

République **A**lgérienne **D**émocratique et **P**opulaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane MIRA-BEJAIA

Faculté De Technologie
Département de Génie
Électrique

Spécialité: Électrotechnique



En vue de l'obtention du diplôme master en électrotechnique

Options: Energies renouvelables

Thème

**ETUDE D'UN SYSTÈME HYBRIDE
(PV-ÉOLIEN)**

Réalisé par :

HALLAL Mohamed Badreddine

ABDELOUHAB Arezki

Encadrés par:

MR Pr : REKIOUA.T

Mr : IHAMMOUCHEN

Promotion2022/2023

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier tout le personnel de l'université de Bejaia pour L'écoute, l'accompagnement et la formation dont nous avons pu bénéficier.

Nous souhaiterons remercier notre promoteur **PR D. Rekioua** pour la transmission de son savoir au cours des deux années de notre formation, ainsi que notre Co-promoteur **Mr.S Ihammouchen** pour sa patience, sa persévérance, sa sincérité et son encadrement de qualité.

Nous remercierons très sincèrement le **PFT. Rekioua** Directeur du laboratoire de technologie industrielle et de l'information(**LTII**), pour son accueil chaleureux et ses conseils pertinents, sans oublier l'ensemble du personnel du laboratoire pour leur accueil et leur bienveillance, et particulièrement **Mr.A Oubelaid**.

Nous adresserons aussi un merci à nos camarades avec qui nous avons passé des moments inoubliables tout au long de notre parcours,

Pour finir, nous souhaitons remercier du fond du cœur nos parents pour leurs efforts inestimables, leurs sacrifices, leurs amours et surtout d'avoir toujours cru en nous.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à

Mes précieux grands parents ADRAR Nacer et Rebihaa,

Mes cher parents Ferhat et Leila

Mes chers frères Mehdi et Badis

Ma tonte Houda

Mes amis Rayan, Nabil, Anis, Brahim, Ramzy et Mounir.

Sans oublier ma confidente Elyna.

Vous avez toujours été ma plus grande inspiration, et je

vous suis extrêmement reconnaissant pour cela.

Badreddine

Dédicace

Ce mémoire de fin d'études est dédié à vous, qui avez été les piliers de ma vie et les sources de mon soutien inconditionnel. Votre amour, votre patience et votre encouragement ont été les moteurs qui m'ont poussé à aller au-delà de mes limites et à poursuivre mes rêves.

À ma mère, qui a été ma plus grande inspiration et ma meilleure amie.

ET MON PÈRE,

À mes sœurs, qui ont été mes compagnons de route et mes partenaires de confiance.

À ma famille et mes amis : Mouloud , Sofiane ,Kiki, Facih ,
Khadidja ,Nabila qui ont été toujours été présents pour
moi.

Que cette dédicace soit le témoignage de ma gratitude
éternelle envers chacun de vous. Votre présence dans ma vie
a fait de moi la personne que je suis aujourd'hui, et je vous
en suis infiniment reconnaissant.

ABDELOUHAB Arezki

Sommaire

<u>Introduction générale</u>	3
<u>I. Introduction</u>	4
<u>I.1 Systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque</u>	4
<u>I.1.1 Historique</u>	4
<u>I.1.2 Cellule photovoltaïque</u>	5
<u>I.1.3 Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques</u>	8
<u>I.2 Les systèmes de conversion éolienne</u>	8
<u>I.2.1 Types d'aérogénérateurs</u>	9
<u>I.2.2 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur</u>	10
<u>I.2.3 Machines électriques dans les aérogénérateurs</u>	11
<u>I.2.4 Les avantages et les inconvénients des générateurs éoliens</u>	12
<u>I.3 Les convertisseurs statiques</u>	12
<u>I.3.1 Convertisseur DC/DC (hacheur)</u>	13
<u>I.3.2 Convertisseur AC/DC (Redresseur)</u>	13
<u>I.3.3 Configuration du bus dans les systèmes hybrides</u>	14
<u>I.3.4 Les avantages et les inconvénients d'un système hybride</u>	16
<u>I.4 Conclusion</u>	16
<u>II. Introduction</u>	17
<u>II.1 Système hybride étudié</u>	17
<u>II.2 Dimensionnement du système hybride</u>	17
<u>II.2.1 L'énergie produite par le générateur photovoltaïque</u>	18
<u>II.2.2 Méthodes de dimensionnement du système hybride</u>	19
<u>II.3 Application</u>	20
<u>II.3.1 Les paramètres du panneau utilisé</u>	21
<u>II.3.2 Les paramètres de la turbine</u>	21
<u>II.3.3 Les données et les calculs</u>	21
<u>II.3.4 Dimensionnement de l'onduleur</u>	24
<u>II.3.5 Dimensionnement du convertisseur boost</u>	25
<u>II.3.6 Dimensionnement du filtre</u>	26
<u>II.4 Conclusion</u>	28
<u>III. Introduction</u>	29

