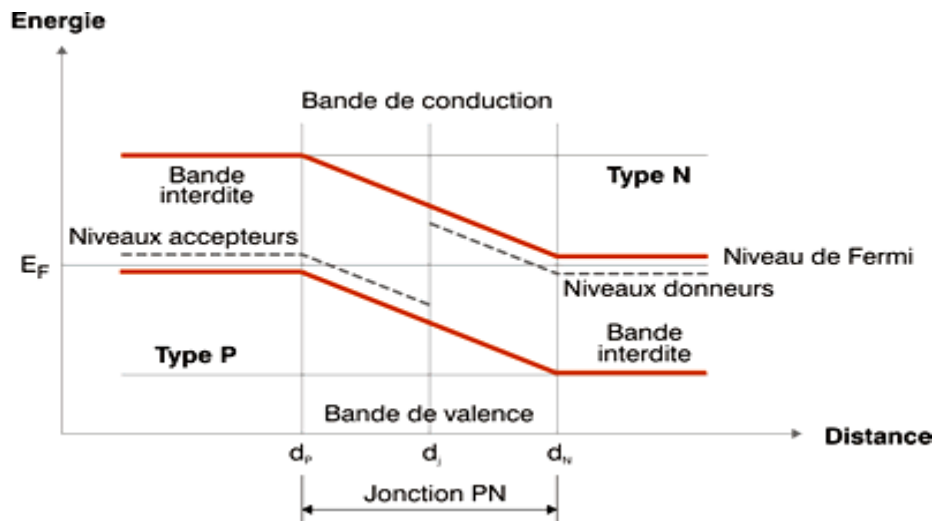


Figure I.8: les niveaux d'énergie au voisinage de la jonction.

Si la température d'une telle jonction augmente, les électrons rempliront progressivement tous les états d'énergie, annulant la bande interdite et par là, l'effet de la jonction p-n[5] .

I.5.Influence de l'éclairement:

L'effet du rayonnement lors qu'il fournit assez d'énergie (si celle-ci est supérieure à la largeur de la bande interdite) fait apparaître des paires supplémentaires d'électron trou porteur (apparition simultanée d'un porteur *n* et d'un porteur *p*) dans la jonction.

Les porteurs *p* ainsi créés ont tendance à migrer vers le matériau *p* et les porteurs *n* vers le matériau *n*, renforçant la barrière de potentiel. Une partie des porteurs générés par le rayonnement sera elle aussi soumise à divers phénomènes de recombinaison (disparition simultanée d'un porteur *n* et d'un porteur *p*).

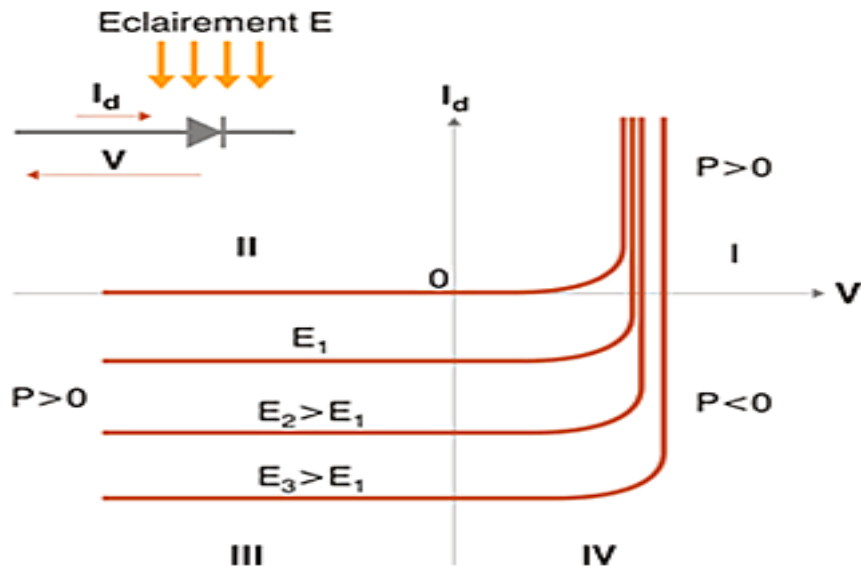


Figure I.9: caractéristique d'une photodiode.

L'éclairement a deux effets sur le fonctionnement :

Si le système fonctionne en mode récepteur (quadrant III) : la résistance diminue avec l'éclairement, c'est la *photorésistance*.

Si le système fonctionne en mode générateur (quadrant IV) : le courant "court-circuit" est proportionnel à l'éclairement et la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe. C'est la cellule photovoltaïque à jonction P-N.

C'est sur ce quadrant IV que sont basées les caractéristiques des cellules :

Représentation théorique et équation d'une "cellule idéale".[5]

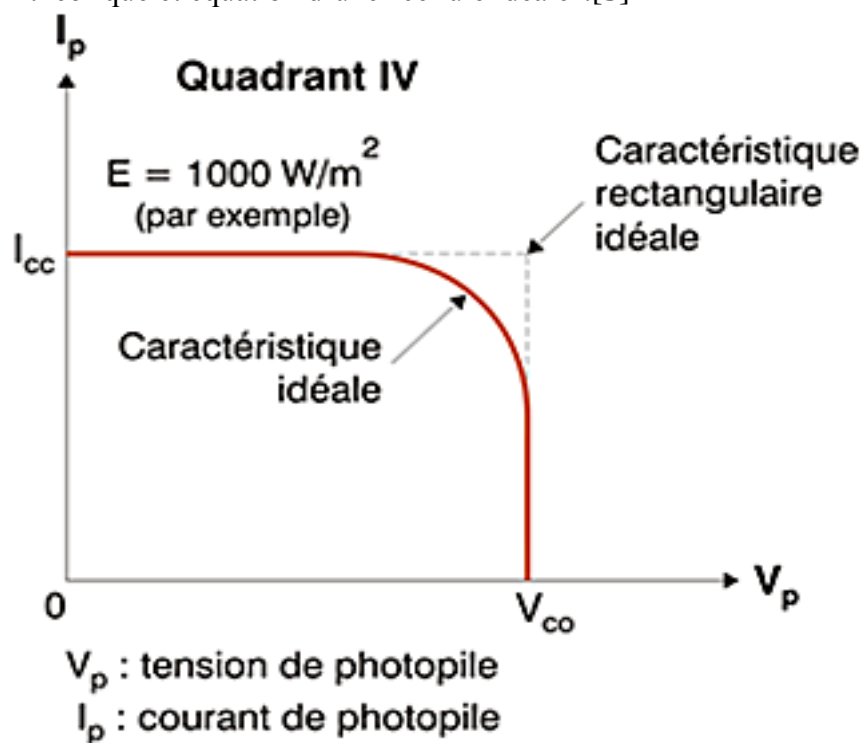


Figure I.10: caractéristique d'une cellule Photovoltaïque.

Avec,

- I_{cc} [A] : courant de court-circuit dû à l'éclairement E .
- V_{co} : tension en circuit ouvert.

Pour créer un courant, on place des électrodes sur chacun des matériaux et on les relie par un circuit électrique. Ces raccordements et leur fabrication provoqueront des effets résistifs parasites qui différencieront les caractéristiques réelles des cellules de ce comportement théorique[5].

I.6. Les modules photovoltaïques :

Pour obtenir une tension électrique générée qui soit utilisable, on raccorde plusieurs cellules en série qui forment alors un string. Un module est composé de plusieurs strings. L'association des cellules en modules permet :

- D'obtenir une tension suffisante.
- De protéger les cellules et leurs contacts métalliques de l'ambiance extérieure (humidité,...)
- De protéger mécaniquement les cellules (chocs,...)

Les modules les plus courants (communément appelés panneaux) sont généralement constitués :

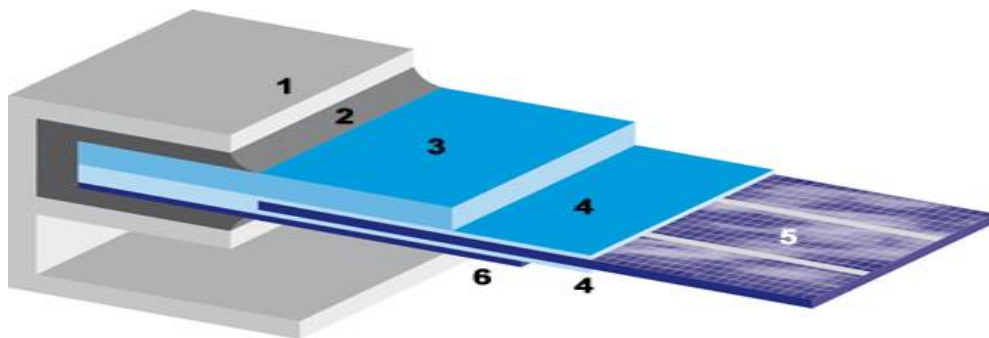


Figure I.11: encapsulation des cellules.

- (1 et 2) D'un cadre de support et un joint d'étanchéité .
- (3) D'une plaque de verre extra claire (favorisant la transmission lumineuse) .
- (4) De deux couches d'ETHYLENE-ACETATE DE VYNILE qui enrobent les cellules assurant leur protection contre les intempéries et l'humidité.
- (5) Des différents strings de cellules .
- (6) D'une feuille de TEDLAR (ou éventuellement du verre) comme face arrière du module. Ce polymère à haute résistance aux UV et à la haute température assure au module sa résistance mécanique face aux chocs externes (vent, transport,...) .

Des modules tuiles/ardoises solaires où les cellules sont directement intégrées dans des modules de formes traditionnelles de toiture. Celles-ci sont cependant plus exigeantes en termes de main d'œuvre (chaque tuile doit être raccordée manuellement !) Les modules sont

connectés entre eux (en série ou parallèle) par des fils électriques. Ils forment alors un champ de capteurs (appelés aussi générateur) [5].

I.7.Les types de cellules:

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique qui lorsqu'il est exposé au spectre solaire génère une tension électrique par effet photovoltaïque. Toutes les cellules sont créées à partir de matériaux semi-conducteurs. La plupart du temps, c'est le silicium (Si) qui est utilisé mais on rencontre aussi le sulfure de cadmium, le tellure de cadmium, des alliages de cuivre indium et sélénium, ... Trois technologies de cellules existent suivant leur mode de production.

I.7.1. cellules cristallines :

Ces cellules, généralement en silicium, ne comprennent qu'une seule jonction p-n. La technique de fabrication de ces cellules, basée sur la production de "wafers" à partir d'un silicium très pure, reste très énergivore et coûteuse.



Figure I.12: cellules cristallines.

Méthode de fabrication : le cristal formé par refroidissement du silicium en fusion dans des creusets parallélépipédiques est ensuite découpé en fines tranches appelées "wafers". Les cellules sont alors obtenues après "dopage" et traitement de surface.

On distingue deux types de cellules cristallines :

I.7.1.1.Les cellules polycristallines :

Le refroidissement du silicium en fusion est effectué dans des creusets parallélépipédiques à fond plat. Par cette technique, des cristaux orientés de manière irrégulière se forment. Cela donne l'aspect caractéristique de ces cellules bleutées présentant des motifs générés par les cristaux.

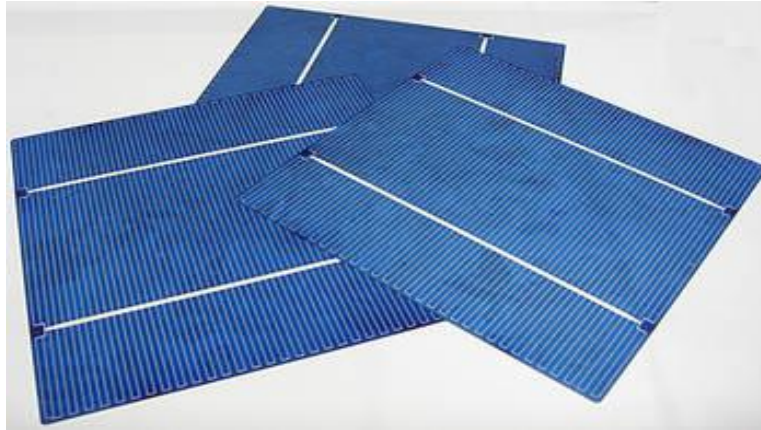


Figure I.13: Les cellules polycristallines.

le Rendement est 11-15 % (On obtient ainsi une puissance de 110 à 150 Wc par m²) Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins , en termes d'avantages Rapport performance/prix . mais inconvénient rendement faible sous éclairciment réduit.

I.7.1.2.Les cellules monocristallines :

Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium.

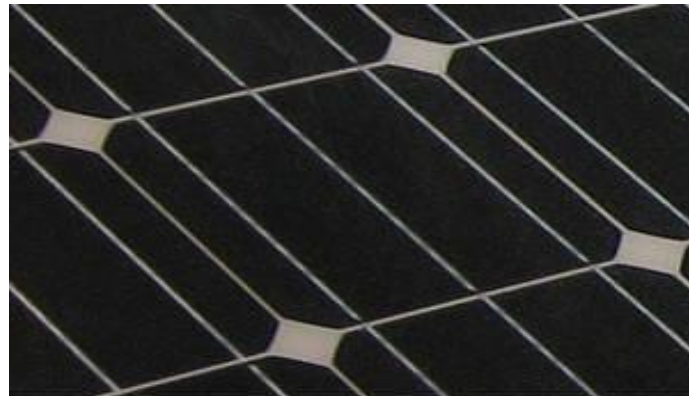


Figure I.14: une cellule monocristalline

le Rendement est 12-19 % On obtient ainsi une puissance de 120 à 190 Wc par m² , où avantage très bon rendement , mais avec inconvénients comme coût élevé et rendement faible sous éclairciment réduit.

I.7.2. couches minces "Le silicium amorphe" :

Dans le cas de "couches minces", le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). Le silicium amorphe (a-Si) (silicium non cristallisé de couleur gris foncé), le tellure de cadmium , le disélénium de cuivre indium font notamment partie de cette génération. Ce sont des cellules de cette technologie que l'on retrouve dans les montres, calculatrices,... dites solaires !



Figure I.15: Le silicium amorphe.

Rendement est 60-70 Wc/m² où Avantages Moins coûteux que la première génération puisqu'elle consomme moins de matériau semi-conducteur et Moins polluant à la fabrication (Ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers" (moins énergivores)) et fonctionnent avec éclaircissement faible et moins sensible à l'ombrage et aux élévations de température et possibilité de créer des panneaux souples.

mais avec inconvénients comme rendement global plus faible et rendement moindre sous éclaircissement direct et Diminution de performance avec le temps plus importante.

I.8. les caractéristiques électriques des cellules et modules :

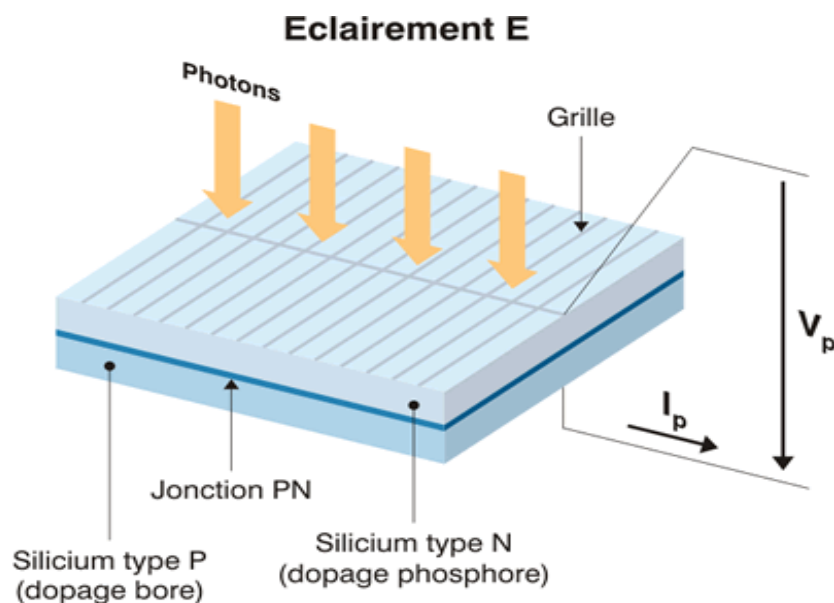


Figure I.16 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

Sous un éclaircissement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- Sa tension à vide : V_{co} . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit: I_{cc} . Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : *maximal power point*) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{MPP} , I_{MPP}).

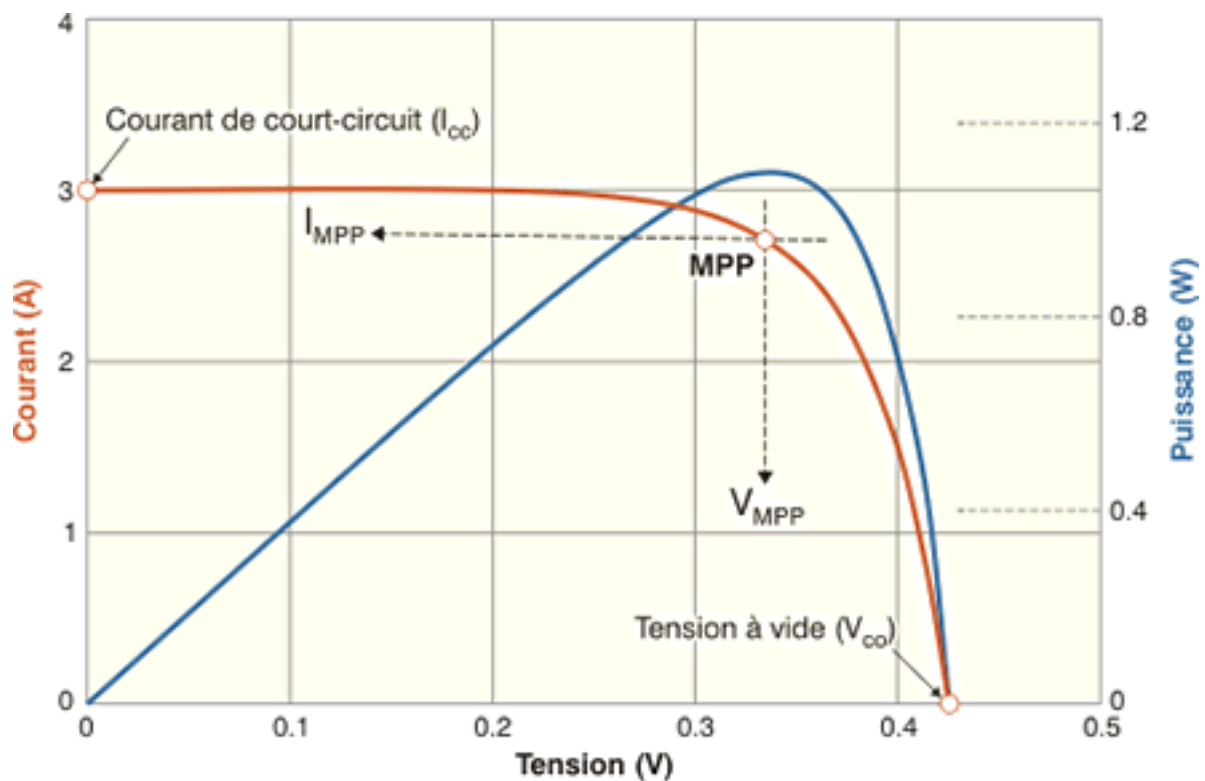


Figure I.17: Puissance et facteur de forme d'une cellule solaire.

Rem : Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de $1\,000\text{ W/m}^2$, température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale).

Actuellement, les cellules présentent des valeurs de l'ordre de 0.5 V - 3.5 A - 2.1 Wc [5] .

I.9. Raccordement des cellules entre elles:

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de $1,25\text{ Watt}$. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la

connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique. Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés[5].

I.9.1.Association en série :

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules.

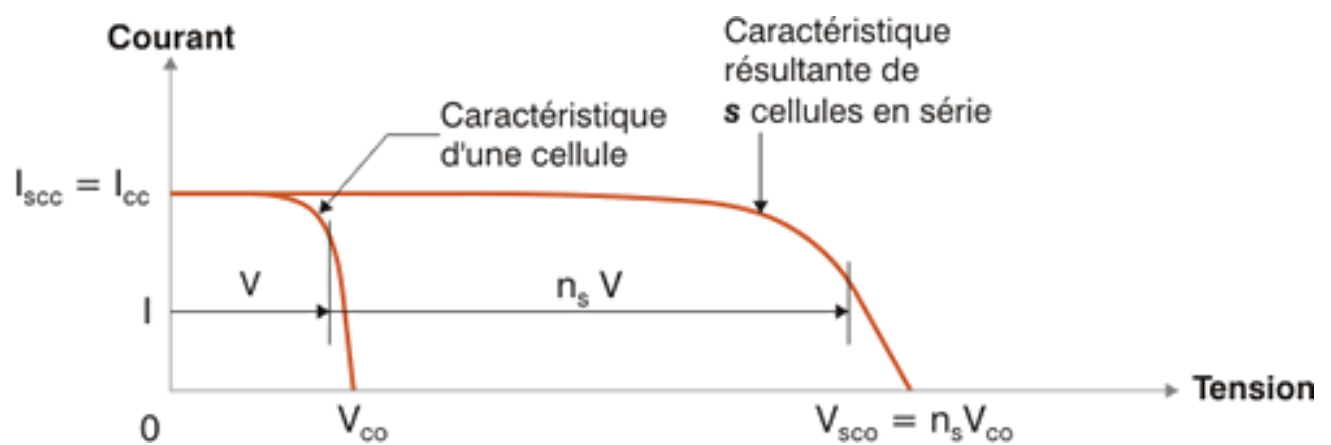


Figure I.18 : Caractéristique de la mise en série des cellules solaires.