<u>III.1</u>	<u>Modélisation du panneau PV</u>	29
<u>III.2</u>	<u>Système de conversion PV</u>	30
<u>III.3</u>	<u>Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent</u>	32
<u>III.3.1</u>	<u>Hypothèse simplificatrice</u>	32
<u>III.3.2</u>	<u>La mise en équation de la MSAP</u>	33
<u>III.4</u>	<u>Modélisation du bus continu</u>	39
<u>III.5</u>	<u>Modélisation de la turbine</u>	39
<u>III.5.1</u>	<u>Modélisation du Cp</u>	40
<u>III.5.2</u>	<u>Puissance récupérable par une éolienne</u>	40
<u>III.5.3</u>	<u>Régulation mécanique de la vitesse d'une éolienne</u>	42
<u>III.6</u>	<u>Modélisation de la chaîne de conversion éolienne</u>	43
<u>III.6.1</u>	<u>Modélisation du vent</u>	43
<u>III.6.2</u>	<u>L'énergie produite par le générateur éolien</u>	43
<u>III.7</u>	<u>Modélisation du redresseur</u>	44
<u>III.8</u>	<u>Modélisation du l'onduleur</u>	45
<u>III.9</u>	<u>Conclusion</u>	46
<u>IV.</u>	<u>Conclusion générale</u>	47

LISTES DES FIGURES

LISTES DES FIGURES

Figure 1. : principe de fonctionnement d'une cellule PV	6
Figure 2 caractéristique d'une cellule	7
Figure 4: Cellules ou modules photovoltaïques en série	8
Figure 5: cellules PV en parallèle	10
Figure 6: Eolienne à axe vertical, (a) type Savonius, (b) type Darrieus[09].	11
Figure 7 :Eolienne à axe horizontal [10].	11
Figure 8:Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.	14
Figure 9: Convertisseur DC/DC Hacheur.	14
Figure 10:Convertisseur DC/AC Onduleur.	14
Figure 11: Convertisseur AC/DC Redresseur.	15
Figure 12:Architecture des systèmes hybrides d'énergie[17].	16
Figure 13:configuration du système hybride à bus continu [19].	17
Figure 14:configuration du système hybride à bus alternatif [17].	18
Figure 15: Système hybride étudié.	26
Figure 16: schéma électrique d'un convertisseur boost.	27
Figure 17: Schéma équivalent d'un filtre LC	29
Figure 18 : Schéma électrique équivalent d'une cellule.....	30
Figure 19: Les caractéristiques du panneau photovoltaïque.....	31
Figure 20: Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par P&O	31
Figure 21: Organigramme de la méthode P&O.....	31
Figure 22: schéma électrique du convertisseur élévateur DC/DC.....	33
Figure 23: a- machine asynchrone -b- machine a aimant permanent	33
Figure 24: Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)	36
Figure 25: Représentation de MSAP dans le repère (d, q) image floue	39
Figure 27: Le bus continu V_{dc}	40
Figure 28: les caractéristiques de la turbine	41
Figure 29: Caractéristique $C_p(\lambda)$	42
Figure 30: Vitesse du vent (V_v) et vitesse tangentielle de l'aubage $R_t*\Omega$	42
Figure 31: Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [13].	43
Figure 32: Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent [14].	44
Figure 33: Schéma synoptique de la chaîne éolienne	45
Figure 34: Schéma du redresseur MLI (vous n'avez pas utiliser ce type)	45
Figure 35 Tension simple de phase et tension de sortie de redresseur	45
Figure 36: Schéma d'un onduleur monophasé à pont complet.	45

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les systèmes hybrides PV-éolien sont des systèmes de production d'énergie qui combinent les technologies solaires photovoltaïque et éolienne. Ces systèmes sont conçus pour tirer parti des avantages complémentaires de ces deux sources d'énergie renouvelable afin d'optimiser la production d'électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque est générée à partir de l'énergie du soleil captée par des panneaux solaires, qui convertissent directement la lumière en électricité. Cette technologie est particulièrement efficace dans les régions ensoleillées. En revanche, générant ainsi de l'électricité. Cette technologie est plus efficace dans les zones où les vents sont constants et forts.

L'utilisation conjointes de l'énergie solaire photovoltaïque et de l'énergie éolienne dans un système d'énergie hybride présente plusieurs avantages, les variations saisonnières et diurnes de la production d'énergie solaire peuvent être compensées par la production éolienne, lorsque la production solaire est faible pendant la nuit ou en hiver, l'énergie éolienne peut être plus abondante, assurant ainsi une production continue. De plus, les systèmes hybrides peuvent mieux s'adapter aux fluctuations météorologiques imprévisibles en combinant les deux sources d'énergie.

Les systèmes hybrides PV-éolien sont utilisés dans diverses applications, allant des installations résidentielle et commerciales autonomes aux projets d'énergie renouvelable à grande échelle intégrés aux réseaux électriques, ils offrent une solution flexible et adaptative pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en réduisant les émissions de carbone et en favorisant la durabilité environnementale.

Dans ce travail nous allons exploiter deux énergies renouvelables (photovoltaïque et éolienne) afin d'alimenter une charge. Pour cela un dimensionnement précis de toute installation est nécessaire. De plus une gestion d'énergie s'impose pour gérer le flux de puissance entre les différents sous-systèmes.

Ce mémoire sera structuré comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons des généralités sur les énergies photovoltaïques et éoliennes et les systèmes hybrides.
- Le dimensionnement du système hybride étudié fait l'objet du deuxième chapitre.
- Au dernier chapitre on va modaliser et simuler notre système sous MATLAB/Simulink puis déduire les résultats de la simulation.

Une conclusion sera présentée à la fin de ce mémoire.

I. Introduction

Actuellement, de nombreux villages et villes des pays sous développés, en développement et même développés souffrent encore d'un manque d'électricité. Cependant l'électricité est la forme d'énergie la plus simple disponible aujourd'hui, Mais avant de la consommer, Il faut la produire, la transformer, puis la transporter aux consommateurs. Dans les pays industrialisés, ce système est désormais très centralisé, même si l'évolution des réglementations tend à amorcer une décentralisation de la production. Compte tenu de la difficulté d'assurer extension du réseau électrique aux zones reculées et des inconvénients environnementaux et économiques de l'utilisation de combustibles fossiles. La solution technique proposée est basée sur l'énergie PV et éolienne, et les générateurs peuvent produire d'électricité pour répondre à la demande de l'énergie. Ce chapitre sera consacré aux présentations des différentes généralités sur les énergies photovoltaïques et éoliennes.

I.1 Systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie des photons, compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Elle utilise pour ce faire des cellules élémentaires fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs qui réalisent cette transformation d'énergie. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque, la mise en série et en parallèle de ce dernier forme un générateur photovoltaïque (GPV). La puissance extraite du générateur PV dépend du niveau d'éclairement et de la température de la cellule.

I.1.1 Historique

Quelques dates de l'histoire du photovoltaïque :

- 1930:Les premières cellules PV à oxyde cuivreux (CuO) ont été créées, suivies de cellules en sélénium (Se)
- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [1]

I.1.2 Cellule photovoltaïque

I.1.2.1 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Le principe de fonctionnement de cette cellule repose sur l'effet photovoltaïque, en effet une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteur, ces deux couches sont dopées différemment :

- Pour la couche N, apport d'électrons périphériques.
- Pour la couche P, déficit d'électrons

Ces deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N) leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur [02].