I.9.2.Association en parallèle :

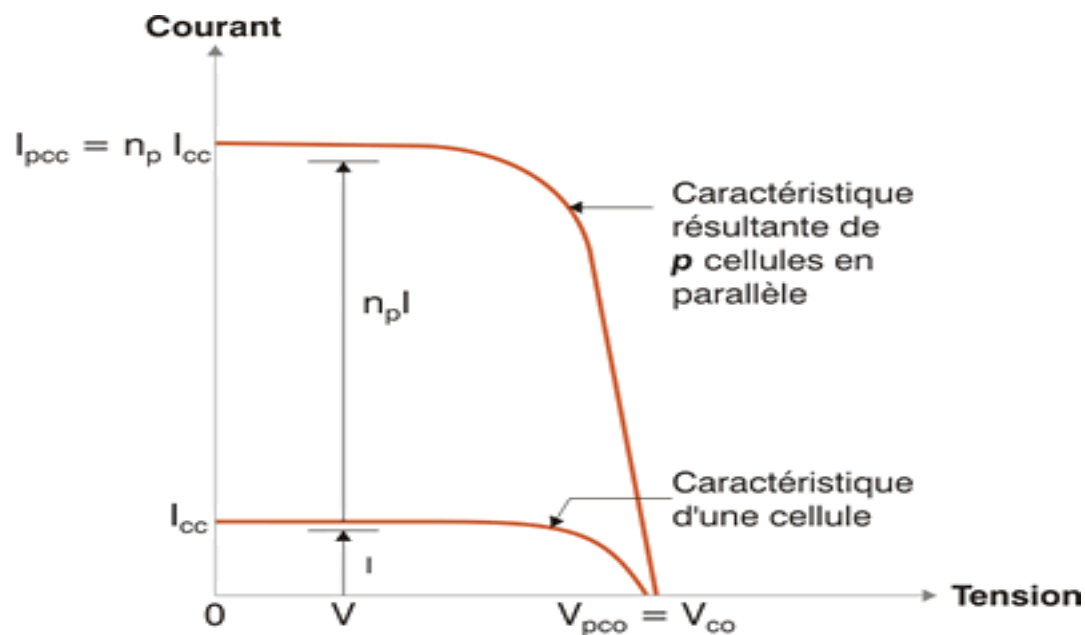


Figure I.19 : Caractéristique de la mise en parallèle des cellules solaires.

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules.

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s \cdot n_p$.

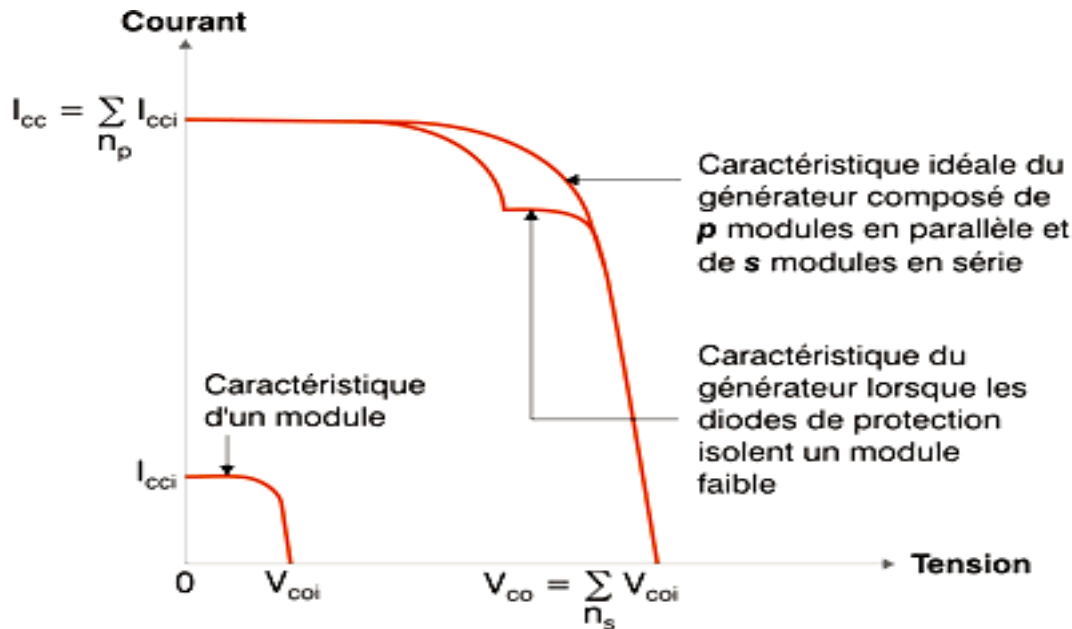


Figure I.20: Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.9.3. Les diodes de by-pass :

Il arrive fréquemment que les cellules élémentaires qui composent le module ne présentent pas toutes la même courbe caractéristique au même moment. Les raisons peuvent être multiples : variété inévitable de fabrication, défaillance, différence d'éclairement ou de température (dus par exemple à un ombrage non uniforme du module, un encrassement,...).

Sous certaines conditions, la cellule la plus faible peut alors se comporter comme une cellule réceptrice, dissipant la puissance générée par la cellule la plus forte. Celle-ci peut même être détruite si la contrainte ou la température devient trop importante.

Pour éviter ce phénomène, on place des diodes de by-pass (empêchant tout courant ou tension inverses). Celles-ci sont placées en série lorsque les cellules sont connectées en parallèle et en parallèle lorsque les cellules sont connectées en série.

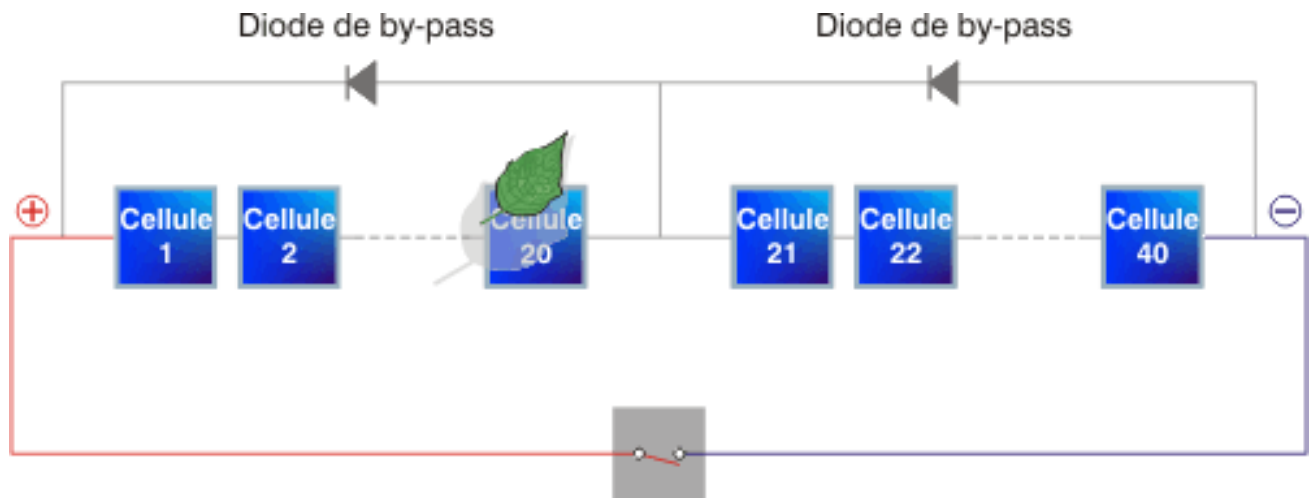


Figure I.21:Schéma d'un module photovoltaïque.

I.10. Rendement et puissance crête des cellules :

Le rendement d'une cellule ou d'un module photovoltaïque est le rapport entre l'énergie électrique produite par cette cellule ou module et l'énergie lumineuse reçue sur la surface correspondante :

$$\eta [\%] = P_{\text{produite}} [\text{kW}] / P_{\text{incidente}} [\text{kW}]$$

Le rendement réel varie donc continuellement, en fonction notamment de l'énergie solaire incidente.

Pour permettre une comparaison de l'efficacité de différentes cellules, on définit ces caractéristiques dans des conditions de test bien précises (STC = Standard Test Conditions). Ces conditions sont : émission lumineuse de 1 000 W/m², température de 25 °C, conditions spectrales Air Mass 1.5 (composition du spectre identique au spectre solaire lorsqu'il traverse une épaisseur et demie d'atmosphère, ce qui correspond à un angle d'incidence de 41.8° par rapport à l'horizontale).

La puissance crête est définie comme la puissance électrique produite par la cellule (ou un panneau) lorsqu'elle est soumise aux conditions STC. Cette valeur est utilisée comme référence pour comparer les panneaux photovoltaïques entre eux.

On obtient alors le rendement par la formule suivante :

$$\eta_{\text{STC}} [\%] = \text{Puissance crête} [\text{W/m}^2] * / \text{Puissance du spectre STC} [\text{W/m}^2]$$

Avec :

- Puissance du spectre STC = 1 000 [W/m²].

I.10.1. L'angle d'incidence :

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et les rayons lumineux, (Figure I.23). Cet angle a une grande importance. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90°. Chaque fois que cet angle diminue ou augmente, la surface en m² du panneau

solaire exposé aux rayons lumineux diminue et donc en partant de la puissance du panneau solaire, le rendement diminue aussi.

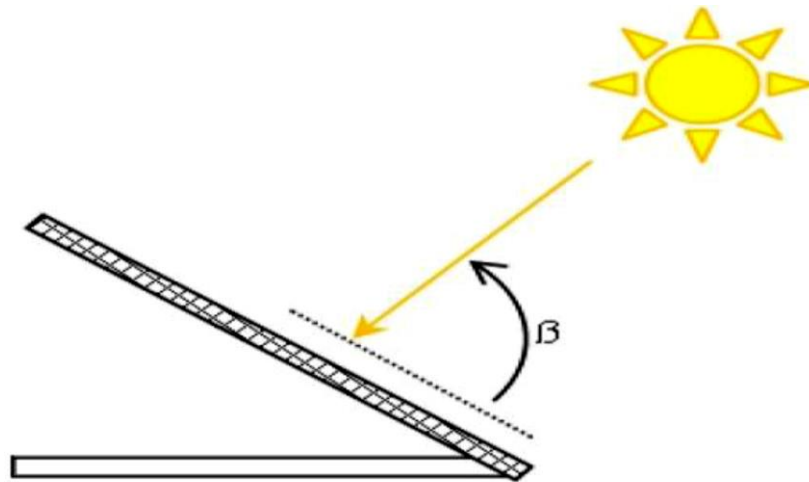


Figure I.22: Angle d'incidence sur un module photovoltaïque .

L'angle d'incidence joue un rôle majeur pour les rendements du panneau. Il est défini selon l'équation suivante:

$$R = 100 \times \sin(\beta)$$

Avec, le rendement en (%) et , l'angle d'incidence en (°).

La figure suivante représente l'évolution du rendement en fonction de l'angle d'incidence[6]

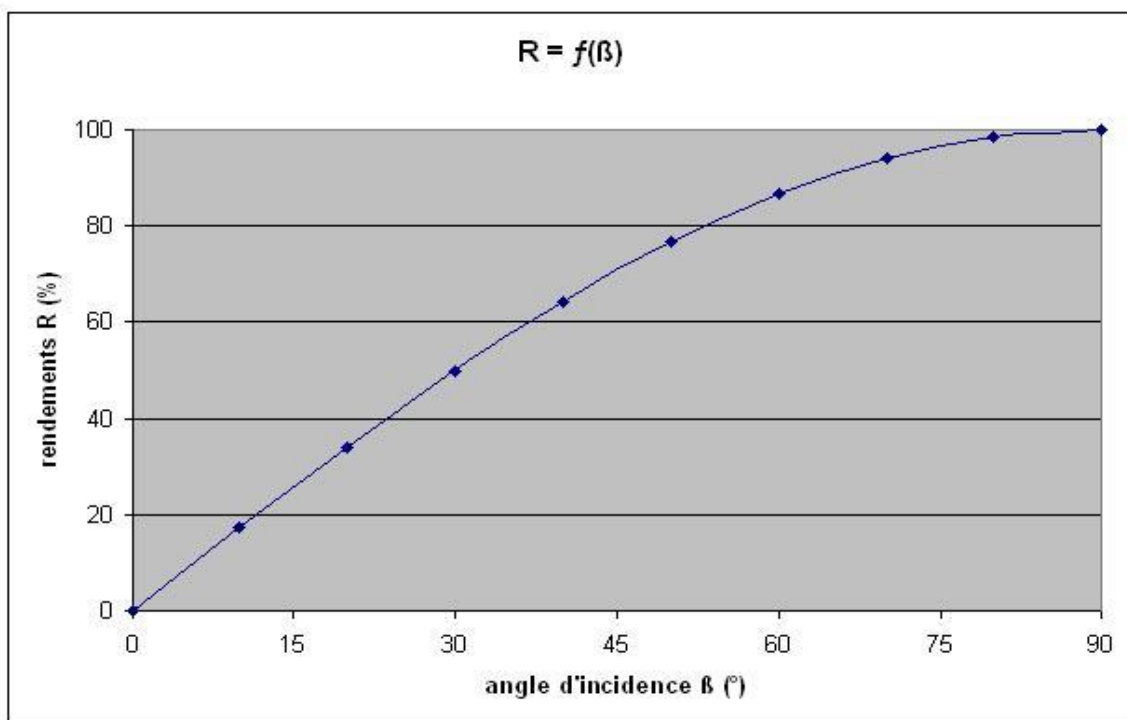


Figure I.23: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence.

Ainsi, le rendement est maximal lorsque les rayons arrivent perpendiculairement (90°) sur le module photovoltaïque. Alors que pour un angle de 45° , le rendement n'est que de 70 %.

I.10.2. L'angle d'inclinaison :

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport à l'horizontale.

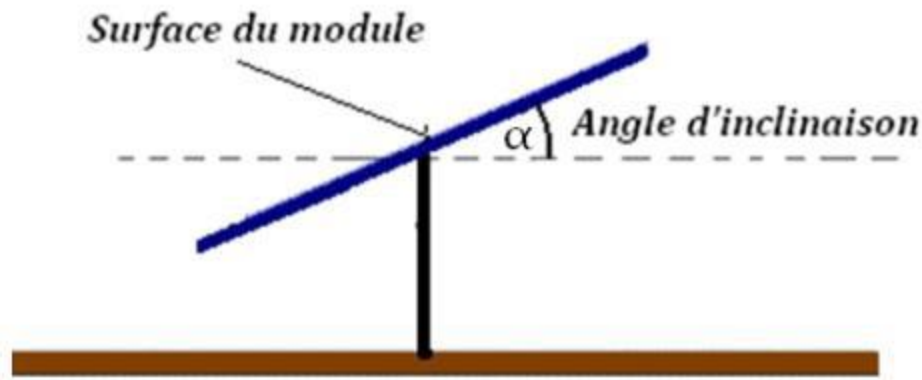


Figure I.24: Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.

L'évolution de la trajectoire du soleil variant selon les saisons, l'angle d'inclinaison (pour un module photovoltaïque n'étant pas muni d'un système rotatif) est plus réduite en été et plus importante en hiver. L'inclinaison d'un module photovoltaïque par rapport à l'horizontale est donnée par la relation suivante [7] :

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left[0.4 \times \left(\frac{N \times 360}{365} \right) \right]$$

Avec, L : latitude du lieu, N : nombre de jour entre l'équinoxe de printemps (21 mars de chaque année) et le jour considéré. Cette relation permettant un rendement supérieur n'est valable que lorsque le module solaire en question est muni d'un système qui lui permet de s'incliner. Or on ne trouve ce système que très rarement.

Dimensionnement de l'entre-axe entre deux capteurs

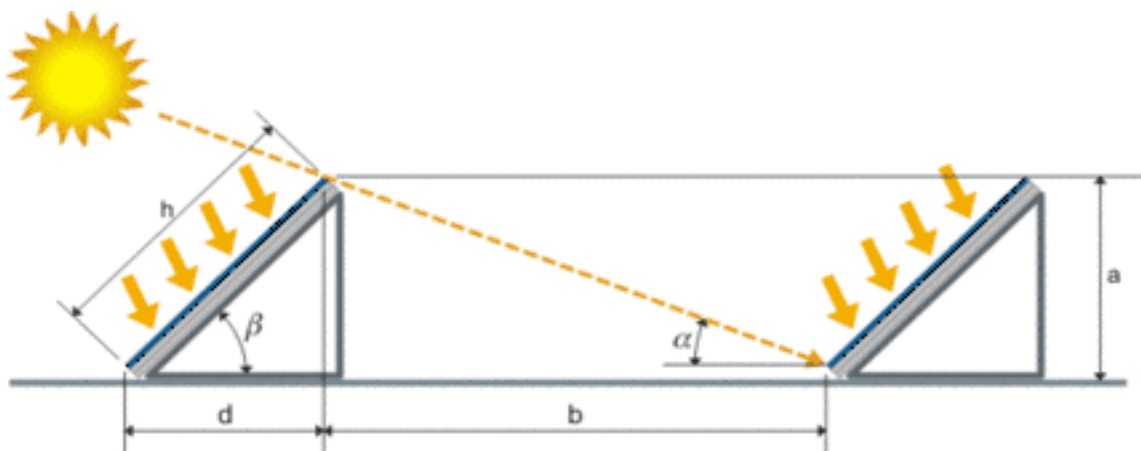


Figure I.25: Dimensionnement de l'entre-axe entre deux capteurs.

L'entre-axe entre deux rangées de capteurs est défini par la formule suivante :

$$\text{Entre axe} = d + b = h (\cos \beta + \sin \beta / \tan \alpha)$$

où,

- h = dimension du capteur.
- α = hauteur solaire minimum (généralement prise le 21 décembre soit un angle de 16°).
- β = inclinaison des capteurs.

En considérant des capteurs de 1,2 m de large, l'entre-axe des rangées de capteurs est de[5] :

$$1,2 \times (\cos 35^\circ + \sin 35^\circ / \tan 16^\circ) = 3,38 \text{ m.}$$

I.10.3. Influence de l'éclairement :

La luminosité influence considérablement les performances des cellules.

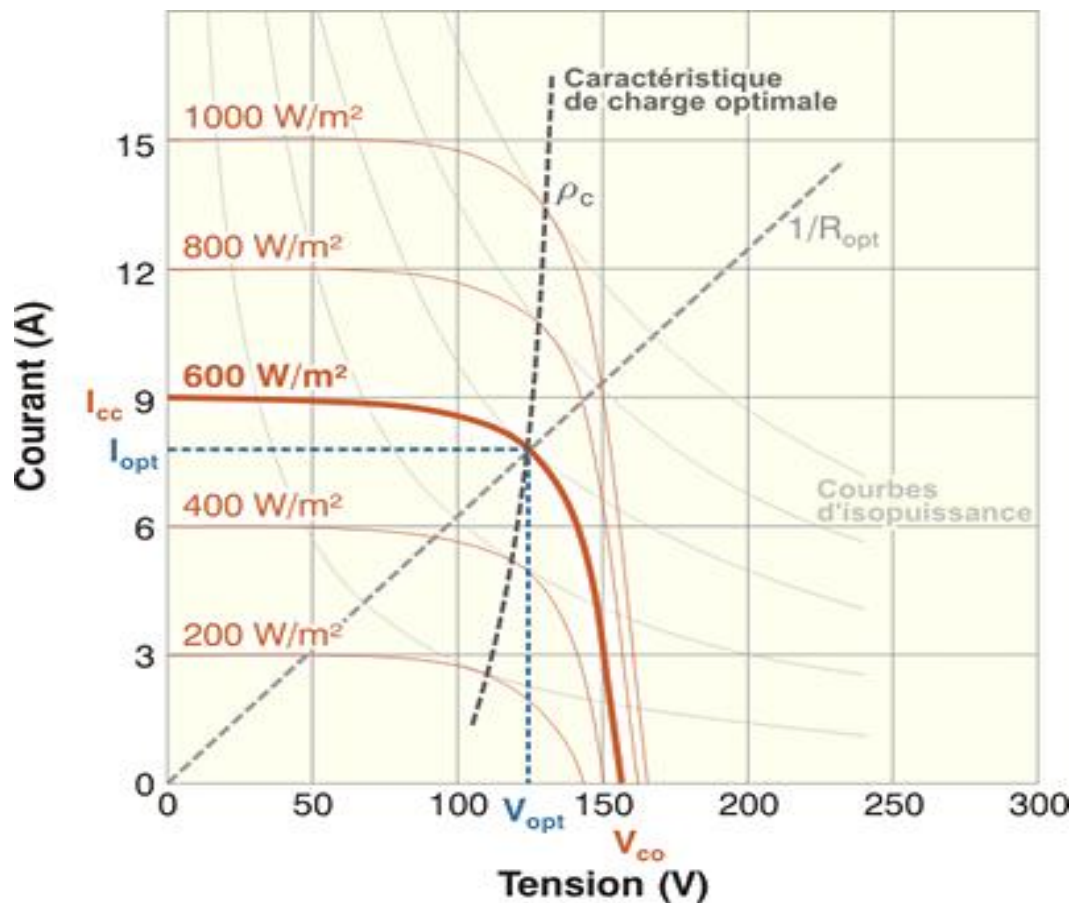


Figure I.26: le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement avec l'éclairement.

Comme le montre ce graphique, le courant de court-circuit (I_{cc}) croît proportionnellement avec l'éclairement, alors que la tension à vide (V_{co}) varie très peu (environ 0,5 V). Ainsi, au plus la couverture nuageuse est importante, au plus l'intensité du courant généré est faible.

I.10.4. Influence de la température :

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule. On comprendra donc tout l'intérêt d'une ventilation correcte à l'arrière des panneaux ! .

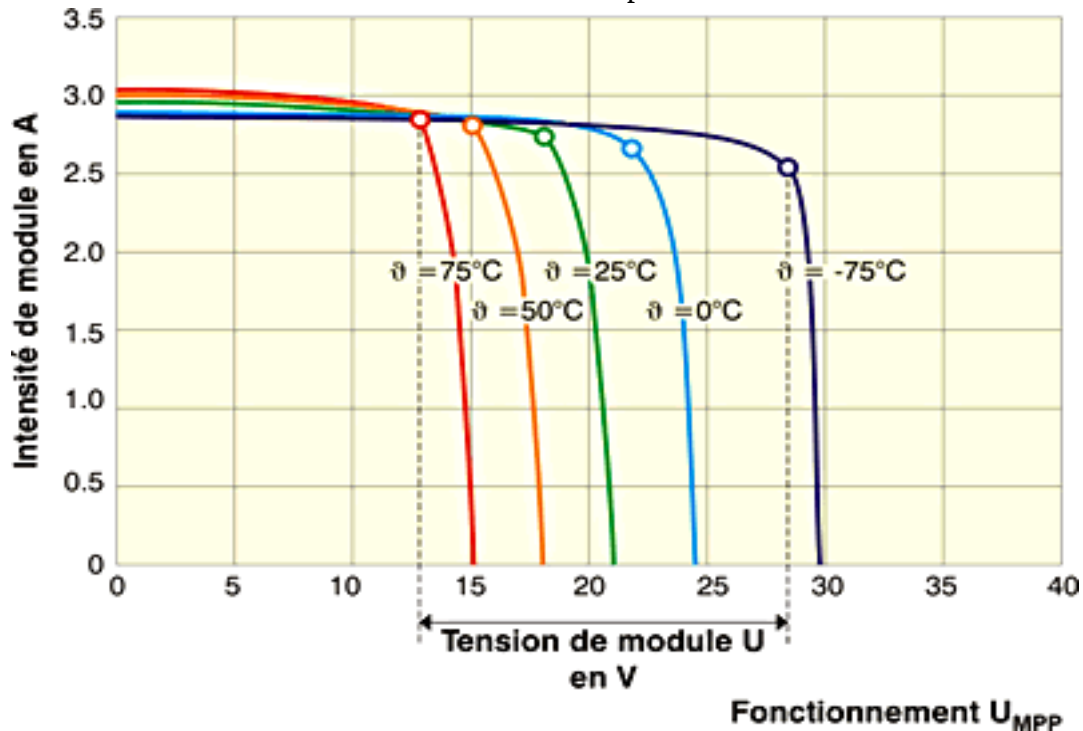


Figure I.27 : Influence de la température sur la cellule .

La perte de tension d'un module ou d'une cellule peut être estimée par la formule suivante[5] :

$$U(T^\circ) = U(25^\circ\text{C}) + (\Delta T^\circ \cdot a)$$

Avec :

- ΔT : augmentation de température par rapport aux conditions STC (25°C)
- a : coefficient de température V_{oc} [mV/K], valeur fournie par le fabricant

I.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les propriétés chimiques de base du PV cellulaire décrits circuits équivalents. Nous avons vu que la cellule photovoltaïque a une caractéristique et la tension (V) non linéaire le courant I.

Avec les méthodes de montage des cellules PV pour contrôler l'intensité du courant électrique et la tension. Et nous avons cité à toutes les influences qui augmentent le rendement des cellules PV et nous avons vu l'impact du changement climatique sur les données (I (V) et P (V)) de d'après les Cellules photovoltaïques PV.

Chapitre II Généralité sur le système éolien.

II.1.Introduction:

Le vent est énergie naturelle capable de créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le mot éolienne vient du grec « Éole », signifiant « rapide » « vif » et qui désignait dans l'antiquité grec le dieu du vent. Ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie : les éoliennes.

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité compte parmi les technologies d'énergies renouvelables les plus largement développées et les plus utilisées et connaît un essor dans de nombreux pays. En raison de la baisse continue des coûts de production et de développement de projet due aux économies d'échelle, l'énergie éolienne devient rentable dans un nombre croissant de pays .

Parmi les différentes formes d'application de l'énergie éolienne, on opère une distinction entre les installations terrestres (ou onshore), offshore et les petites installations éoliennes. L'énergie éolienne onshore devrait prendre une importance croissante dans le moyen terme dans le domaine de la stabilité du réseau. Mais l'énergie éolienne offshore pourra aussi être amenée à contribuer à l'approvisionnement en charge de base grâce aux vitesses constantes du vent et aux facteurs d'utilisation élevés en haute mer[1] .

L'ancêtre de l'éolienne, le moulin à vent, existe depuis des siècles. On pouvait trouver plusieurs types de moulins : des moulins afghans, les moulins chinois, à trépied ou encore à tour. Vers 1100 ils servaient principalement pour moudre le blé et pomper l'eau. Mais la première éolienne est vraiment apparue entre 1887 et 1888, construite par l'américain Charles F.Brush. Elle produisait du courant pour 12 batteries, 350 lampes à filament, 2 lampes à arc à charbon et 3 moteurs[2].

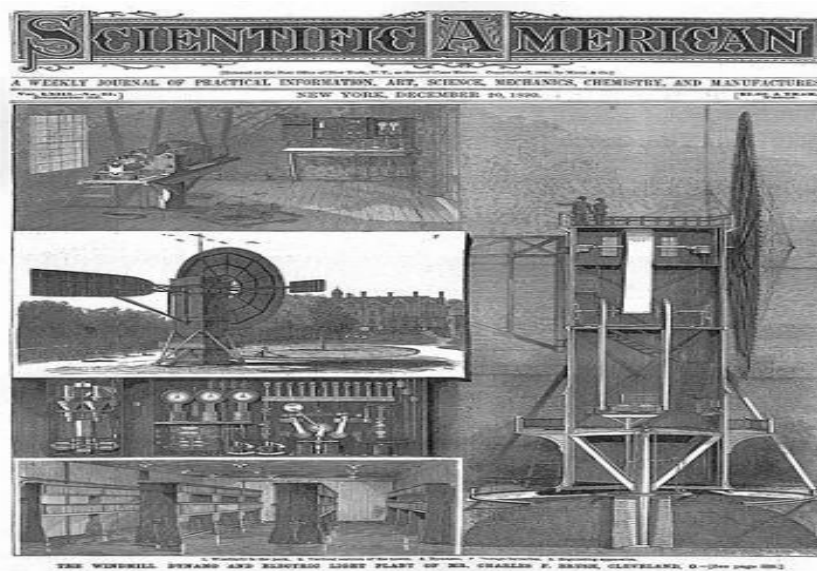


Figure II.1: Eolienne de Brush.

Poul la Cour conçut également plusieurs éoliennes expérimentales au XIXe siècle dont une qui existe toujours à Askov au Danemark. Ensuite pendant la première moitié du XXe siècle les éoliennes ont été confrontées à la concurrence des centrales au charbon et du réseau

électrique. Mais, en raison des pénuries de charbon et de pétrole pendant les deux guerres mondiales, la demande en énergie éolienne est restée constante. En 1957, Johannes Juul créa la turbine Gedser, servant de modèle aux éoliennes actuelles[2].



Figure(II.2): Eolienne de Gedser .

Depuis les éoliennes se sont améliorées, elles font moins de bruit, produisent plus d'électricité. Ainsi leur implantation a considérablement augmenté depuis un demi-siècle. De nos jours il existe deux types d'éoliennes : des éoliennes qui créent une force mécanique , appelée éoliennes de pompes, et des éoliennes qui créent de l'électricité, les aérogénérateurs. Ce sont ces dernières que nous allons étudier[2].

II.2. Le Vent :

L'atmosphère composée essentiellement d'azote, d'eau et d'oxygène est caractérisée par sa pression, sa température et son humidité, paramètres pouvant varier avec l'altitude. Le rayonnement solaire est absorbé de façon très différente aux pôles et à l'équateur du fait de la forme sphérique de la terre. L'énergie absorbée à l'équateur est donc très supérieure à celle absorbée aux pôles[3].



Figure(II.3): Effet de la force de Coriolis sur la direction des vents

Ces variations de température provoquent des différences de densité des masses d'air entraînant leur déplacement d'une latitude à une autre. Ce déplacement s'effectue des zones où la densité de l'air (pression atmosphérique) est élevée vers celle où elle est plus faible. Ces déplacements sont considérablement influencés par la '*force de Coriolis*' (due à la rotation de la terre) qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Ces lois définissent les mouvements généraux de déplacement d'air, donc du vent. On peut prévoir la direction des vents dominants dans la plupart des parties du globe avec une certaine assurance, cependant ces directions uniques sont souvent perturbées par [2]:

- les orages qui troublent la direction dominante bien que celle-ci soit bien apparente dans les relevés continus.
- les obstacles naturels qui modifient la direction du vent au sol.
- les dépressions cycloniques qui peuvent se déplacer dans n'importe quelle direction et qui se superposent au système général de la pression atmosphérique.

Le vent se caractérise par 3 grandes variables par rapport au temps[3] :

- sa vitesse et sa direction et son altitude.

II.2.1. Les variations de vent en fonction de l'altitude :

La vitesse du vent est une fonction croissante avec la hauteur au-dessus du sol et avec l'altitude (par rapport au niveau de la mer). La loi de répartition de la vitesse suivant une verticale dépend, d'une part, du relief local et, d'autre part, de la *rugosité* de la région.

Au sommet d'une colline arrondie, on a un accroissement local de vitesse dont l'effet peut inverser le gradient de vitesse habituel et faire que la vitesse au sol soit plus grande qu'à une certaine hauteur.

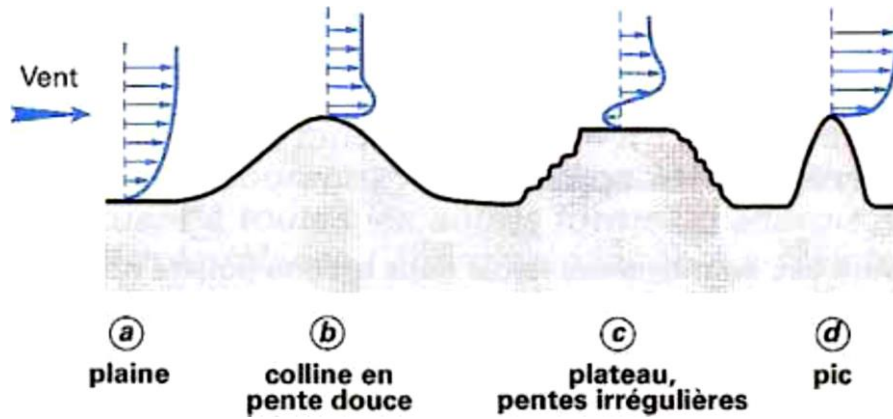


Figure (II.4): Répartition de vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude .

La figure (II.4) traduit la répartition de la vitesse du vent en fonction du relief rencontré et de l'altitude.

En terrain plat, on peut représenter la variation de vitesse v en fonction de la hauteur h au-dessus du sol par la loi[4] :

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0} \right)^\alpha \quad (II.1)$$

Avec v_0 vitesse à la hauteur h_0 de référence au-dessus du sol, α coefficient caractéristique du lieu.

Le coefficient α a sensiblement les valeurs suivantes :

- en mer : $\alpha = 0,13$.
- sur un rivage : $\alpha = 0,16$.
- en plaine : $\alpha = 0,2$.
- en plaine boisée : $\alpha = 0,24$.
- en ville : $\alpha = 0,3$.

II.2.2.Énergie du vent récupérable :

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air qui traverse une certaine surface S . La puissance $\dot{W}$ est donc[4] :

$$\dot{W} = \frac{1}{2} \rho v^2 S v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (II.2)$$

Avec ρ masse volumique de l'air ($\rho \approx 1,25 \text{ kg/m}^3$ dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer).

La puissance $\dot{W}$ varie donc comme le cube de la vitesse v du vent .

On définit aussi la circulation Γ d'un profil C par :

$$\Gamma = \int_C v dS \quad (II.3)$$

Cette circulation peut soit varier périodiquement, l'écoulement est alors *instationnaire* , soit être constante, l'écoulement est alors *stationnaire* .

La force de portance F_z d'une surface S est donnée par la relation .

$$F_z = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_z \quad (II.4)$$

De même, la force de traînée F_x est égale à :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho v^2 S C_x$$

II.3. Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (**Figure II.5**)[5].

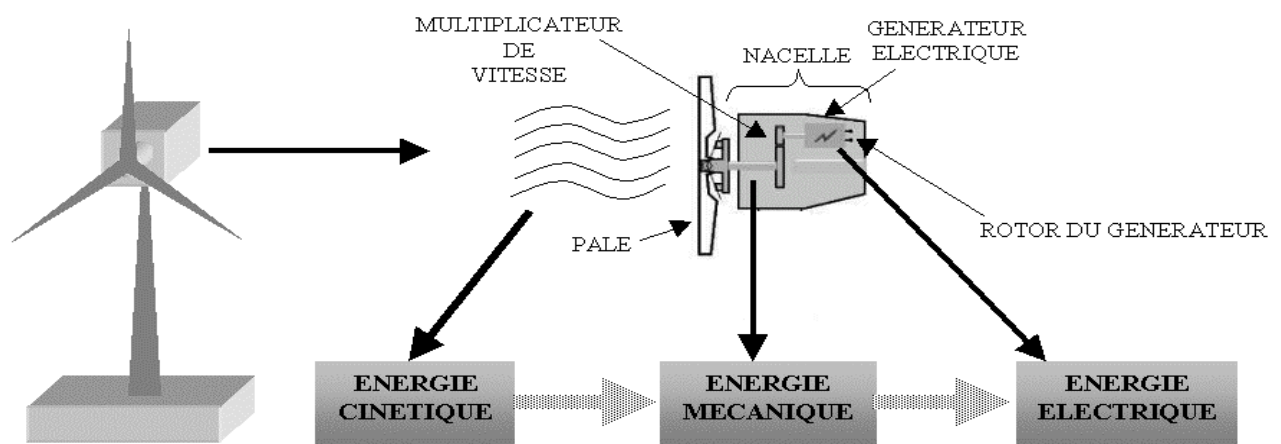


Figure (II.5) : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible)[5].

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores[4] .

II.4. Les différents types d'éoliennes:

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

II.4.1.Eoliennes à axe horizontal :

c'est la technologie largement dominante en « grand éolien ». En petit éolien, où la rugosité du terrain est plus importante en raison des faibles hauteurs de captage, on trouve plus de diversité de structures. La figure suivante illustre par exemple, une petite éolienne tripale rapide, multipale à vitesse lente ou éolienne Darrieus multipale à axe horizontal (**Figure II.6**).



Figure (II.6): Petite éolienne à axe horizontal.

Pour ce type de turbine, le coefficient de puissance est plus grand que le type de turbine verticale. Par contre, il est dépend non seulement de la vitesse mais aussi de la direction du vent[6].

II.4.1.1.Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :

Le vocabulaire le plus souvent utilisé pour décrire une éolienne retient principalement quatre sous-ensembles.

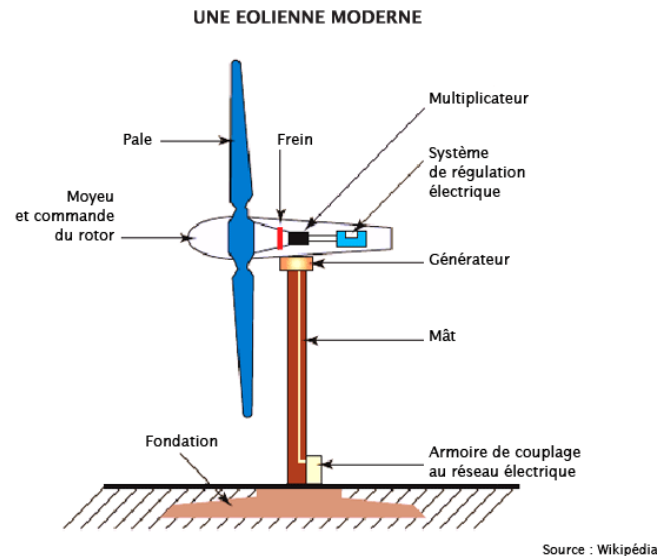


Figure (II.7): Les différentes composantes d'une éolienne à axe horizontal .

- **le rotor** : partie rotative de l'éolienne placée en hauteur afin de capter des vents forts et réguliers. Il est composé de pales (en général 3) en matériau composite qui sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent. Reliées par un moyeu, ces dernières peuvent en moyenne mesurer chacune 25 à 60 m de long et tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute ;
- **la nacelle**: structure soutenue par le mât abritant les différents éléments mécaniques. On distingue les éoliennes à entraînement direct de celles équipées de train d'engrenages (multiplicateur/réducteur) selon le type d'alternateur utilisé. Les alternateurs classiques requièrent une adaptation de la vitesse de rotation par rapport au mouvement initial du rotor.
- **la tour**: composée du mât, du système de commande électrique et du transformateur. Généralement de forme conique, le mât supporte la nacelle. Il mesure entre 50 et 130 m de haut et a un diamètre à son pied compris entre 4 et 7 m. Une ouverture en bas du mât permet d'accéder aux différents équipements de l'éolienne parmi lesquels le transformateur qui permet d'augmenter la tension de l'électricité produite afin de l'injecter sur le réseau ;
- **la base**: souvent circulaire et en béton armé dans le cas des éoliennes terrestres, qui permet de maintenir la structure globale.

On qualifie de turbine l'ensemble constitué du rotor et du train d'engrenages. Par extension, ce terme est souvent employé pour désigner l'éolienne dans sa globalité, comme en anglais (*wind turbine*) [7].

II.4.1.2. Théorie de betz :

L'énergie cinétique du vent ne peut être entièrement récupérée car il faut, en particulier, évacuer l'air qui a travaillé dans le capteur. En outre, par suite de l'action de retenue de la veine d'air par la roue, la vitesse axiale amont v_1 diminue en aval jusqu'à la vitesse v_2 (figure II.8)[4].

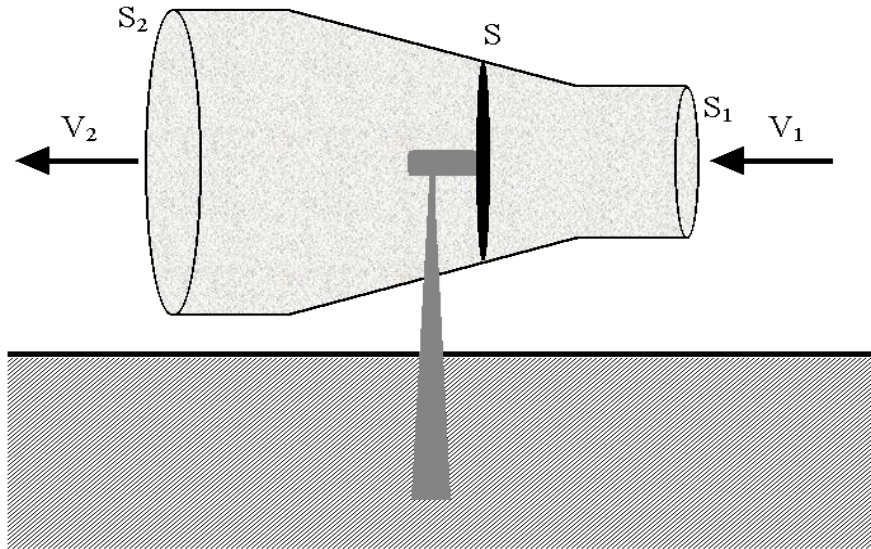


Figure (II.8): Capteur à axe horizontal : définition des vitesses.

D'après la **théorie de Betz**, la puissance récupérable sur l'éolienne est due à la variation de l'énergie cinétique du vent :

$$\dot{W} = \Delta \dot{E}_c = \frac{1}{2} \dot{m} (v_2^2 - v_1^2) \quad (II.6)$$

Avec $\dot{m}$ le débit-masse du vent à travers l'éolienne $\dot{m} = \rho S v$.

L'effort qui s'exerce sur l'éolienne est donné par le théorème de la variation de la quantité de mouvement :

$$\vec{F} = \rho S v (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (II.7)$$

Cet effort crée une puissance :

$$\dot{W} = \vec{F} \cdot \vec{V} = \rho S v^2 (v_2 - v_1) \quad (II.8)$$

qui est évidemment la même que celle donnée par (1). Ainsi, la combinaison de (1) et (3) donne :

$$v = \frac{v_2 - v_1}{2} \quad (II.9)$$

si on pose $k = \frac{v_2}{v_1}$ on peut écrire :

$$\dot{W} = \frac{1}{4} \rho S v_1^2 (1+k)^2 (1-k) \quad (II.10)$$

Cette puissance admet une valeur maximale pour la valeur de k qui annule sa dérivée :

$$\frac{d\dot{W}}{dk} \Rightarrow 2(1+k)(1-k) - (1+k)^2 = 0$$

$$\text{Soit : } k = \frac{1}{3} \quad (II.11)$$

$$\text{Alors : } W_{max} = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad (II.12)$$

On a démontré que l'énergie récupérable dépend du rapport v_2 / v_1 et passe par un maximum lorsqu'il est égal à 1/3. Dans ces conditions ,l'énergie récupérable est égale aux 16/27 de l'énergie cinétique totale. Il n'est donc possible de récupérer, au mieux, que moins de 60 % de cette énergie, ce qui définit le rendement de Betz par rapport auquel on établit le rendement d'un capteur.