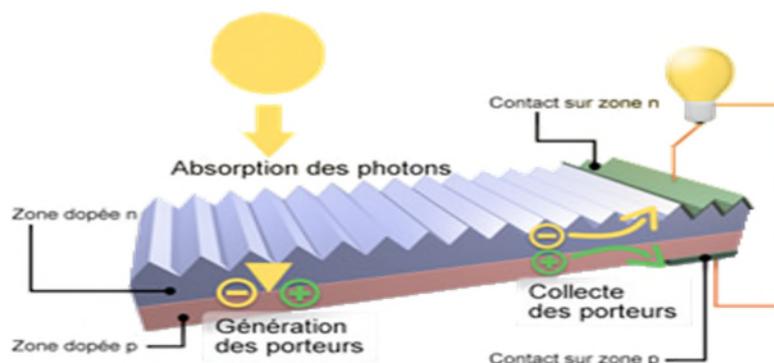


Figure 1. : Principe de fonctionnement d'une cellule PV

I.1.2.2 Caractéristique de la cellule photovoltaïque

La cellule étant chargée par une résistance, lorsque l'on éclaire la jonction PN, on observe l'apparition d'un courant inverse I sous une tension en sens direct V . La jonction fonctionne en photopile, c'est l'effet photovoltaïque. La caractéristique d'une jonction PN non éclairée est celle d'une diode. En présence d'un éclairage, elle joue le rôle d'un générateur de courant DC, dont la caractéristique est montrée dans les figures (I.2) et (I.3).

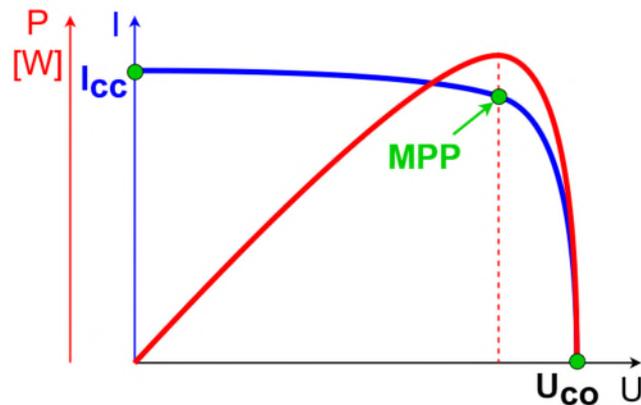


Figure 2 : Caractéristique Puissance en fonction d'une tension de la cellule

I.1.2.3 Association des cellules photovoltaïques

- a) **Association en série** : En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série. La figure (I.4) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en série [2].

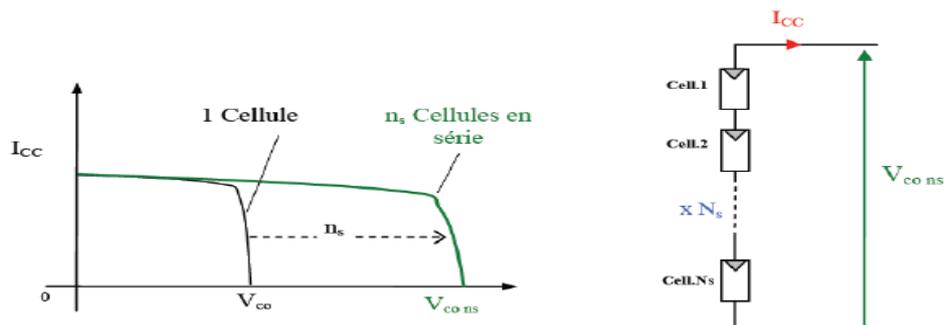


Figure 3: Cellules photovoltaïques en série.

- b) **Association en parallèle** : En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche. La figure

(I.5) montre l'intérêt de l'association des cellules ou modules photovoltaïques identiques en parallèle [2].