Les caractéristiques d'un capteur sont :

- sa puissance :

$$\dot{W} = C_p \frac{S \rho v^3}{2} \quad (II.13)$$

- sa poussée axiale :

$$P = C_f \frac{S \rho v^2}{2} \quad (II.14)$$

- son couple sur l'axe :

$$C = C_m \frac{R S \rho v^2}{2} \quad (II.15)$$

Avec S surface efficace de la roue $= \pi R^2$.

Les coefficients de puissance C_p , de poussée C_f et de couple C_m varient avec la forme du capteur et le paramètre de vitesse $\lambda = u/v$ (figure II.9).

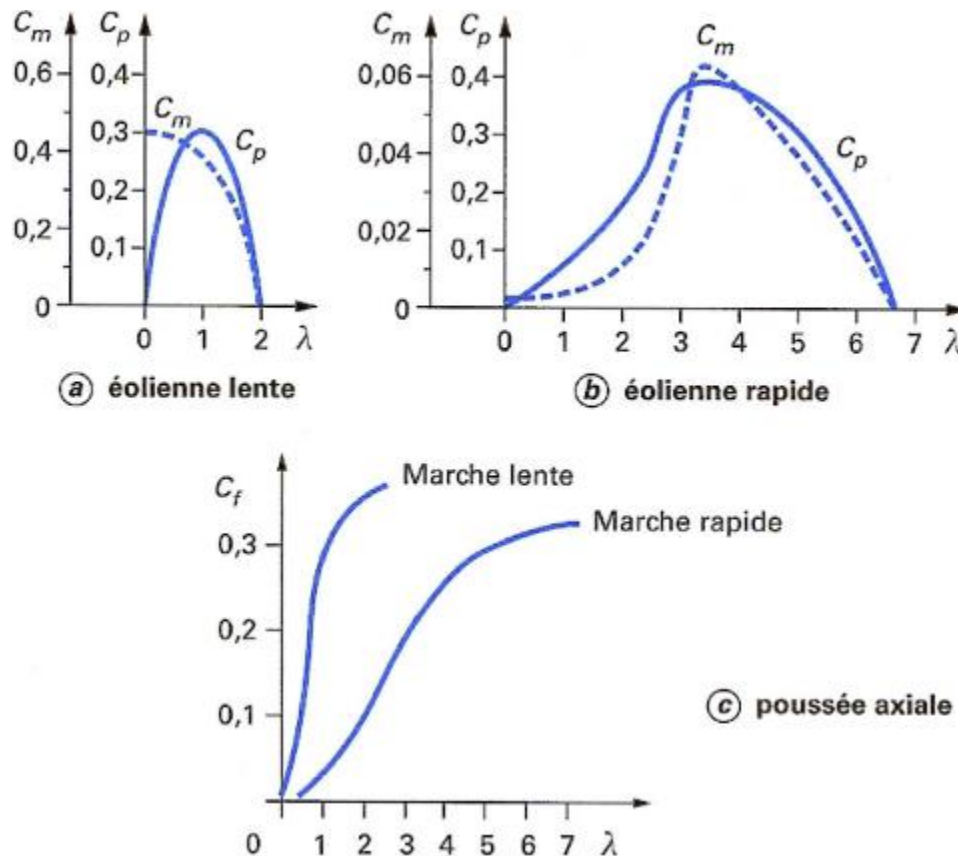


Figure (II.9): Coefficients de puissance C_p , de couple C_m et de poussée axiale C_f en fonction du λ paramètre de vitesse pour des éoliennes à axe horizontal .

II.4.1.3. Etude de l'action aérodynamique sur l'élément de pale:

Les pales sont constituées par de simples lames galbées dans le cas des capteurs à marche lente et par des hélices à profil d'ailes dans le cas de capteurs à marche rapide.

La finesse du profil C_z/C_x joue un rôle important. Elle doit être assez grande pour que la traînée n'absorbe pas une partie trop élevée du couple moteur. La théorie des hélices propulsives, ou celle des pales d'hélicoptères, est valable en tenant compte du changement de certains signes ; en effet, dans les éoliennes (figure II.10), on a la relation suivante[4] :

$$\varphi = i + \beta \quad (16)$$

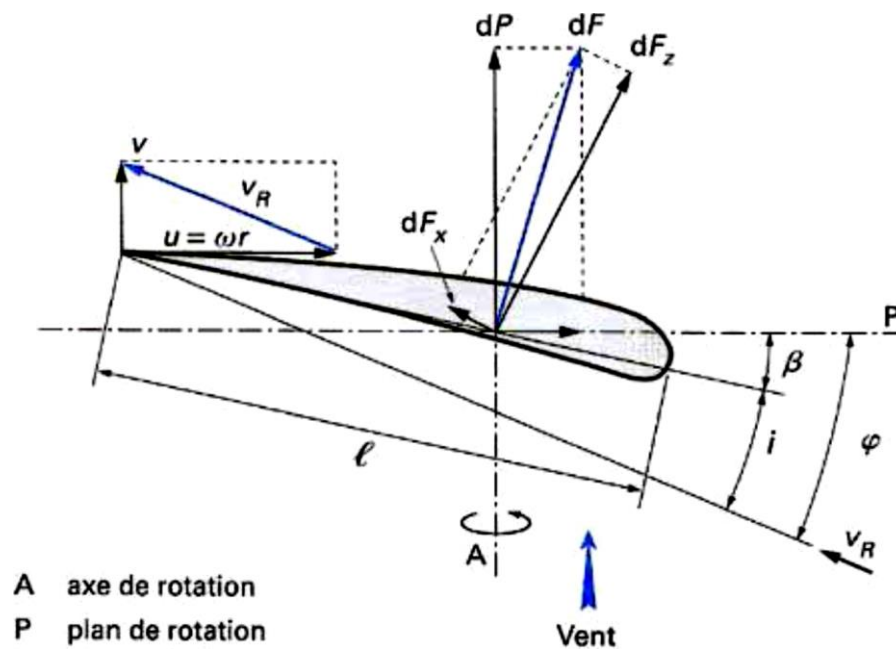


Figure (II.10): Caractéristiques d'un profil de pale d'éolienne.

La détermination des pales ne dépend pas uniquement de données aérodynamiques du profil mais aussi de celles de la résistance des matériaux (problème de fatigue).

Le profil étant choisi, donc la polaire connue, pour une section de pale située à la distance r de l'axe, on a :

$$C_z \ell n = \frac{r}{\lambda} \Lambda \quad (\text{II.17})$$

Avec Λ portance dont les différentes valeurs, en fonction du rapport λ , sont données dans la figure (II.11) .

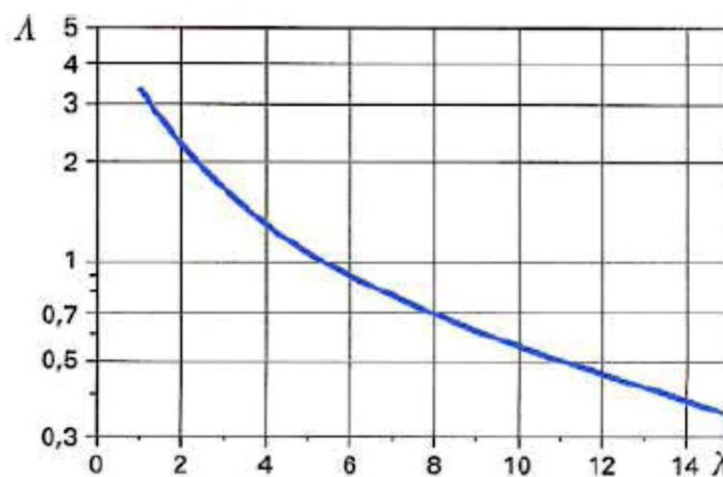


Figure (II.11):Évolution des profils le long d'une pale quelconque $\Lambda = f(\lambda)$.

Les courbes de la figure (II.11) permettent de déterminer l'évolution des profils le long d'une pale quelconque. Tous les points d'une même pale sont situés sur un même segment de droite passant par l'origine et par le point défini par le rayon de la pale et le rapport λ considéré (droite en tiretés). Si l'on prend le même profil, dans les mêmes conditions d'incidence i et de finesse, on obtient la longueur de la corde ℓ (figure II.9) de la section considérée. La portance Λ d'un élément de pale de longueur L est alors [4]:

$$\Lambda = C_z \rho \frac{v_R^2}{2} \ell L \quad (II.18)$$

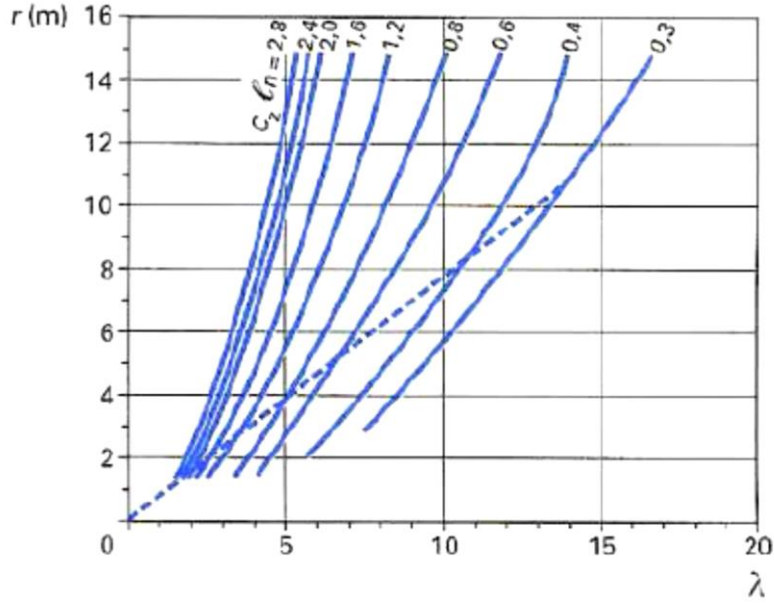


Figure (II.12): Évolution des profils le long d'une pale quelconque $r = f(\lambda)$.

Sur un élément dS de la pale, situé à la distance r de l'axe de rotation, s'exerce un effort de portance d'après la relation (II.4) :

$$dF_z = \frac{1}{2} C_{iz} \rho v_R^2 dS \quad (II.19)$$

et un effort de traînée d'après la relation (II.5) :

$$dF_x = \frac{1}{2} C_{ix} \rho v_R^2 dS \quad (II.20)$$

avec C_{ix} , C_{iz} coefficients de traînée et de portance de l'élément dS de pale, d'où le couple élémentaire par projection sur le plan de rotation :

$$dC = r(dF_z \sin \varphi - dF_x \cos \varphi) \quad (II.21)$$

$$dC = \frac{1}{2} r v_R^2 \rho dS (C_{iz} \sin \varphi - C_{ix} \cos \varphi) \quad (II.22)$$

et le couple total est obtenu par intégration.

De même, la poussée élémentaire dP par projection sur l'axe de rotation (figure II.9) est égale à :

$$dP = \frac{1}{2} v_R^2 \rho dS (C_{iz} \sin \varphi - C_{ix} \cos \varphi) \quad (II.23)$$

ce qui permet de calculer l'effort s'exerçant en tête de la structure de supportage.

II.4.2. Éoliennes à axe vertical:

afin de diminuer la vitesse de rotation de limiter le bruit et de capter le flux d'air dont la direction change de façon turbulente, on voit apparaître des petites éoliennes à axe vertical, de type Savonius, Darrieus ou H-type (comme sur la Figure II.12). Ces turbines tournent en moyenne 2 à 6 fois moins vite qu'une tripale classique avec le même rayon. Ce type de turbine est aussi quelquefois une réponse à la question de l'esthétique, sans doute essentielle pour obtenir l'adhésion des riverains, en particulier en site urbain[6].



Figure (II.13): Petites éoliennes à axe vertical.

Si les capteurs à axe vertical ont été probablement les premiers utilisés, par la suite ils ont été abandonnés au profit des précédents. C'est assez récemment qu'ils ont été redécouverts et ont fait l'objet de nouveaux développements qui en font des concurrents directs des capteurs à axe horizontal en présentant sur eux un certain nombre d'avantages. Les calculs de leurs caractéristiques se font à partir des mêmes relations (13), (14) et (15) que celles des capteurs à axe horizontal[4].

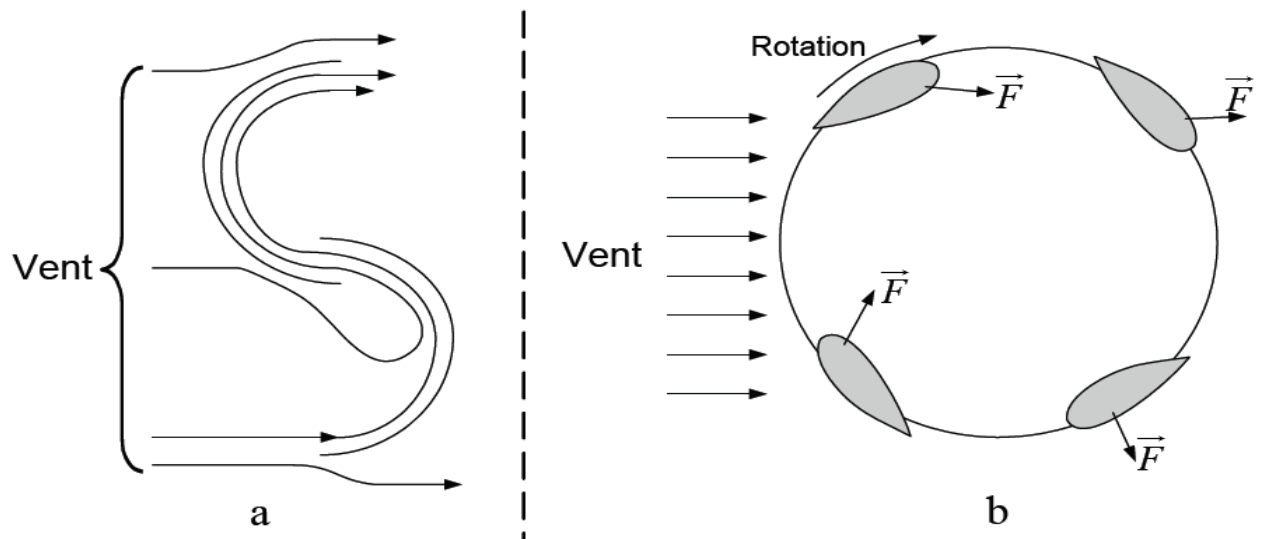


Figure (II.14): Principe du éolienne axe vertical et de l'incidence variable.

II.4.3. Comparaison des différents capteurs presents :

Du point de vue des performances, les rotors à marche lente et les rotors de Savonius sont sensiblement équivalents. Les rotors à marche rapide ont un coefficient de puissance C_p un peu supérieur à ceux des Darrieus, avec des paramètres de vitesse nettement plus élevés en général (figure II.19). Les coefficients de couple C_m sont assez voisins, un peu plus grands au démarrage pour les rotors à marche rapide, surtout ils sont constants, quelle que soit l'orientation des pales. Toutefois, si l'on a besoin d'un couple au démarrage élevé, il est nécessaire d'utiliser soit un rotor lent, soit un rotor de Savonius. De plus, ces rotors démarrent pour des vitesses de vent faible, surtout les rotors de Savonius.

Du point de vue construction, les rotors à axe vertical sont un peu plus simples : nul besoin d'orientation, supportage plus léger, organe de conversion au sol, dans le cas de générateur électrique aucun contact tournant.

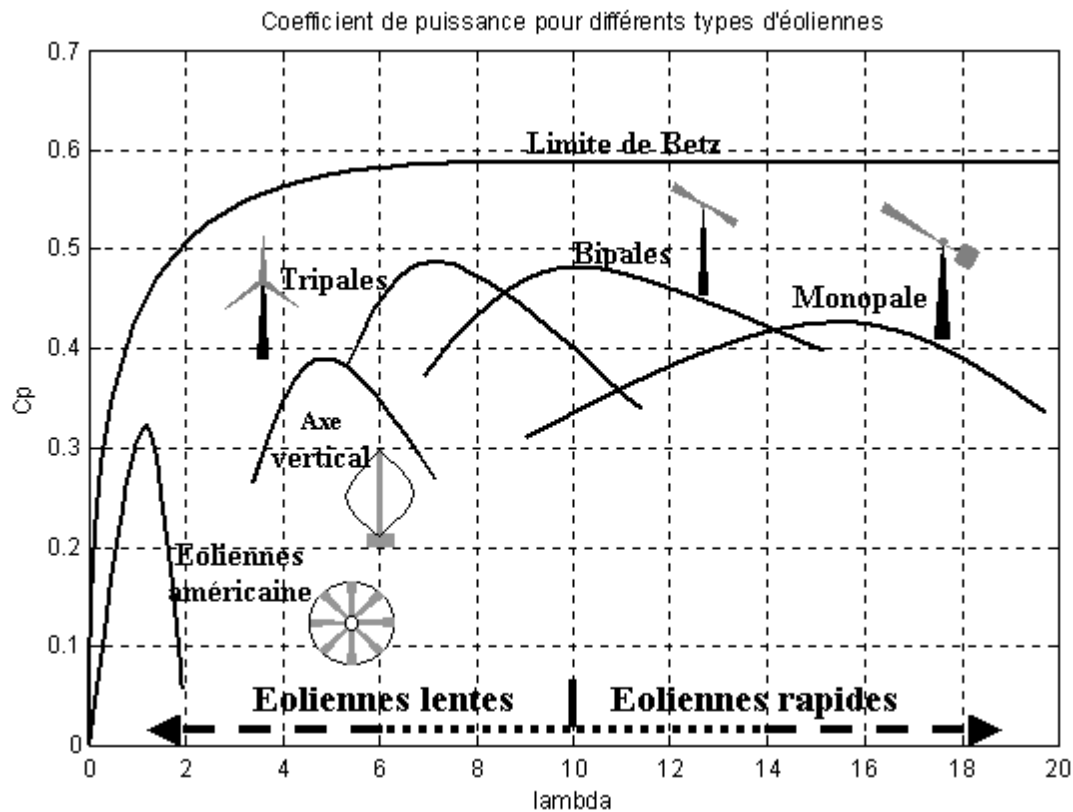


Figure II.15: Courbe limite de Betz et courbes caractéristiques des principaux rotors à axes vertical ou horizontal.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales, leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Figure II.14) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure II.14) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [8].

II.5. Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne:

II.5.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone:

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil

qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure (II.15)[9].

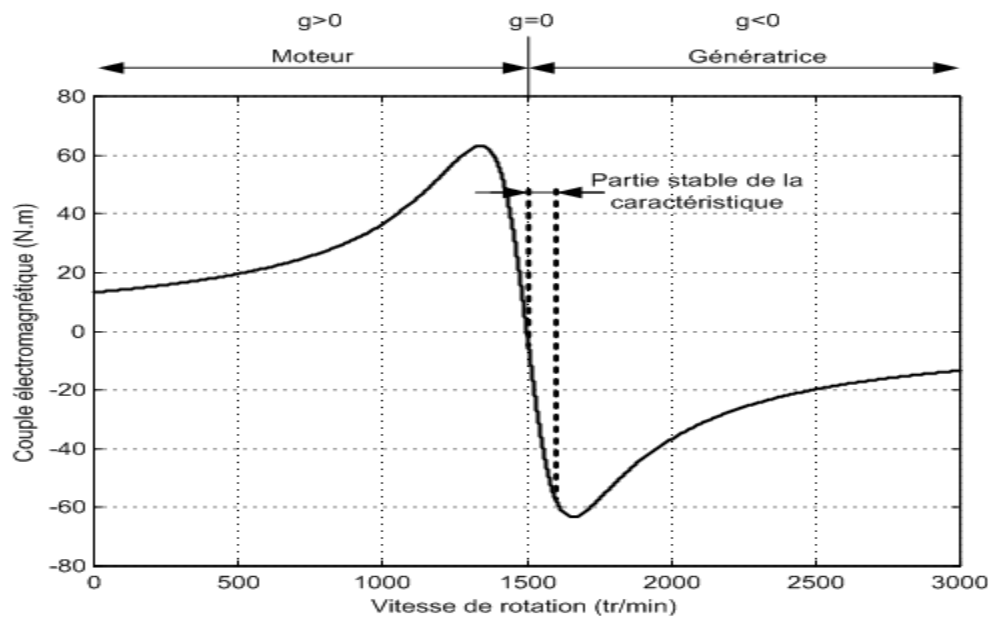


Figure II.16 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique cidessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure II.15). La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure (II.16) qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne[5].

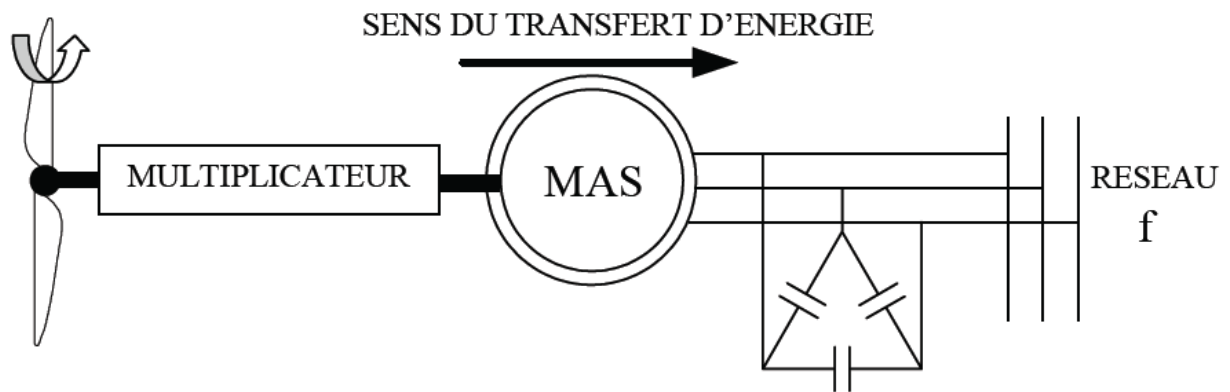


Figure II.17 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. Là où celles-ci sont le plus rapprochées les unes des autres. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations[5].

II.5.2. Systèmes utilisant la machine synchrone :

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [17], [18].

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.

Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner

une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [19].

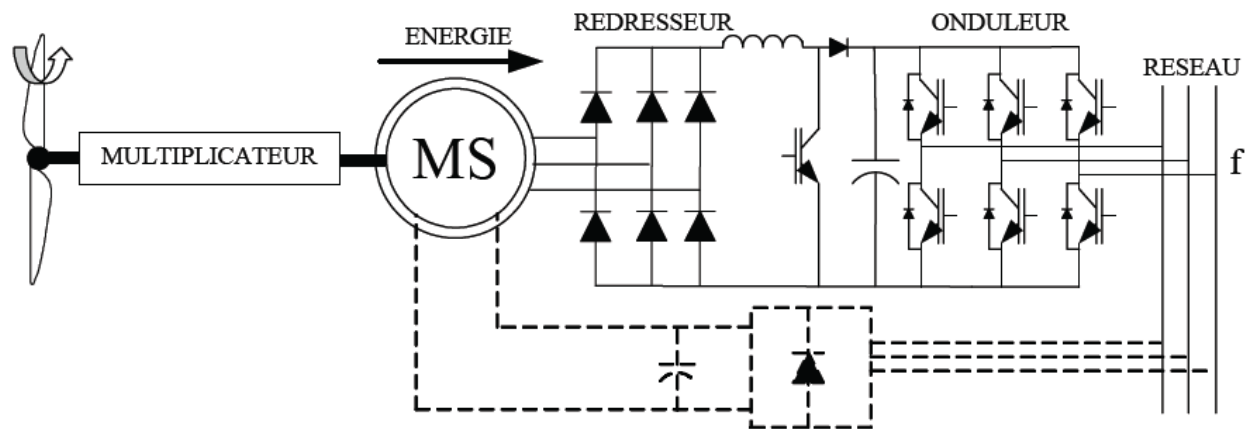


Figure II.18: Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI.

L'exemple de la Figure (II.17) [13] présente une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau. Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les dv/dt importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. Notons que l'utilisation de machines synchrones à faible vitesse (grand nombre de paire de pôles) permet de supprimer le multiplicateur de vitesse, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes mais l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent.

II.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une conclusion générale sur l'énergie éolienne et ses types mentionnés, où nous avons concentré sur le type d'axe horizontal, car il fait l'objet de notre expérience et le meilleur pour la production d'énergie électrique nous avons mentionné une chose plus importante dans ce chapitre, C'est la théorie de Batz.

Pour préserver la production d'énergie électrique et pour une utilisation en l'absence de vent, ce qui est ce que nous parlerons au troisième chapitre.

Chapitre III Généralité sur le système du stockage de batterie.

III.1.Introduction :

Dans le contexte de ressources fossiles épuisables et la volonté de diminuer nos émissions de gaz à effet de serre avec le recours aux énergies renouvelables, le stockage de l'énergie devient un élément incontournable pour assurer la bonne gestion des ressources disponibles. Mais où faut-il stocker l'énergie ?.

Sur un site isolé du réseau électrique, la nécessité du stockage de l'énergie s'impose si l'on veut pouvoir disposer d'électricité même si la production est nulle ; par exemple dans le cas d'une éolienne en l'absence de vent ou de panneau photovoltaïque la nuit.

Le stockage au niveau des sites de production, à partir des ressources renouvelables très fluctuantes (vent, soleil), permettrait une meilleure gestion du réseau. Au niveau des consommateurs raccordés au réseau, le stockage permettrait d'assurer la continuité en cas de coupure ainsi qu'un meilleur dimensionnement des installations.

III.2. Le stockage de l'énergie :

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'opération de stockage d'énergie est toujours associée à l'opération inverse consistant à récupérer l'énergie stockée (le déstockage). Ces deux opérations de stockage/déstockage constituent un cycle.

III.3. Les technologies de stockage électrochimique existantes:

Aujourd'hui, que ce soit dans des systèmes embarqués ou stationnaires, il est nécessaire de pouvoir stocker de grandes quantités d'énergie électrique. Du côté des applications embarquées, on pense principalement au domaine des transports avec le développement des véhicules hybrides ou totalement électriques. Quant aux applications stationnaires actuelles, le stockage est utilisé principalement dans un but de protection pour prendre le relais en cas de panne du réseau électrique ou encore comme rôle de soutien dans les sources électriques intermittentes telles que l'éolien ou le solaire pour les sites isolés.

L'électricité ne pouvant pas être stockée directement – à part dans des condensateurs ou dans des inductances- dans de grandes quantités pour des coûts raisonnables, il convient d'en faire la conversion en une autre forme d'énergie aisément stockable.

On peut citer quelques méthodes de stockage parmi les plus répandues et les plus efficaces. Le stockage mécanique peut se présenter sous la forme d'un stockage d'énergie potentielle ou cinétique. Le premier est exploité en hydraulique avec les barrages et le pompage d'eau vers des hauteurs ou encore avec des systèmes à air comprimé, le second dans les volants d'inerties. Le stockage peut aussi se faire sous forme thermique. L'élévation de température d'un matériau permet un stockage par chaleur sensible et la quantité d'énergie stockée ne dépend que de la quantité de matériau, de sa capacité thermique et de l'élévation de température. Pour des différences de températures plus faibles, il est aussi possible d'exploiter les changements de phases du matériau de stockage. Le stockage par voie chimique est

souvent associé au domaine des transports, mais reste performant pour du stockage stationnaire. L'utilisation du stockage électrochimique dans les batteries est ce qui va nous intéresser. Le stockage électrochimique présente de fortes contraintes pour stocker de grandes quantités d'énergie dans le domaine des applications embarquées - les éléments sont chers et lourds – mais il trouve une utilisation avantageuse dans le domaine de l'électronique portable et du petit électroménager. Il présente tout de même un fort regain d'intérêt pour les véhicules ne produisant pas de gaz à effet de serre. L'objet de cette thèse portant sur les batteries, on s'attachera dans un premier temps à décrire les principales technologies existantes de batteries. On distinguera particulièrement les batteries dites Plomb Acide, Nickel Cadmium (NiCd), Nickel Métal Hydride (NiMH) et Lithium Ion.

Les batteries au plomb sont connues depuis 150 ans, inventées en 1859 par le français Gaston Planté. Elles sont largement utilisées dans l'industrie et dans l'automobile, notamment parce qu'elles sont peu chères par rapport aux autres technologies. De plus, malgré des performances moins avantageuses en termes de densité d'énergie massique ou volumique, elles autorisent de forts courants de décharge, ce qui explique leur utilisation pour le démarrage des voitures. En contrepartie, le plomb qui fait parti des éléments qui composent ces batteries est extrêmement toxique. Cela impose un recyclage sous peine de voir le polluant se disperser dans l'environnement.

Les batteries Nickel Cadmium autorisent de forts courants de décharge et un nombre de cycles élevés. Par contre elles présentent une grande sensibilité à l'effet mémoire et de plus le cadmium est très polluant. Elles ont longtemps été utilisées pour alimenter les appareils portatifs, mais sont actuellement remplacées par les chimies NiMH ou Li-Ion.

La chimie NiMH n'est constituée ni de plomb, ni de cadmium, ce qui en fait un accumulateur peu polluant. De plus elle présente une énergie massique 40% supérieure au NiCd, mais possède une forte autodécharge et une sensibilité à l'effet mémoire.

Enfin, apparu commercialement dans les années 1990, la technologie Lithium Ion offre actuellement les meilleures perspectives en termes d'énergie spécifique (W.h/kg) et densité d'énergie stockée (W.h/l). En plus de ces performances de stockage, le Li-Ion est insensible à l'effet mémoire. Cependant, des problèmes de sécurité demeurent selon les technologies Li-Ion envisagées, on pense notamment à la possibilité qu'ont les cellules de s'enflammer en cas de surcharge [20] .

Le tableau suivant récapitule les principales caractéristiques de chaque technologie.

Type	Lead-acid battery	NiCad battery	NiMH battery	LiCoO ₂ battery	LiMn ₂ O ₄ battery	LiFePO ₄ battery
Nominal Operating Voltage	2V	1.2V	1.2V	3.7V	3.7V	3.3V
Patent protection	No	No	No	No	No	Yes
Security	Good	Good	Good	Bad	Middle	Good
Green product	No	No	Yes	Yes	Yes	Yes
Memory effect	No	Yes	Yes	No	No	No
Energy efficiency	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Cycle life	400	500	500	>500	>500	>2000
Charge time	8Hours	1.5 Hours	4 Hours	2-4 Hours	2-4 Hours	<2 Hours
Self discharge	20%/Month	30%/Month	35%/Month	10%/Month	10%/Month	8%/Month

Tableau III.1 : Principales caractéristiques des différentes technologies d'accumulateurs[20].

Les énergies massiques et volumiques dépendent de la chimie de l'accumulateur, mais aussi des techniques de fabrication. C'est pourquoi elles peuvent varier du simple au double. Il est donc intéressant de visualiser ces grandeurs sur un schéma dédié (ce figure ci-dessous).

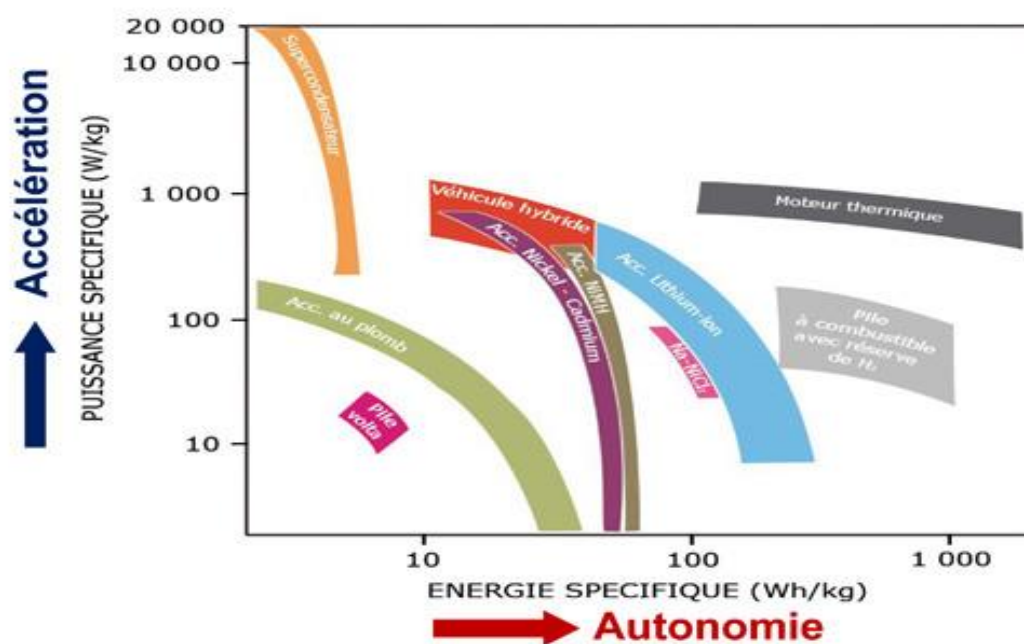


Figure III.1 : Comparaison des énergies et puissances spécifiques de différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques[22] .

Diagramme de RAGONE permettant de comparer les performances énergétiques de différents systèmes. Dans le cadre de la propulsion des véhicules automobiles, force est de constater que les modèles les plus performants ont des performances encore très inférieures à celles des moteurs à essence (moteurs thermiques)[22].

Les densités pratiques d'énergie et de puissance des technologies de batteries les plus courantes disponibles commercialement sont représentées sur la *Figure (III.1)* et leurs caractéristiques générales sont données dans le Tableau (III.2).

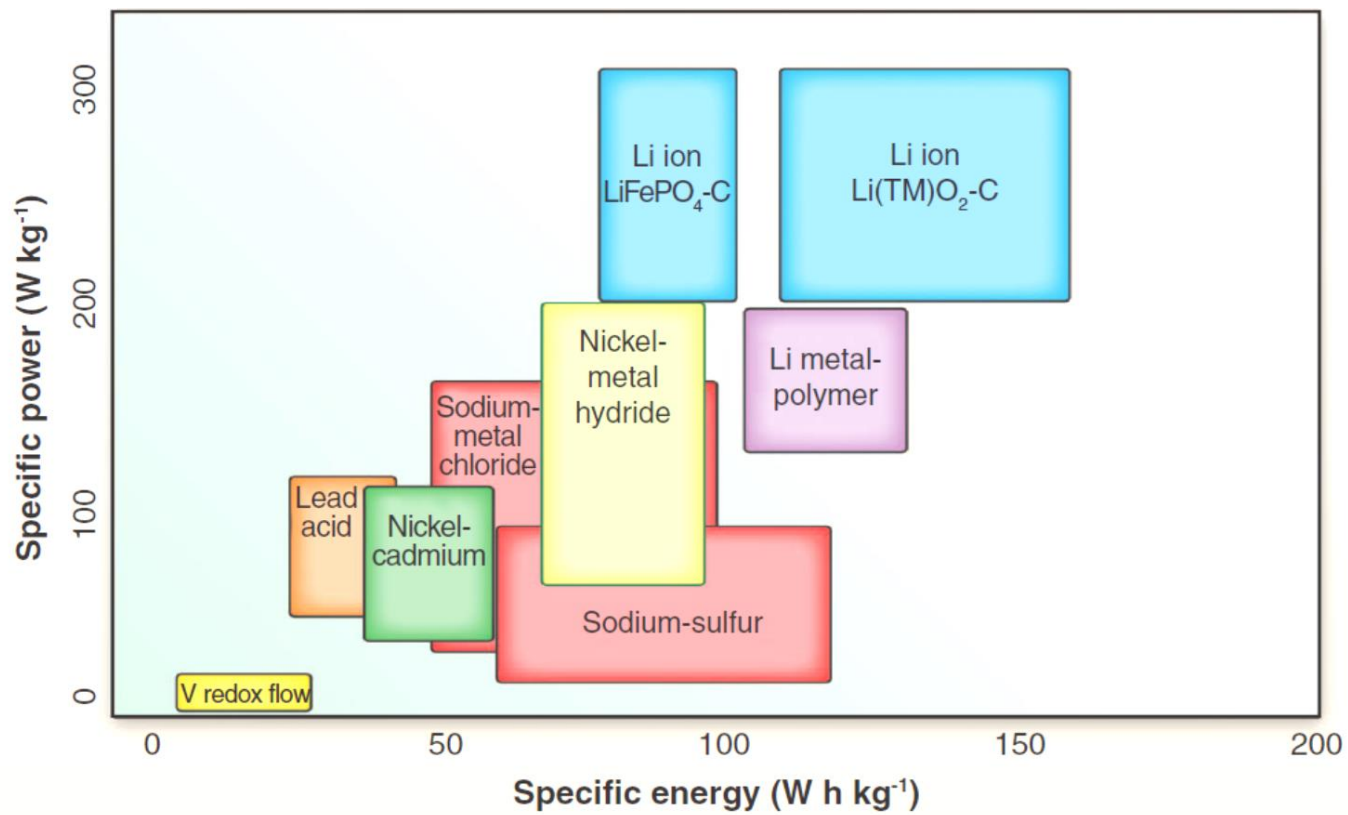


Figure III.2: Densité d'énergie et de puissance massique de différentes batteries rechargeables [23].

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion LFP	Li-ion LMO	Li-ion polymère
Tension nom. (V)	2,1	1,2	1,2	3,25	3,6	3,7
Énergie spécifique (Wh/kg)	30-40	45-60	60-75	120-140	150-190	150-190
Énergie volumique (Wh/L)	60-100	80-150	220-330	190-220	220-330	220-330
Puissance spécifique (W/kg) <i>en pointe</i>	180 700	150	250 1000		450 1500	
Rendement	70-90%	80%	70%		90%	90%
Auto-décharge (/mois)	5%	20%	20%	5%	5%	5%
Température de fonct.	-20 à 60°C	-40 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	-20 à 60°C	0 à 60°C
Nombre de cycles	500-1200	2000	1500	>2000	1200	500-1000
Coûts (€/kWh)	50-150	250-400	300-700	700- 1400	800-2000	1500- 2000

Tableau III.2: Caractéristiques pratiques des technologies de batteries commercialisées les plus courantes [24].

Les batteries Li-ion présentent les énergies spécifiques les plus élevées (jusqu'à 190 Wh/kg) avec des tensions nominales supérieures à 3 V contre 1,2 V pour les batteries Ni-Cd et Ni-MH. Ces dernières rivalisent cependant avec les batteries Li-ion en termes de densité d'énergie volumique. Les batteries Ni-MH ont l'inconvénient de s'auto-décharger rapidement, mais sont très peu toxiques et ne posent pas de problème de sécurité majeur.

En revanche, l'utilisation des batteries Li-ion, avec cathodes à base d'oxydes de cobalt, imposent des contraintes de sécurité importantes liées à une faible stabilité thermique. Le coût des batteries Li-ion est par ailleurs plus élevé que les autres technologies.

III.4.1'accumulateur électrochimique :

est un système qui convertit de l'énergie chimique en énergie électrique . Les accumulateurs et piles électrochimiques permettent de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome. Leur utilisation est très répandue et en plein essor, notamment avec le développement du véhicule électrique [22].

Le problème de ces éléments énergétiques est de réussir à les maintenir en état le plus longtemps possible bien qu'ils soient le siège de nombreux phénomènes électrochimiques non linéaires et qu'ils subissent une altération de leurs performances au cours du temps et des utilisations.

C'est pourquoi est apparu la notion de *batterie intelligente*, ce terme résumant les mécanismes mis en œuvre autour de la batterie pour en améliorer et estimer la confiance de cette source d'énergie .

Dans ce chapitre nous nous proposons d'étudier les accumulateurs électrochimiques et plus particulièrement la batterie plomb étanche, l'objectif étant de créer une base de connaissances sur ce type d'accumulateur et permettre une analyse pertinente de ses performances.

III.4.1.Principe :

Les accumulateurs sont constitués de deux électrodes, l'une positive (la cathode) et l'autre négative (l'anode) séparée par un électrolyte (figure III.3). Aux deux interfaces interviennent des réactions électrochimiques d'oxydation ou de réduction des matières actives des électrodes. On désigne par cellule deux électrodes plongées dans un électrolyte.

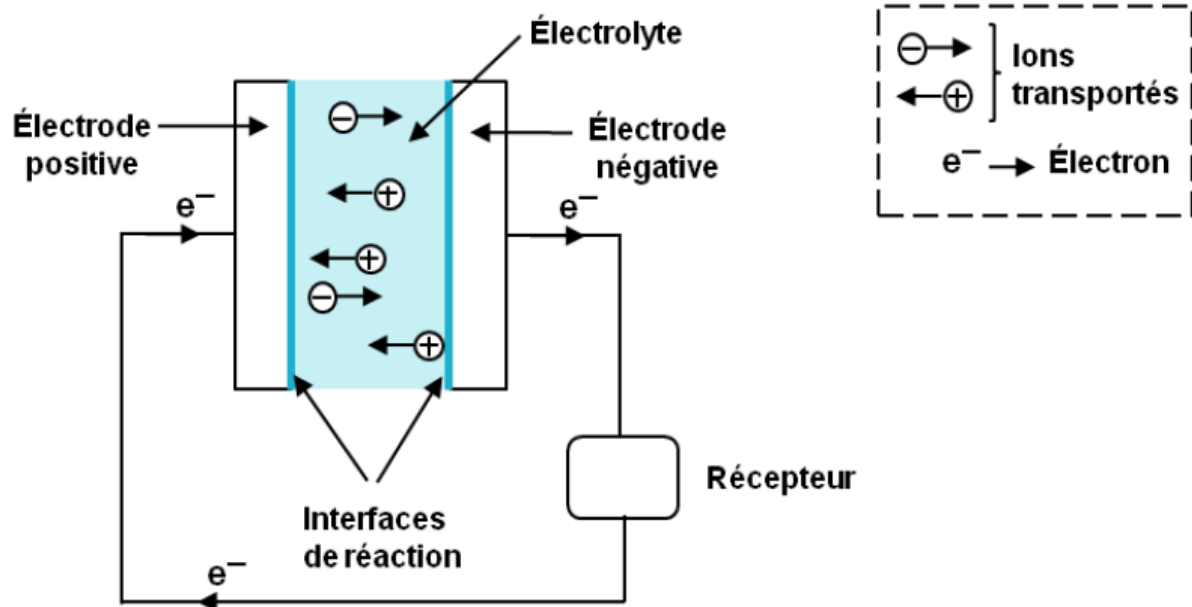


Figure III.3: Principe d'un accumulateur électrochimique.