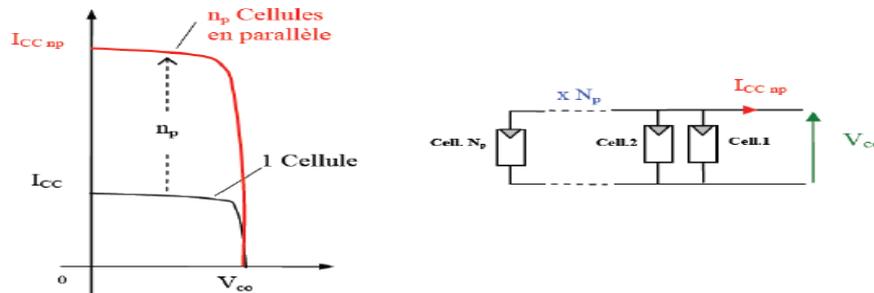


Figure 4: Cellules PV en parallèle

I.1.2.4 Systèmes autonomes

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les champs dans les régions éloignées ainsi que le pompage de l'eau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [4].

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques autonomes sans stockage (au fil du soleil)

I.1.2.5 Systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [3].

I.1.2.6 Systèmes autonomes sans stockage

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, c'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible.

I.1.2.7 Systèmes raccordés au réseau

Les systèmes raccordés au réseau permettent de réduire la consommation d'électricité provenant du service public et, dans certains cas, de lui renvoyer l'énergie excédentaire. Le service public pourrait vous créditer l'énergie retournée au réseau. Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que vous ne vouliez une forme autonome d'énergie pendant les pannes

d'électricité. Ces systèmes sont utilisés dans les immeubles, les domiciles ou les chalets déjà reliés au réseau électrique [05].

I.1.3 Avantages et inconvénients des générateurs photovoltaïques

a) Avantages

- La production de cette électricité renouvelable est propre, n'est pas toxique.
- Les systèmes photovoltaïques sont extrêmement fiables.
- L'énergie photovoltaïque est particulièrement attractive pour les sites urbains pour sa petite relative taille, et son opération silencieuse
- La lumière du soleil étant disponible partout, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montage dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville [06].

b) Inconvénients

- La production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, est toujours variable.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques et des capteurs est élevé.
- S'il faut stocker l'énergie avec des batteries, le coût de l'installation augmente.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible [6].

I.2 Les systèmes de conversion éolienne

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un dispositif mécanique dont l'intérêt se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent et de la transformer en énergie mécanique. Cette énergie mécanique peut être exploitée de deux manières [7] :

- Soit la conservation de l'énergie mécanique pour faire avancer un véhicule (navire à voile), pour pomper de l'eau.
- Soit la transformation en énergie électrique l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome.

I.3.1. Historique

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre. Le vent fut utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, jusqu'à ce que WATT ait inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle [07].

Trois siècles Avant Jésus Christ, l'Égyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales. Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique [10].

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie du vingtième siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon.

Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne [08].

I.2.1 Types d'aérogénérateurs

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes sont classées en deux catégories :

- Eoliennes à axe vertical.
- Eoliennes à axe horizontal.

I.2.1.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles [09].

- Savonius** : Du nom de son inventeur, breveté en 1925. Son fonctionnement repose sur le principe de la trainée différentielle exercée par le vent sur ses godets comme montré sur la figure (I.6). Elle présente un grand nombre d'avantages à savoir un couple moteur important. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer cette éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique [09].
- Darrieus** : Ce type du rotor est généralement sous forme parabolique comme montré sur la figure (9). Son fonctionnement est basé sur la variation cyclique d'incidence ce qui fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles soit soumis à des forces d'intensités et de directions variables [09].



Figure 5: Eolienne à axe vertical, (a) type Savonius, (b) type Darrieus[09].

I.2.1.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent comme montré sur la figure (7). Ce type d'éoliennes pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [11].



Figure 6 : Eolienne à axe horizontal [10].