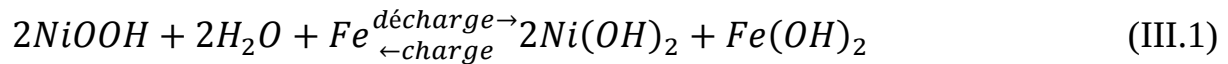
À l'anode, électrode négative en décharge, s'opère une réaction d'oxydation selon la Relation $M_1 \rightarrow M_1^{n+} + ne^-$ de potentiel rédox E_1 , M_1 étant l'espèce active de l'anode. Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre finalement la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction $M_2^{n+} + 2e^- \rightarrow M_2$, de potentiel redox E_2 , M_2 étant l'espèce active de la cathode. L'électrolyte assure le transport des espèces ioniques mises en jeu dans la réaction globale d'oxydoréduction, qui s'écrit $M_1 + M_2^{n+} \rightarrow M_2 + M_1^{n+}$. Le transport engendre une force électromotrice $E = E_2 - E_1$.

Les différentes familles d'accumulateurs sont passées en revue ci-après[25].

III.4.2. Les différents accumulateurs électrochimiques :

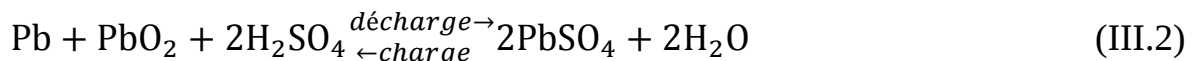
III.4.2.1. Les accumulateurs Nickel-Fer (Ni-Fe) :

Ce type d'accumulateur a été développé par EDISON en 1901 et fût l'accumulateur le plus répen du jusqu'en 1920. Les réactions électrochimiques sont limitées par les deux électrons de réduction du fer et peuvent être décrites par[26] :



III.4.2.2. Les accumulateurs au plomb (Pb-PbO₂) :

C'est l'accumulateur le plus utilisé par l'industrie, du fait de son rapport coût/prix de revient. La forme plomb-ouvert est presque abandonnée du fait des normes de sécurité très contraignantes [CEI896] qui oblige à posséder un local spécifique pour les batteries répondant aux normes de l'industrie chimique (sale d'eau, système anti-incendie, protection contre les dégagements d'hydrogène et oxygène). Elle est désormais remplacée par les batteries plomb étanches à électrolyte gélifié. Ces batteries ne dégagent pratiquement plus de mélange gazeux explosif et n'offrent pas de risque de contact avec l'acide. Elles peuvent être directement installées dans les équipements[27,28].



Si ce type d'accumulateur n'est pas correctement recyclé, il pose le problème de rejet de métaux lourds dans l'environnement (rejet autorisé de $[Pb^{+2}] < 1\text{ppm}$).

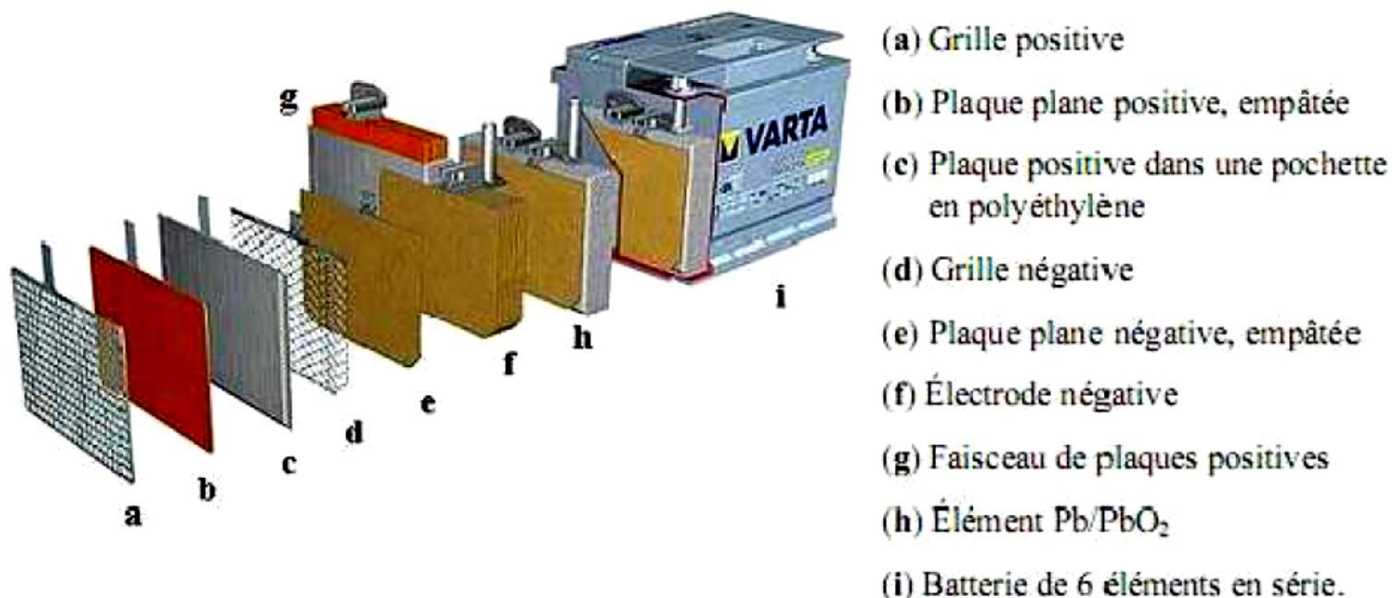
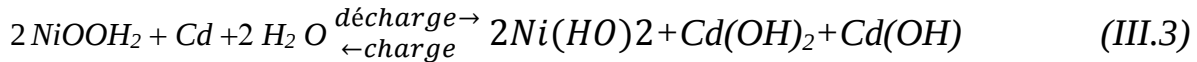


Figure III.4: Batterie au plomb.

III.4.2.3. Les accumulateurs Nickel-Cadmium (Ni-Cd):

Ils offrent des performances supérieures au plomb en terme de capacité et durée de vie. Ils demandent cependant une alimentation de charge très propre et leur prix est nettement plus élevé que les batteries plomb (environ 1,5 fois).



Comme le plomb, la concentration maximale autorisée dans les rejets est très inférieure à 1ppm en Europe.

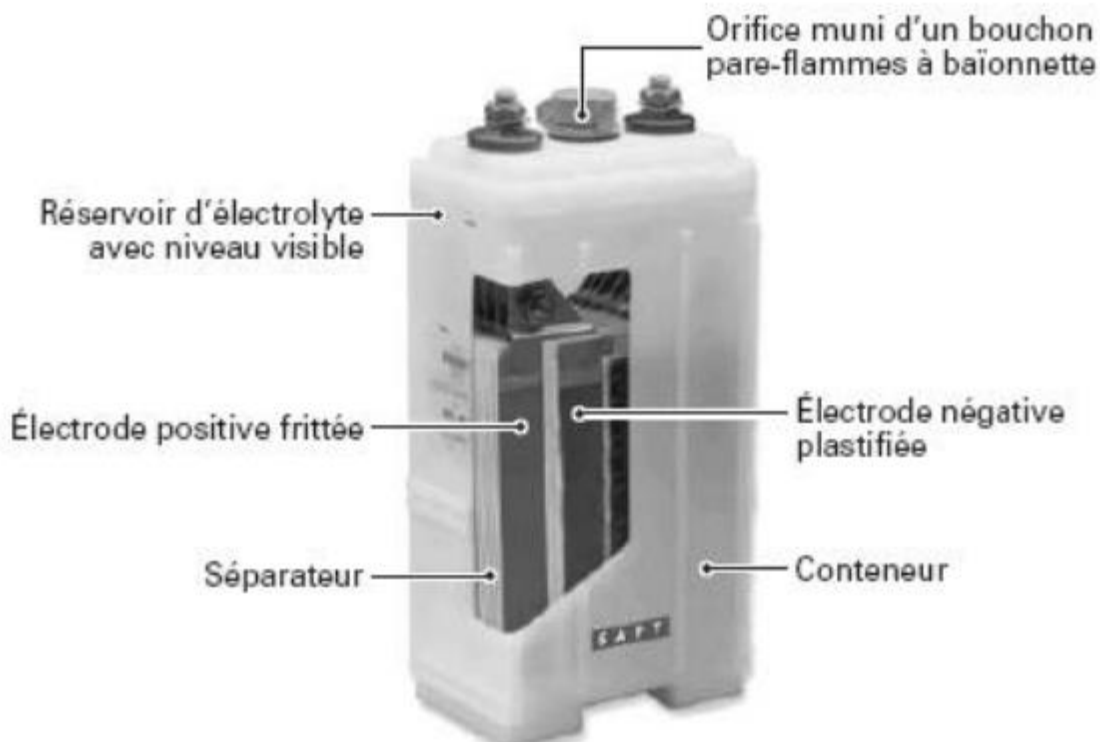


Figure III.5: Vue éclatée d'une batterie nickel-cadmium Ni-Cd industrielle [Robert et Alzieu 2005].

III.4.2.4. Les accumulateurs Nickel Hydrogène (Ni-H2):

Depuis 1964, les piles H₂/O₂ sont couramment utilisées dans les applications spatiales (satellite et navette). Sur les satellites, ils servent d'accumulateur pour stocker le surplus d'électricité fourni par des panneaux solaires pour le restituer lors des éclipses (grand nombre de cycles).

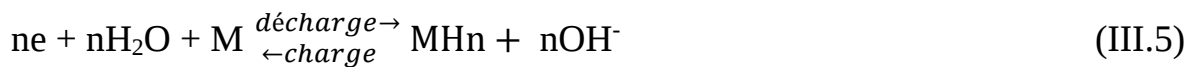
Cet accumulateur est très supérieur au Ni-Cd car il offre une très grande résistance au cyclage (plus de 10000 cycles avec des décharges à 40% de la capacité). Les ions actifs pour les échanges sont les ions hydrogène H⁺ et l'électrode positive est à base d'hydroxyde de nickel, analogue à celle utilisée dans les accumulateurs NiCd. Durant la décharge, l'hydrogène se recombine en eau avec l'oxygène de l'hydroxyde de nickel. Mais durant la recharge, il se produit un fort dégagement d'hydrogène sous forme gazeuse et la pression à l'intérieur de la

batterie peut atteindre 70 bars, d'où son allure de bonbonne de gaz. Ce type d'accumulateur conserve de bonnes caractéristiques à basse température (encore 400Wh/kg à -18°C avec un nombre de cycle jusqu'à 30000). Certains modèles sont capables de fournir 500Wh/Kg pour des démarrages d'avions à réaction[29].



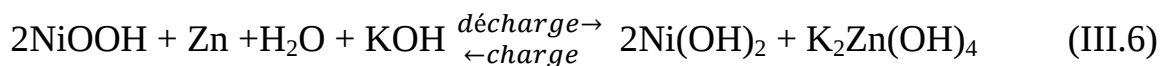
III.4.2.5. Les accumulateurs Nickel-Metal-Hybride (Ni-MH):

Ils sont une forme dérivée des batteries Nickel-Hydrogène. La batterie Ni-MH recombine les gaz comme l'hydrogène sur des alliages métalliques pour former des oxydes. Ils offrent des performances encore supérieures au Ni-Cd (capacité environ 1,8 fois supérieure) mais son prix est encore dissuasif pour les applications industrielles habituelles [29].



III.4.2.6. Les accumulateurs Nickel-Zinc (Ni-Zn) :

Ce couple à l'avantage d'être moins coûteux que le Ni-Cd et d'avoir une tension d'utilisation 25% plus élevée. En revanche, son plus gros défaut est une mauvaise résistance au cyclage¹ (environ 600 à 1000 cycles)[8].



III.4.2.7. Les accumulateurs Sodium-Soufre (Na-S):

Il est très intéressant de par son énergie massique d'environ 100 Wh/kg, mais en fonctionnement il génère des températures de 325 à 1000°C, difficilement compatible avec le sodium qui est hautement inflammable.



x entre 5 et 2 suivant l'état de charge.

III.4.2.8. Les accumulateurs à négative de lithium (LiNiO2):

Ils fournissent une tension élevée par cellule (3,9V), mais sont très coûteux et réservés aux applications militaires ou miniatures. L'utilisation du lithium semble limitée et le nombre de cycle est compris entre 100 et 150.

III.4.2.9. Les accumulateurs Zinc-halogènes :

Les avantages des électrodes en nickel sont un coût relativement faible, sa légèreté et produit potentiel élevé. Pour améliorer le cycle de vie de ce type d'accumulateur, des études ont conduit au remplacement de l'électrolyte alcalin par une solution acide. Les couples les plus prometteurs sont Zinc-Chlore (Zn-Cl₂) et Zinc-Brome (Zn-Br₂). Ce dernier donne une FEM

de 1,9V. Ce type de pile est adapté au régime de décharge soutenu sur un faible intervalle de temps[28].

III.4.2.10. Les piles à combustibles :

On parle de pile à combustible lorsqu'il y a consommation d'un élément (d'une ou des deux électrodes), ce qui rend le phénomène irréversible (électrode comburante et combustible). La charge de la pile est réalisée en remplaçant les éléments usés (électrode comburante) et le combustible. Il est cependant possible de remplacer une ou les deux électrodes par des gaz. Les électrodes sont alors composées d'alliage inattaquable plongé dans l'électrolyte.

Ce sont des concurrents sérieux pour les accumulateurs où la recharge s'effectue par inversion des phénomènes électrochimiques. A l'origine, ce sont des applications militaires. Elles remplacent les groupes électrogènes par des groupes ne laissant pas de signature thermique ou sonore. Des recherches sont en cours en vue de l'adapter au véhicule électrique. Ce sont soit des piles à combustible, soit des générateurs à recharge mécanique (Zn air ou Al-air).

Le gros avantage des piles à combustible est leur rendement énergétique élevé : 40 à 45% de l'énergie est transformée en électricité contre 30% pour un diesel ou turbine à gaz, 35% pour les centrales thermiques. Le système est également silencieux [30].

Remarque : Dans la dénomination de leur couple électrochimique, le suffixe air indique que l'on consomme à une électrode un gaz contenu dans l'air (oxygène) l'électrolyte est fixé sur une matrice poreuse pour éviter qu'il n'envahisse les pores des électrodes.

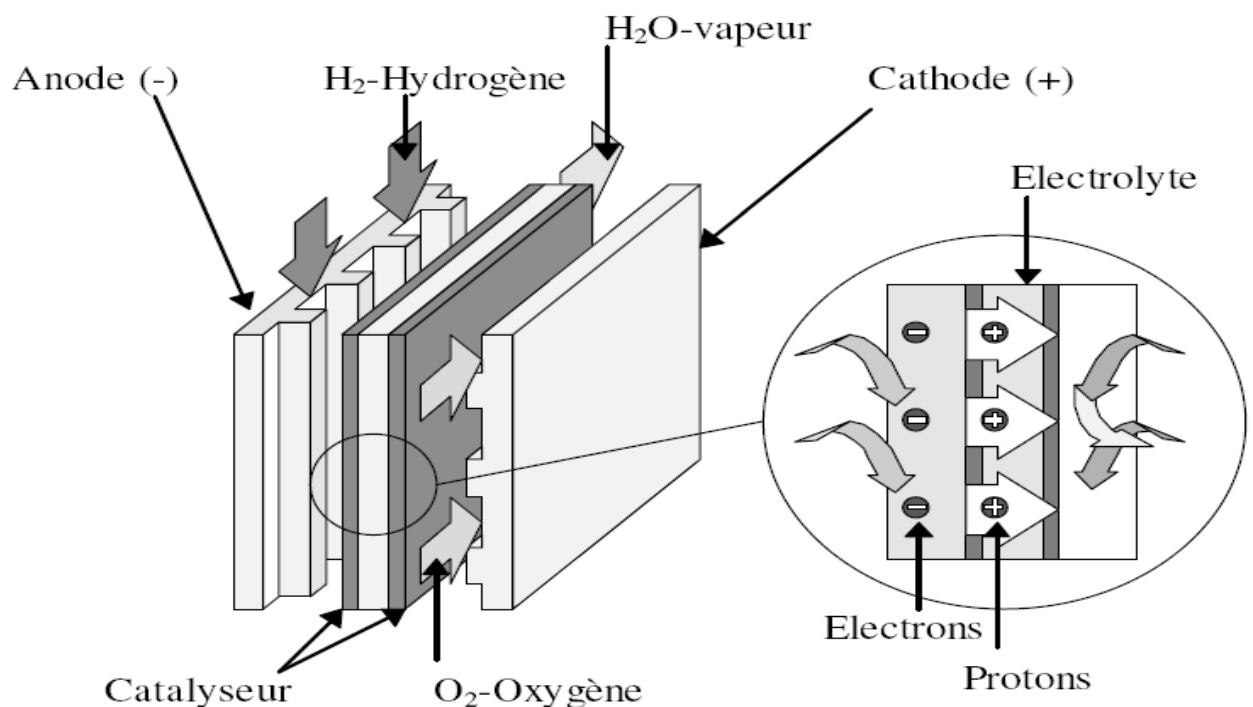


Figure III.6: « Principe du générateur H₂-air » d'après.

III.5. Les phénomènes de vieillissement :

La durée de vie d'un accumulateur est atteinte lorsque sa capacité potentielle est tombée à 80% de sa capacité nominale. La raison de cette perte de capacité est la lente altération des divers éléments composant l'accumulateur et plus particulièrement les électrodes et l'électrolyte [32].

La diminution de la surface des électrodes par modification de la répartition de la matière active (déformation, apparition de précipité) qui affaiblit également la porosité de l'électrode. L'inaccessibilité des matériaux actifs et aggravée par la sulfatation de l'électrode.

III.5.1. La sulfatation de l'électrode négative :

Ce phénomène, qui apparaît principalement sur l'électrode négative, traduit l'apparition de sulfate de plomb résiduel qui n'est plus consommé lors des réactions chimiques [33]. Son origine peut être la stratification de l'électrolyte conduisant à une augmentation de la densité d'acide, le déplacement de la matière active, la faible tension de la grille négative consécutive du cycle de l'oxygène. Ses conséquences sont la création d'une couche isolante électrique et moins poreuse aux ions qui freine la diffusion de l'acide. La matière active devient moins accessible et la capacité récupérable diminue.

La sulfatation peut être fortement augmentée par une élévation de température à la plaque négative (oxydation de la surface par le cycle de l'oxygène qui dégage de la chaleur).

III.5.2. La corrosion de l'électrode positive :

Toutes les batteries plomb ont une durée de vie finie à cause de la corrosion des grilles positives, particulièrement dans les applications où elles sont en floating [31, 32]. La grille positive et la zone conductrice est le support pour la matière positive. Sa corrosion augmente la résistance électrique de la grille (de 5 à 30%) et une augmentation de son volume, qui associés à une modification de la distribution de matière active, conduit à une perte du contact électrique avec le gel. L'augmentation de la masse de la grille positive ou la diminution de sa corrosion augmente la durée de vie de la batterie. La grille négative n'est pas sujette à la corrosion.

III.6. Conclusion :

Ce chapitre était un aperçu du système de stockage électrochimique de Batterie et ses types. Chaque type a des caractéristiques, mais le système d'étude a besoin de la batterie solaire, qui est plus sophistiquée, a la capacité de charger et décharger plusieurs fois et résister la température.

***Chapitre IV expérimentale d'un système
hybride photovoltaïque-éolien avec des
batteries de stockage.***

IV.1. Introduction:

Pour de très nombreuses applications d'intérêt sensible et stratégique comme les relais de télécommunication, les postes frontières, l'habitat isolé, les dispensaires, etc., hors réseau d'électricité conventionnelle, la disponibilité permanente de la source primaire d'énergie est vitale et conditionne dans une très large mesure, la fiabilité des installations et leur fonctionnement permanent.

Les solutions technologiques classiques apportées par le stockage électrochimique conventionnel sont onéreuses, limitées techniquement en puissance et restreintes en capacité.

Celles apportées par les groupes électrogènes, de part la nécessité d'approvisionnement en carburant et celle de leur maintenance, présentent des inconvénients liés le bruit, la pollution et surtout leur mauvais rendement à charge partielle. Les nouvelles solutions technologiques, apportées par les systèmes hybrides, même si elles ne sont pas encore économique compétitives, offrent par contre une sûreté élevée. Toutefois, à la vue de la nécessité du développement durable, ces solutions, avec l'appui de la volonté publique, peuvent être économiquement viables, à moyen et long terme.

L'objectif de notre travail est de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides (éolien – photovoltaïque).

Pour cette raison, on présente une méthode de dimensionnement optimal d'un système hybride de production d'électricité de dimensions réalistes, alimentant un habitat individuel. Pour des niveaux de fiabilité fixés, on détermine, par un travail de simulation, les dimensions optimales des différents composants du système, permettant la minimisation du coût.

IV.2. Descriptions des composantes du système hybride photovoltaïque-éolien:

Dans le cadre de nos travaux de recherche, nous avons choisi une architecture combinant les avantages de ces deux solutions. Elle est à la fois couplée au associée à un dispositif de stockage de l'énergie. On a alors les avantages :

- exploitation du système même si le réseau est défaillant .
- sécurité d'approvisionnement quelles que soient les conditions météorologiques.

Il présente en somme le double avantage de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables et d'une sécurité d'approvisionnement maximale.

Afin d'atténuer le caractère aléatoire d'un gisement d'énergie renouvelable donné, on peut multiplier les sources de natures différentes. On obtient alors un système dit multi-sources.

Notre système de production est appelé système hybride éolien et photovoltaïque couplé au muni d'un stockage.

la figure suivante montre un synoptique de l'installation (Figure. IV.1).



Figure IV.1: Synoptique de l'installation expérimentale - Système de production hybride éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un stockage de l'énergie.

Les chaînes de production se composent de :

- 5.8 m² de panneaux photovoltaïques (1 kW crêtes, 4 panneaux et Module Polycristallin 250Wc) connectés au bus continu à travers convertisseur à pilotage MPPT 100/30 - 12/24(Tension PV maximale de circuit et Ouvert 100V ,Courant de batterie maximal 30A) .
- éolienne de 200 / 1000W à 12 m/s / 120Vdc, Protection contre les surtensions "Furling", Aérogénérateur 3 pales 2,7m de diamètre, elles sont reliées au bus continu à travers un redresseur à diodes pour la première et un redresseur à diodes suivi d'un hacheur série pour la seconde.
- Dans le travail expérimental, nous avons 4 batteries avec puissance 12 V et une puissance de 100W de type plomb Nous relions les batteries en double voie. C'est-à-dire nous avons deux séries chacun composé de deux batteries, ce qui est-ce que la tension augmente la tension à 24 volts. Puis nous avons fait les deux chaînes en parallèle, ce qui augmentait la capacité de 520 AH.

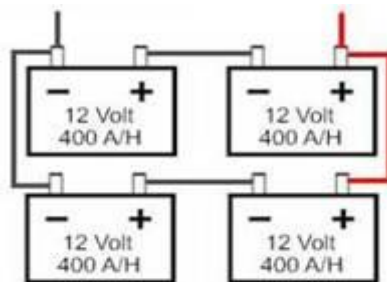


Figure IV.2: assemblage batteries (série/parallèle).

Le système de stockage est dimensionné, comme on l'a vu précédemment, par sa capacité de stockage, mais pas seulement. Il doit en effet également répondre aux critères suivants :

- puissance crête déterminée .
- cyclabilité élevée .
- bon rendement en charge et en décharge dans la gamme de puissance en production et en consommation .
- pertes d'auto-décharges faibles ;
- coûts réduits.

Le système est largement instrumenté, des capteurs nous permettent d'obtenir les conditions météo :

- vitesse du vent .
- ensoleillement dans le plan horizontal .
- température ambiante .
- ensoleillement dans le plan des panneaux .

Des capteurs nous permettent de mesurer les courants, tensions et puissances des :

- chaînes de production éolienne .
- chaîne de production photovoltaïque .
- batterie .

Ces données sont envoyées vers un système de gestion et de pilotage qui permet de commander le niveau de tension de la batterie. Avec une telle structure, nous pouvons contrôler les transferts d'énergie en intervenant sur le niveau de la tension batterie.

Des systèmes de sécurité (contacteurs) permettent de court-circuiter les éoliennes et les panneaux photovoltaïques si le niveau de tension batterie devient trop important. Toutes les données des capteurs sont stockées pour permettre l'affichage et l'analyse des grandeurs caractéristiques du dispositif.

.Convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT:

Les panneaux solaires de première génération sont généralement dimensionnés pour que leurs (PPM) correspondent à la tension nominale de batterie de 12 ou 24 Volts. Grâce à cette configuration, une simple connexion directe via une diode anti-retour suffit pour effectuer le transfert d'énergie du générateur photovoltaïque (GPV) à la charge. Cependant, les caractéristiques non-linéaires du module photovoltaïque et sa sensibilité aux conditions extérieures, comme l'éclairement et la température, induisent des pertes énergétiques. L'utilisation d'un étage d'adaptation afin d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée .

.Onduleur :

L' onduleur convertit le courant continu sortant de la batterie en courant alternatif nécessaire au fonctionnement de la majorité des appareils électriques domestiques.

.Redresseur:

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA.

IV.3.Analyse et discussion des résultats du système hybride PV-éolien disponible à El-OUED:

La zone El-oued est dotée d'un fort potentiel de rayonnement solaire, et la région est caractérisée par une saison d'été très chaude (Juin - Septembre), la température ambiante varie entre 10°C au mois de Janvier (le mois le plus froid) et 34°C au mois de Juillet (le mois le plus chaud), avec une valeur moyenne annuelle de 25.37°C.

Caractérisée région de El oued diffusée le mouvement est actif tout au long de l'année :

Les vents du nord que les périodes , l'ouest et le nord de Février à Avril.-

- Souffle des vents d'est qui est rafraîchissant d'Août à Octobre.

-Vent soufflant du sud , un chaud et être pendant l'été.

IV.3.1.L'énergie produite au cours des 20 jours du système hybride(PV-éolien):

Pendant le travail expérimental le système hybride dans la ville d'Eloued à mois de Mars durant les 20 jours et obtenir des résultats par un logiciel qui combine tous les résultats obtenus et les affiche sur le format de fichier Excel, le logiciel donne les résultats toutes les 10 minutes et le graphique de la courbe illustre cela.

Les résultats ont été trouvés très convaincants dans les systèmes PV sans obtenir des résultats de l'énergie éolienne au cours de la période d'étude et le graphique de la courbe montre les résultats obtenus à partir du PV et éolien Figure (IV.1) .

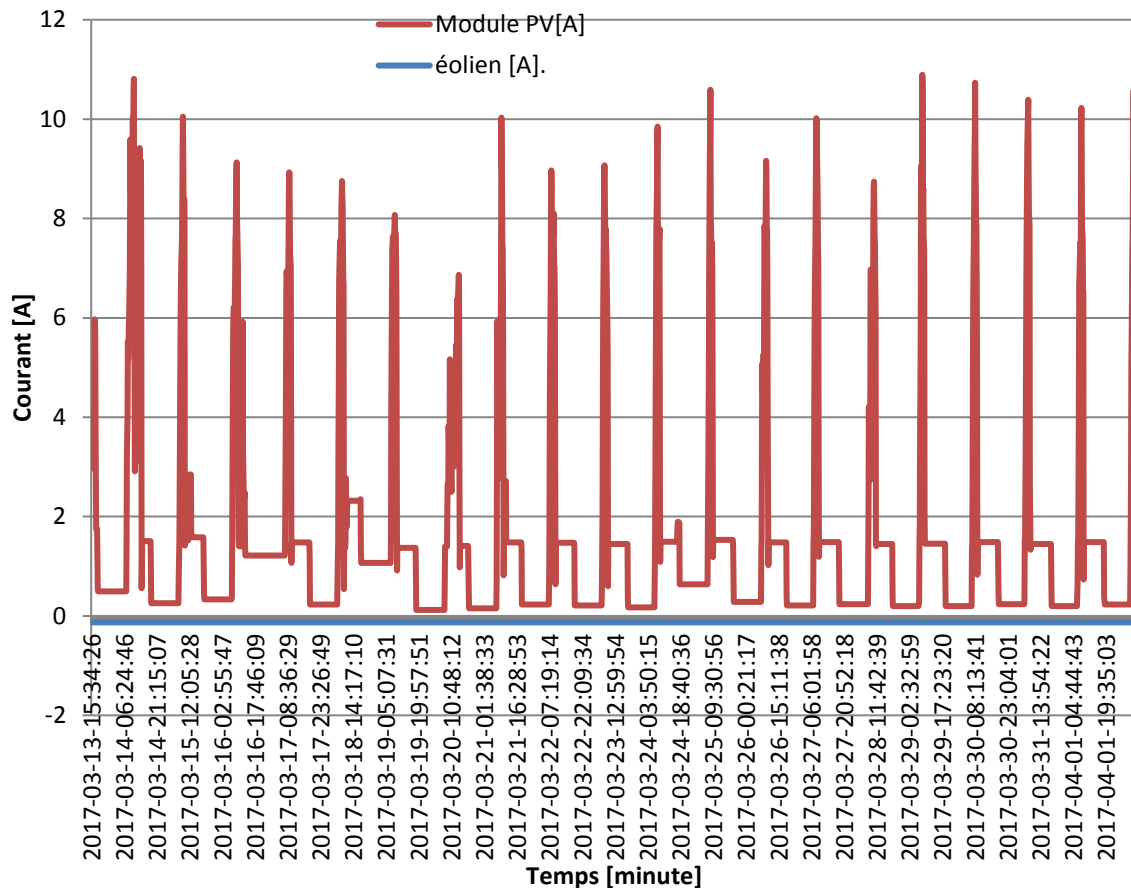


Figure IV.3: le courant de sortie au cours des 20 jours du système hybride(PV-éolien)

La meilleure période pour la production d'électricité à partir de capteur PV 7 h à 9 h seulement et la plus grande valeur est de 10,93 A où il était le jour libre de toute turbulence de l'air, où tous les jours près que dans la même production et il y a quelques jours qui étaient en raison de nuages et de la pluie, qui bloquaient les rayons du soleil aux capteur PV obtenu une valeur de 6,96 A .

L'énergie éolienne n'a pas produit de l'électricité en raison du manque de vents la approprie pour se déplacer et la présence de vents turbulents en quelques jours, ce qui empêche la stabilité d'un seul côté et la rotation de la turbine ,Ainsi que la présence de bâtiments de grande hauteur à l'université a été la raison de la désactivation du mouvement du vent et la transformer en un mouvement turbulent ne permet pas en stabilisation turbinée d'un côté.

L'étude a été menée au printemps au mois de Mars, où la température se situait entre 19 C° à 25C°, qui est le rapport considéré comme le meilleur pour donner un bon retour figure (IV.4).

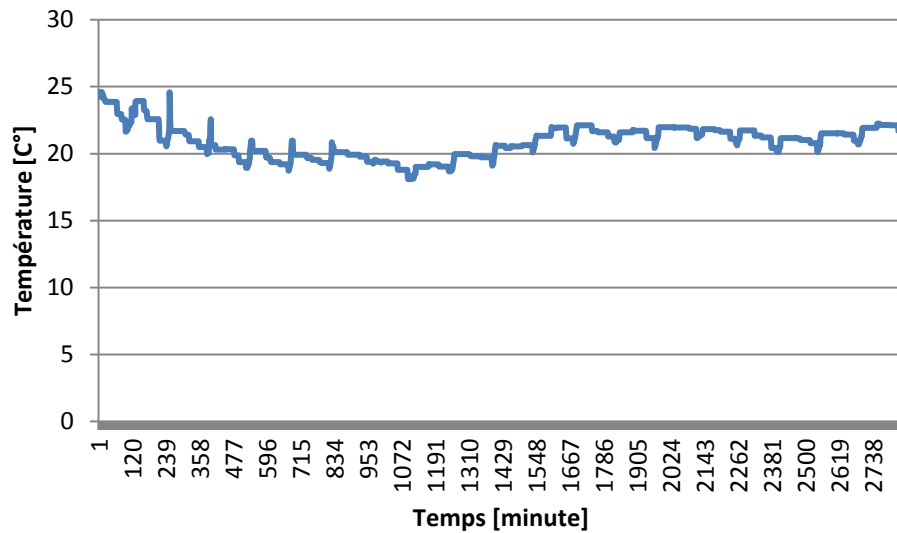


Figure IV.4: Les changements de température dans les 20 jours.

On note la présence de bonne l'énergie solaire pendant toute la durée de l'expérience, ce qui permet d'activer les panneaux PV pour produire de bons rendements de l'énergie électrique et le graphique de la courbe illustre cela figure (IV.).

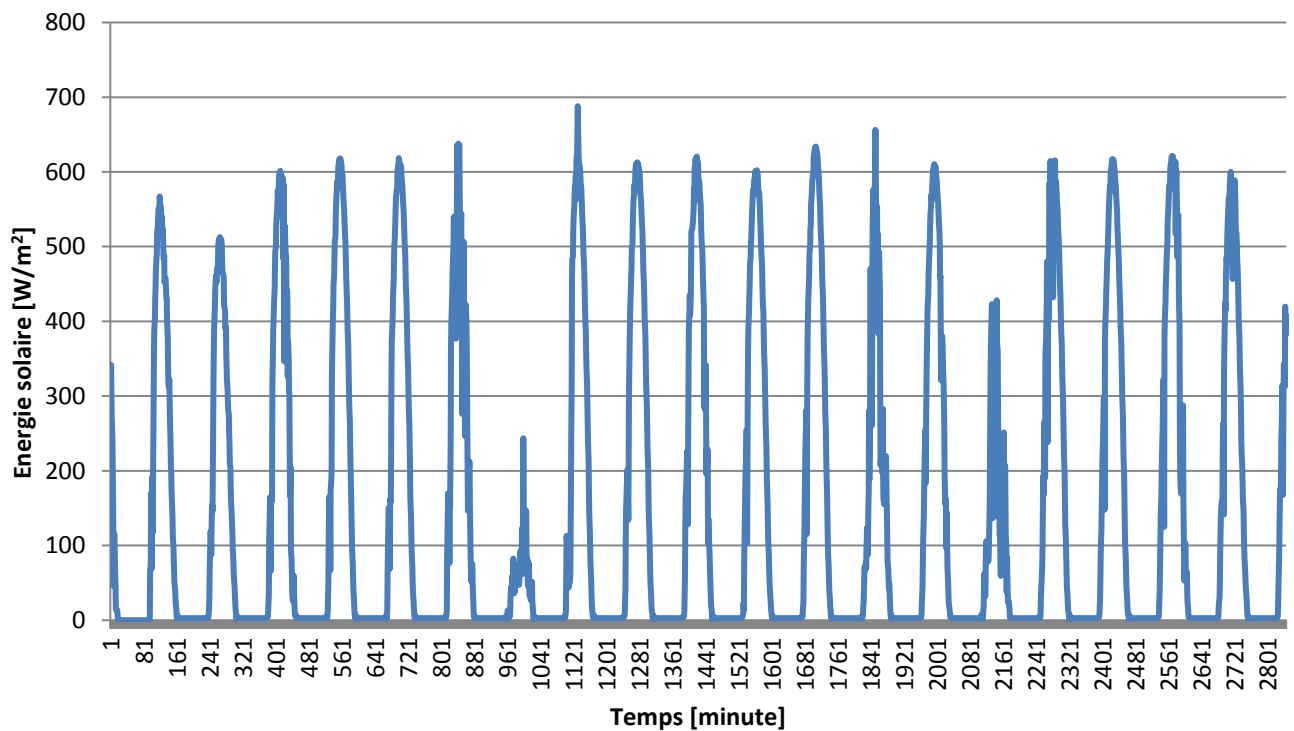


Figure IV.5: Les changements de énergie solaire[W/m²] dans les 20 jours.

Le changement dans les rayons du soleil ou de la vitesse du vent a une corrélation directe avec la puissance électrique obtenue à partir du système hybride PV-éolien. La figure IV suivante.

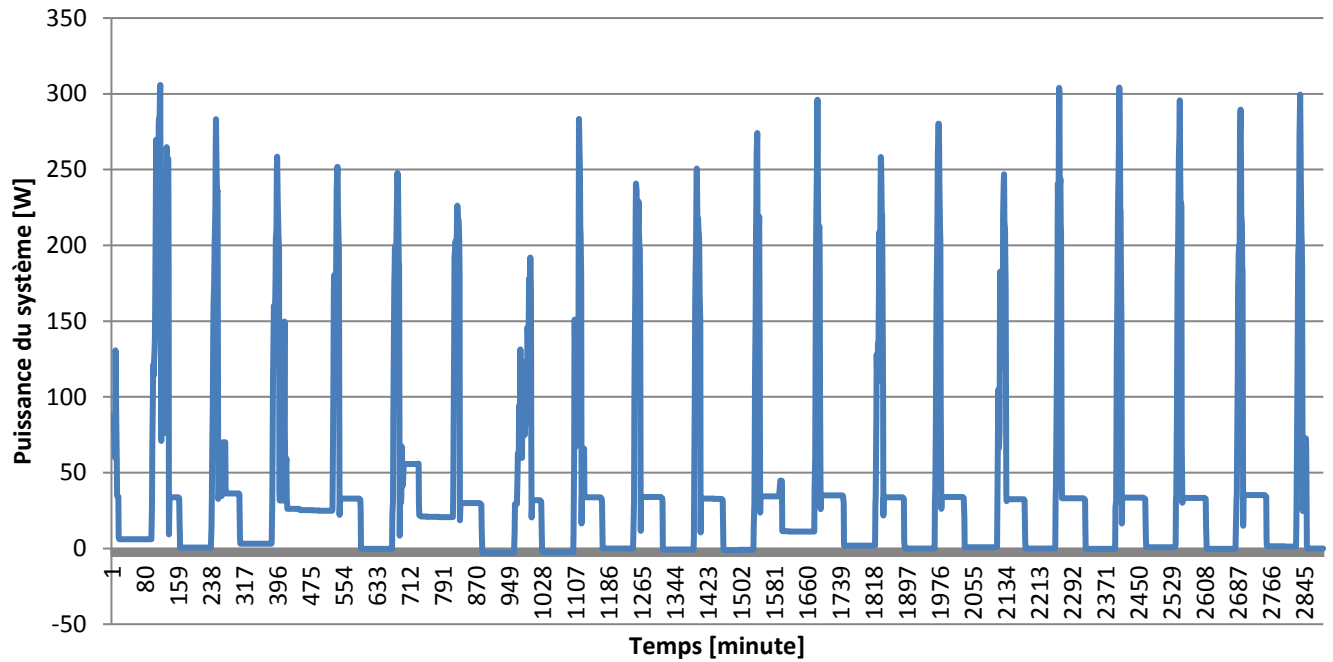


Figure IV.6: Les changements de puissance du système dans les 20 jours.

IV.3.2. Energies d'un seul jour produites par le système hybride (PV-éolien):

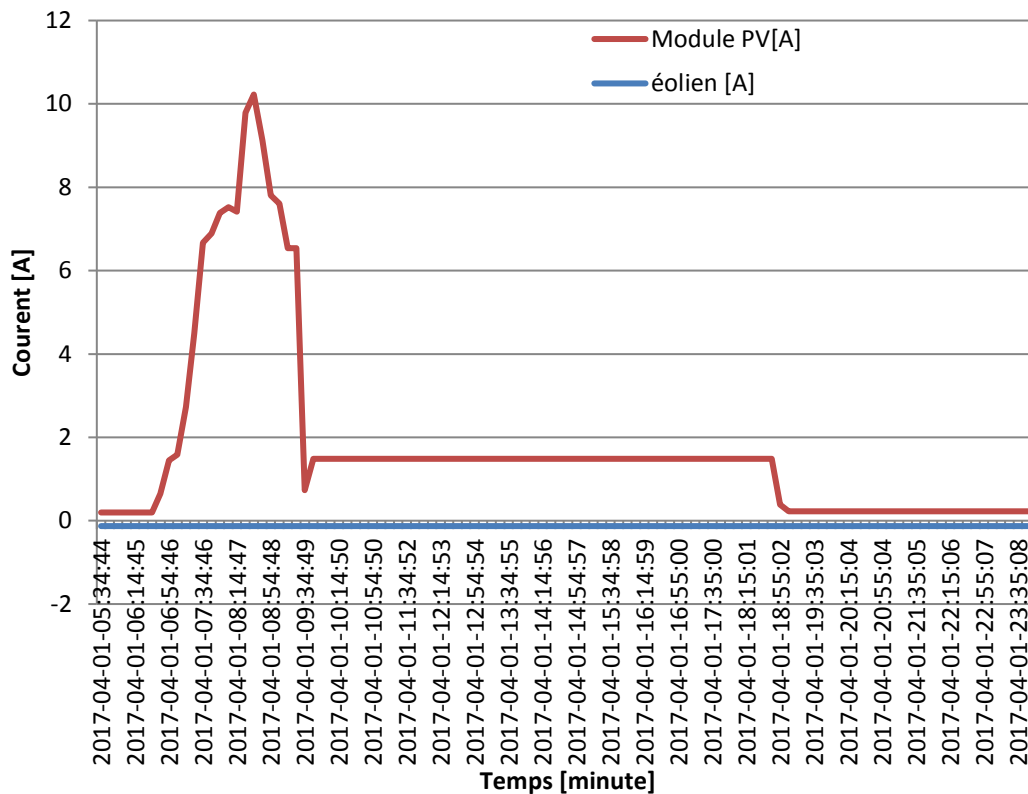


Figure IV.7: le courant de sortie au cours un jours du système hybride(PV-éolien).

Nous prenons un seul jour pour l'analyse , nous avons obtenu une grande quantité d'énergie le matin 7:00 à 9:00 parce que le soleil perpendiculaire à la surface du capteur PV à un angle de 90° où PV capteur est à un angle de 33° de la terre. Et le mouvement du soleil et de la stabilité d'angle du capteur diminue le rendement.

En ce qui concerne l'énergie éolienne, et il est en raison du manque de vent au cours de cette période de l'expérience.

La température pendant cette période était 20.5°C modérée à degré 22.5°C , qui est considéré comme meilleur pour les électrons et produire de l'énergie selon l' étude du premier chapitre et le graphique ci-dessous illustre cette situation.

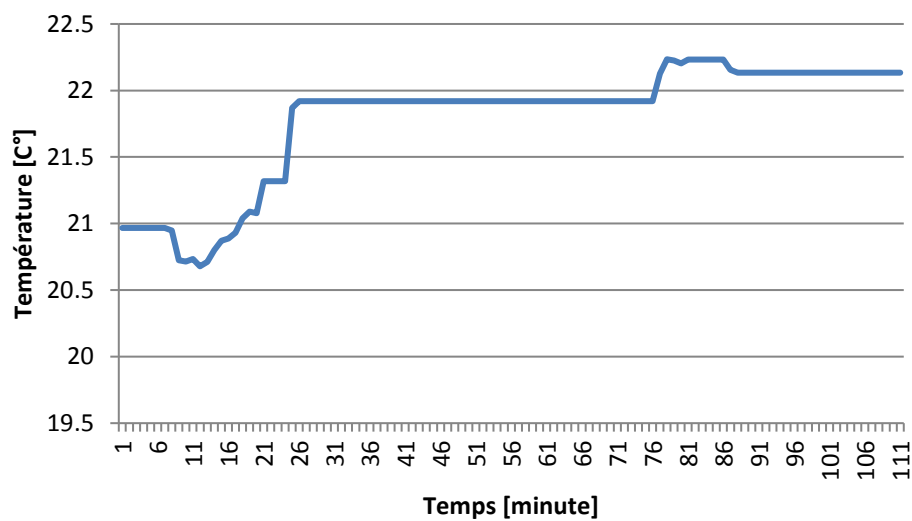


Figure IV.8 : Les changements de température en seul jour.

Ces valeurs de changement de température sont considérés comme une bonne température pendant la journée, ce qui indique la présence d'un bon mouvement pour les électrons des cellules PV , et qu'il doit y avoir un capteur qui suit le soleil, ce qui augmente l'efficacité de la production d'énergie.

Nous devons également présenter les résultats de la capacité dans un seul jour, et trouver la possibilité d'exploiter.

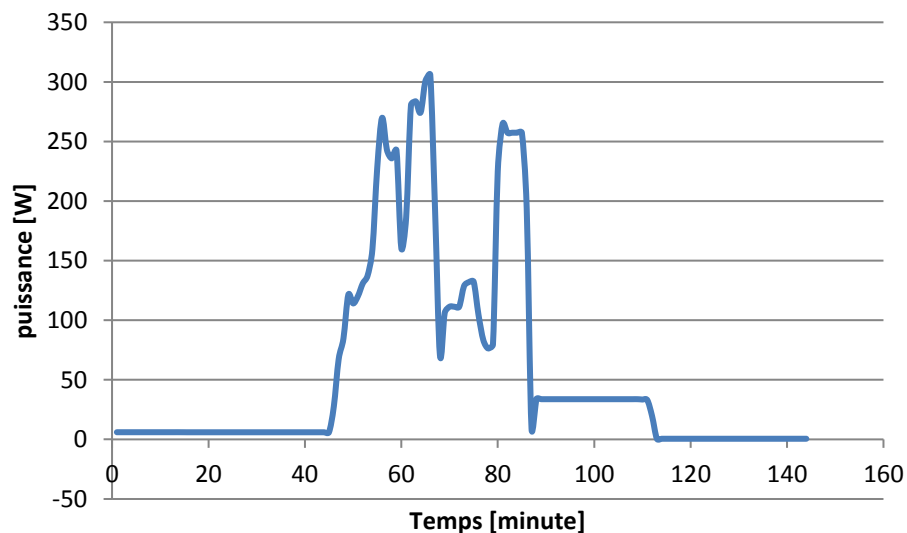


Figure IV .9: Les changements de puissance en seul jour.

D'après la courbe , on a vue la production d'énergie électrique dans le système est arrivé à plus de 300 watts pendant 10 minutes, Mais on doit calculer la moyenne de puissance P_m pendant un seul jour de savoir que cette valeur peut être exploitée pour exécuter, par exemple, un

simple système électrique pour éclairer un chambre, Où l'on calcule la production totale d'énergie P_T et le divise par le nombre total de jours.

. puissance moyen :

$$P_m = \frac{P_T}{\text{nombre de jours}}$$

$$P_m = \frac{116753.2}{20} = 5837.66 \text{ W}$$

P_m : Puissance moyen.

P_T : Puissance totale.

pour connaître la possibilité d'exploiter cette énergie par jour, nous divisons la puissance moyenne au cours de la journée sur le nombre d'heures de notre consommation d'électricité. Par exemple, nous profitons le laboratoire d'énergie renouvelable durant 6 heures par jour, nous suivons la méthode de calcul suivante.

$$P_h = \frac{5837.66}{6} = 973 \text{ Wh}$$

Cette valeur 973 Wh de l'énergie électrique au sein d'une heure par laquelle nous pouvons identifier les appareils qui peuvent être utilisés pour exploiter cette énergie.

IV.4.Conclusion :

Après avoir obtenu les résultats des travaux expérimentaux de 20 jours et l'analyse de ces résultats nous avons trouvé le manque d'énergie éolienne qui est suffisant pour déplacer la turbine à l'Université d'El-Oued, ce manque à cause l'empêche des vents des bâtiments à coté de l'université, ce qui en fait un mouvement irrégulier et la rotation de la turbine, mais le capteur PV ont produit une bonne énergie électrique, et pour l'augmentation des rendements de la production ,doit-on utiliser des capteur PV mobiles avec un mouvement du soleil et afin de maintenir un angle de 90° de le projection.

Conclusion générale

Conclusion générale :

L'utilisation de systèmes hybrides PV-éolien en énergie renouvelable permettra à l'exploitation de plusieurs phénomènes naturels pour la production nous avons coopérer un système hybride PV-éolien pour le capteur photovoltaïques 1KW type de Polycristallin et relier les cellules sur parallèle pour augmenter de l'intensité du courant et relier sur la séquence à une augmenter de la tension et il génère un courant constant , aussi L'énergie éolienne de type l'axe horizontal à trois pales et produit un courant alternatif , où converti en un courant constant, afin de faciliter le stockage dans des batteries (4 batteries de série/ parallèle)Il a des caractéristiques telles que la charge et l'auto-décharger et le langue vie .

Nous avons étudié ce système hybride durant 20 jours au mois de Mars dans la zone de le wilaya d'El oued, où la température se situe entre 19 C° à 25 C° et le vent turbulent n'a pas réglé sur une direction pour permettre la rotation du turbine.

Malgré quelques obstacles naturels, mais nous avons obtenu des bons résultats 116753 W durant 20 jours où la moyenne d'un seul jour était 5837.66W.

L'importance de cette étude est de mettre en évidence le succès de ce système dans la zone de le Wilaya d'El-oued , Mais doit travailler pour améliorer le système pour augmenter le rendement.

références bibliographique

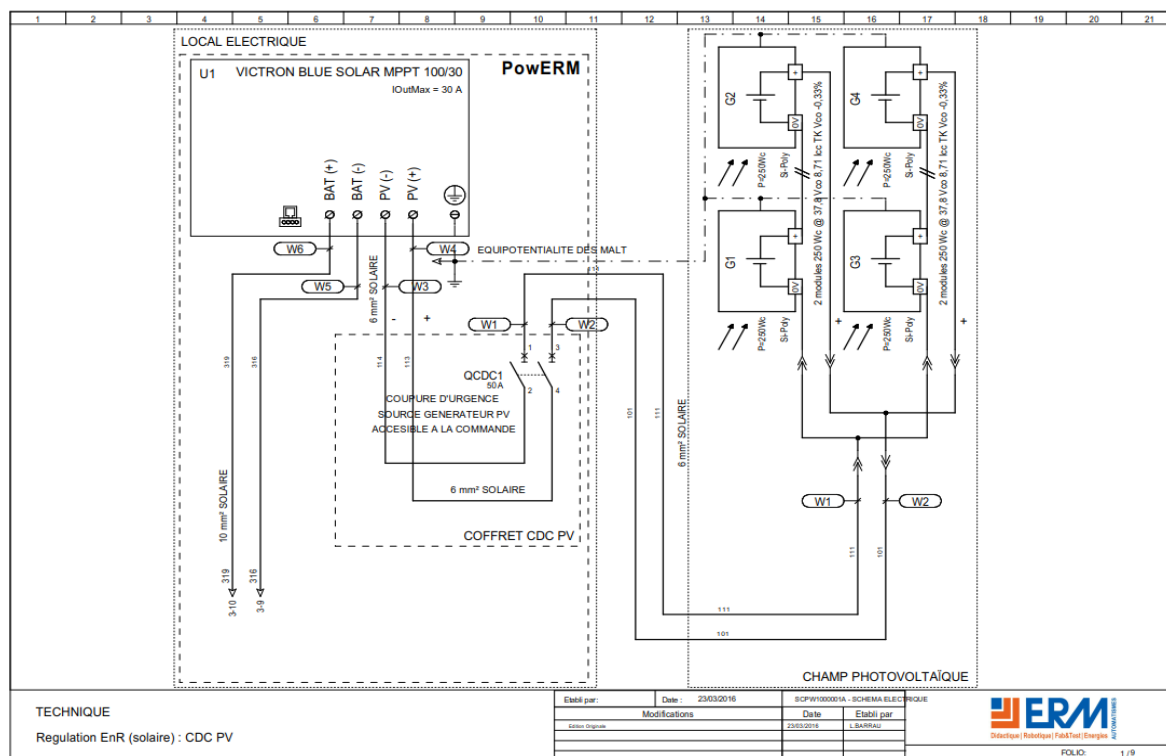
- [1] Angel Cid Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques," Thèse de Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.
- [2] <http://www2.cnrs.fr>.
- [3] www.dicodunet.com
- [4] <https://sites.google.com/site/tpesoleil2012/fayolle/composition-des-rayons>
- [5] www.energieplus-lesite.be.
- [6] <http://www.tpepanneauxsolaires.fr/rentabilite>
- [7] M. Adouane , M. Haddadi , N. Benamrane , K. Touafek , A. Khelifa et I. Tabet " Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride " *Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa (2014)* 87 – 92.
- [8] <http://www.renewables-made-in-germany.com/fr/renewables-made-in-germany/technologies/energie-eolienne/energie-eolienne/introduction.html>
- [9] <http://tpe-energie-eolienne.e-monsite.com/pages/sommaire/i-generalites.html>
- [10] <http://eolienne.f4jr.org/vent>
- [11] J. Martin, "Energies éoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.
- [12] Frederic Poitiers. ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone _a cage autonome - Ma- chine asynchrone _a double alimentation reliée au réseau. Energie électrique. Université de Nantes, 2003. Français. <tel-00011383>
- [13] "Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale" Génie Electrique, L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, Présentée et soutenue par Duc-Hoan TRAN le 27 septembre 2010.
- [14] <http://www.connaissancedesenergies.org>
- [15] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [16] J. Ancel, "Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.
- [17] A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.

- [18] C. Colliez, A. Tounzi, F. Piriou, "Vector Control of an Autonomous Induction Generator Connected to a PWM Rectifier", Proceedings of EPE 97, vol. 2, pp. 711-716, Trondheim, Norvège, 8-10 September 1997.
- [19] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [20] Fabien Mestrallet. Architectures intégrées pour la gestion et la labialisation du stockage électrochimique _a grande échelle.. Autre. Université Grenoble Alpes, 2013. Français. <NNT : 2013GRENT093>. <tel-00917065v2>.
- [21] **Jean-Marie** Tarascon " L'énergie : stockage électrochimique et développement durable" Leçon inaugurale prononcée le jeudi 9 décembre 2010 .
- [22] **FAUVARQUE J.F.** *L'électrochimie et ses applications* Rhône Poulenc, L'actualité chimique, novembre 1988, issn 0151-9093 .
- [23] B. Dunn, H. Kamath, J.-M. Tarascon, *Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices*, Science, **334**, 928 (2011).
- [24] P. Odru, *Le stockage de l'énergie*, Ed. Dunod, Paris (2010).
- [25] Mohamed Ansoumane Camara. Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs. Autre. Université Paris-Est, 2011. Français. <NNT : 2011PEST1071>. <tel-00673218>
- [26] **WROBLOWA H.S.** *Modern aspects of electrochemistry* New York, Plenum Press, Vol. 16 , 1985 Power sources 8, 1981.
- [27] **BRONOEL G.** *Les accumulateurs électrochimiques : progrès et tendances* Rhône Poulenc, L'actualité chimique, N°3, mai 1990, Issn 0151-9093.
- [28] **WROBLOWA H.S.** *Modern aspects of electrochemistry* New York, Plenum Press, Vol. 16 , 1985 Power sources 8, 1981.
- [29] **JONES R.** *Bringing Nickel-Hydrogen Down to earth* Batteries International Avril 1993.
- [30] **LINDEN D.** *HANDBOOK OF BATTERIES AND FUEL CELLS* McGraw-Hill, New York.
- [31] **RUDD E.J.** *Overview of the Al-air battery program* 33th International Power Sources Symposium, 13-16 juin 1988.
- [32] **ECT, Electro-Chem-Technic FUEL CELL** 81 Old Road, Headington, OXFORD OX3 7LA, U.K. Site d'information internet : ectechnic@patrol.i.way.co.uk.
- [33] **ZUMWINKEL K.** *German connections behind EFL's Zn-air* Batteries international, October 1994.
- [34] **BOUET J. et POMPOM J.P** *Analyse des causes de dégradation des plaques positives de batteries plomb* Electrochemica Acta. Vol 26, N°10, 1981, p 1477-1478.

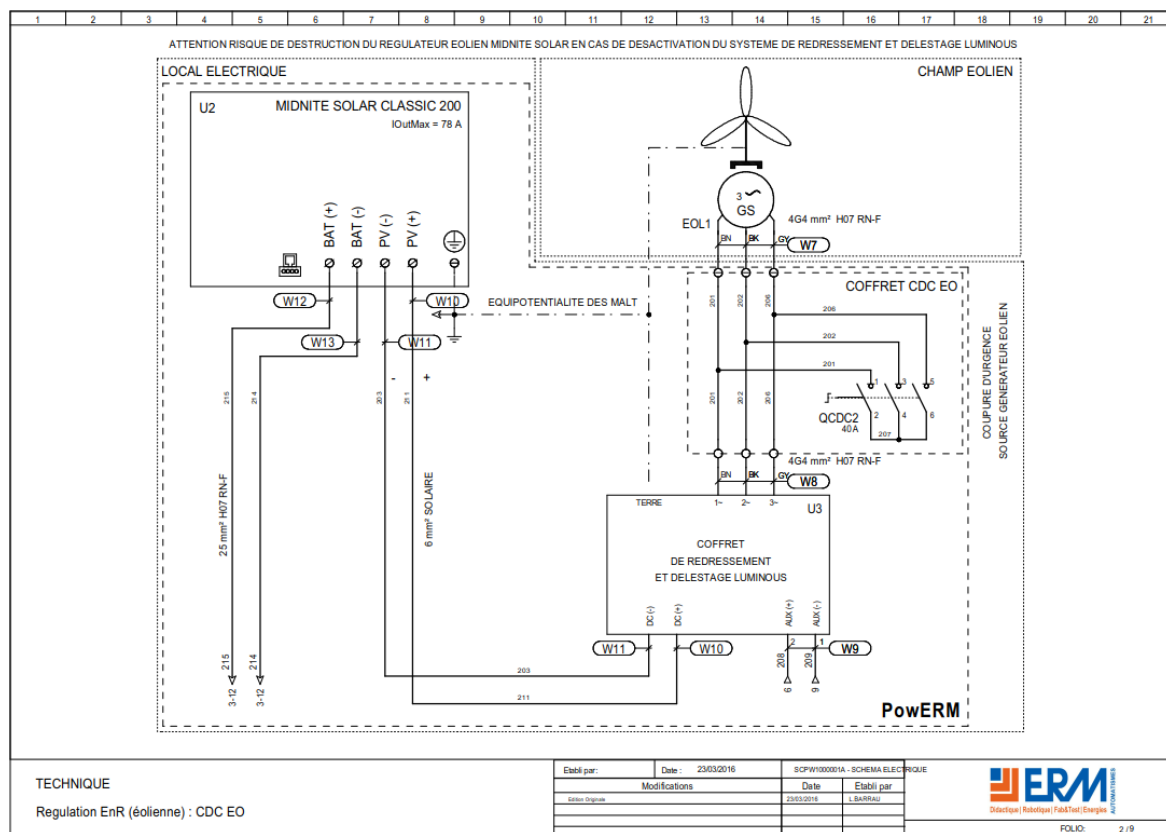
- [31] **FOISSOTE M.P.** *Contribution à l'étude de la corrosion des plaques positives d'accumulateur plomb* Mémoire de DEA, NANCY 1, Sciences et génie des matériaux, 1992.
- [32] **BERNDT D., MEISSNER E., RUSCH W.** *Aging Effects in Valve-Regulated Lead-Acid Batteries* Proceeding Intelec 93, S.22.B., p.139-145.
- [33] **KAPPUS W. WINSEL A.** *Sulfate passivation in the lead-acid system as a capacity limiting process* Journal of Power Sources, N°8, 1982, p 159-173.

Annexes

Annexe A : Schéma électrique de système Photovoltaïque .



Annexe B: Schéma électrique de système d'énergie éolienne.



Annexe C : Les résultats présentés par le système.

DATE & TI	Wind turb.	I:Solar-2	Solar-3	Solar-4	Solar Pan.	Wind-Hyd-	System	Cons-Pro-
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	0.624135	0.019228	-0.21364	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	1.641862	0.01898	-0.23846	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	3.390649	0.019195	-0.23719	0.019526
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	4.113756	0.019228	-0.23343	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.655366	0.019228	-0.22905	0.019527
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.294904	0.019219	-0.22475	0.019529
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.529966	0.019194	-0.22823	0.019522
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.946651	0.019162	-0.21922	0.019514
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	6.205024	0.019224	-0.23491	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	7.043129	0.018973	-0.23865	0.019506
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	8.37128	0.018923	-0.22838	0.019517
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	9.720776	0.018729	-0.22374	0.019425
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	8.785975	0.018923	-0.22464	0.019452
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	8.542315	0.018923	-0.23307	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	8.772305	0.018864	-0.23259	0.019526
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	6.042937	0.018923	-0.2224	0.019416
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	7.150102	0.018965	-0.23201	0.019357
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	10.08813	0.018917	-0.21846	0.019414
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	10.17969	0.018923	-0.22211	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	9.860969	0.018921	-0.22663	0.019532
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	10.76746	0.018923	-0.21364	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	10.93993	0.018923	-0.21364	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	7.138618	0.018923	-0.21962	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	3.039861	0.019191	-0.2289	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	4.378234	0.019228	-0.23536	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	4.576486	0.019228	-0.23653	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	4.576486	0.019228	-0.23653	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	4.576486	0.019228	-0.23653	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.205593	0.019066	-0.21144	0.019524
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.324115	0.019218	-0.20478	0.019532
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	5.331846	0.019228	-0.19838	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	4.29787	0.019228	-0.21033	0.019533
2017-03-14	-0.12971	0.020448	0.019838	0.019533	3.496885	0.019228	-0.21364	0.019533

Résumé

Titre du mémoire : Etude expérimentale d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec des batteries de stockage.

Master : Energétique et Énergies renouvelables

Auteur : BEHIR Badr Eddine et BAKER Yassine .

Mots clés : Hybride, Photovoltaïque , éolien.

Résumé :

pour exploiter les énergies renouvelables dans la zone de El oued , nous avons fait un travail expérimental sur un système hybride lié au système de stockage dans un délai de 20 jours au mois de Mars .

Nous avons obtenu des résultats dans une période limitée au cours de la journée où les rayons du soleil étaient vertical sur la surface capteur PV, en raison de l'utilisation de capteur PV fixes et avec la présence de certains obstacles ne pas obtenir les résultats de l'énergie éolienne en raison des longs bâtiments qui ont provoqué le mouvement de turbulence et de l'instabilité de la direction du vent les résultats.

Où la production a été bonne pendant les 20 jours, où nous notons qu'il doit être amélioré grâce à l'utilisation de le Suiveur solaire ,et que nous proposons de changer le type l'énergie éolienne à axe horizontal à l'axe de rotation vertical.

Report title: Experimental study of a hybrid photovoltaic-wind system with storage batteries.

Keywords: Hybrid, Photovoltaic , wind turbine .

Abstract:

Providing Sustainable Energy Through Renewable Energy In The area of El-oued , we experimented with a hybrid system (Photovoltaic Panels with Wind Turbine) associated with a storage system. The 20-day experiment in March in the spring was that we had limited results during the day when the sun is vertical on the surface of photovoltaic panels because of the use of fixed photovoltaic panels and with some obstacles by not getting results from wind turbines because of the long buildings that cause wind disturbance and instability in one direction.

Where the output of electricity in the hybrid system within 20 days is good, we note that the yield must be improved through the use of the tracker of the movement of solar adhering to the solar panels and we propose changing the type of wind power axis of horizontal rotation to the axis of vertical rotation.

عنوان المذكرة: دراسة تجريبية لنظام الهجين من الخلايا الضوئية و تربين الرياح مع بطاريات التخزين.

الكلمات المفتاحية: هجين،الفوتونات الضوئية،تربين الرياح .

الملخص:

من اجل استغلال الطاقة المتجددة في ولاية الوادي قمنا بعمل تجريبي على نظام هجين من الخلايا الفوتوضوئية مع تربينات الرياح مرتبط مع نظام تخزين وكانت التجربة خلال مدة 20 يوما في شهر مارس في فصل الربيع , كان حصولنا على نتائج في فترة محدودة خلال النهار عندما تكون أشعة الشمس عمودية على سطح الألواح الشمسية بسبب استعمال ألواح شمسية ثابتة و مع وجود بعض العوائق من خلال عدم الحصول على نتائج من طاقة الرياح بسبب المباني الطويلة التي تسبب اضطراب حركة الرياح و عدم استقرارها في اتجاه واحد .

حيث كان الناتج خلال 20 يوما جيدة , نلاحظ انه يجب تحسين المردود من خلال استعمال المتتبع لحركة الشمسية ملتصق بالألواح الشمسية كما أننا نقترح تغيير نوع طاقة الرياح محور الدوران الأفقية إلى محور الدوران العمودية .