I.2.2 Principe de fonctionnement d'un aérogénérateur

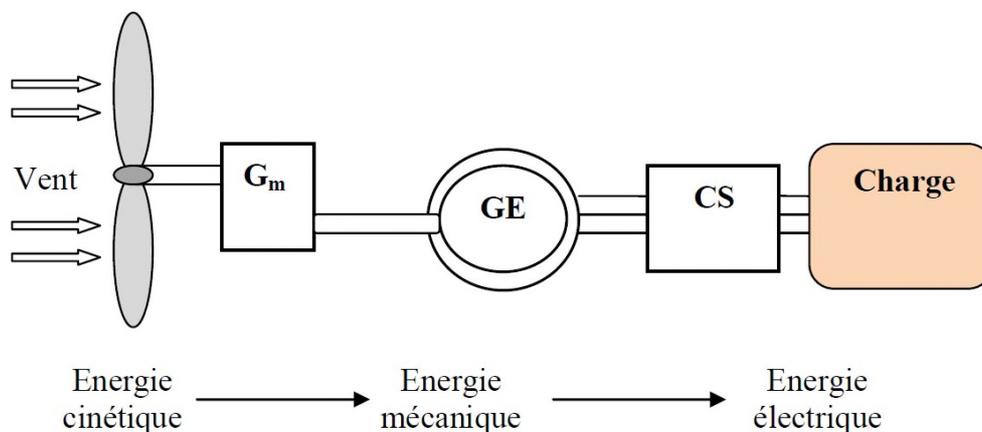


Figure 7: Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

G_m : Multiplicateur de vitesse

CS : Convertisseur statique

GE : Génératrice électrique

Cette conversion se fait en trois étapes telles que montré sur la figure (I.9):

- Les pales extraient une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

- La génératrice électrique reçoit l'énergie mécanique et la convertit ensuite en énergie électrique, qui sera ensuite transmise au convertisseur statique.
- Le convertisseur statique, qui est en général placé entre le générateur électrique et la charge, adapte l'énergie électrique fournie par le générateur à la charge. Cette dernière peut être une résistance, un moteur, une pompe ou un réseau de distribution d'énergie électrique.

I.2.3 Machines électriques dans les aérogénérateurs

Il existe plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur. On peut citer :

- ❖ **Génératrices asynchrones à cage (GAS) :** La plupart des applications destinées à un fonctionnement en moteur utilisent la machine asynchrone, grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteur ou de contacts glissants sur des bagues. La machine asynchrone fonctionnant en génératrice est obtenue lorsqu'elle tourne à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme. Pour les aérogénérateurs ayant une grande puissance et un rayon de pales important, la vitesse de rotation est peu élevée, il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée.
- ❖ **Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA) :** Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance. Le convertisseur de puissance connecté au rotor (coté rotor) partage un bus de tension continue avec un second convertisseur identique connecté au réseau électrique (coté réseau) via un transformateur. C'est le convertisseur coté rotor qui permet d'imposer les courants nécessaires afin de contrôler les puissances actives et réactives. La tension du rotor étant généralement différente de celle du stator, un transformateur est nécessaire afin d'adapter les différents niveaux de tension.
- ❖ **Génératrices synchrones (GS) :** Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés de production d'électricité par éolien. Les machines synchrones ne sont pas soumises à la condition d'une vitesse de seuil pour fonctionner en génératrice.

Lorsque la machine est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau, en conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations des couples captés par l'aérogénérateur atteignent la puissance électrique produite, donc il n'est pas possible de les connecter directement au réseau que par l'intermédiaire de convertisseurs statiques. Certaines machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotations et peuvent alors être directement couplées à l'aérogénérateur, elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents. Les systèmes de conversion basés sur des MSAP à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse, ce mode de transmission de puissance (transmission directe) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé.

I.2.4 Les avantages et les inconvénients des générateurs éoliens

❖ Avantages

- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO₂.
- ✓ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- ✓ Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires [15].

❖ Inconvénients

- ✓ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- ✓ Le bruit diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs [15].

I.3 Les convertisseurs statiques

Les convertisseurs sont les appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative.

I.3.1 Convertisseur DC/DC (hacheur)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée[3].

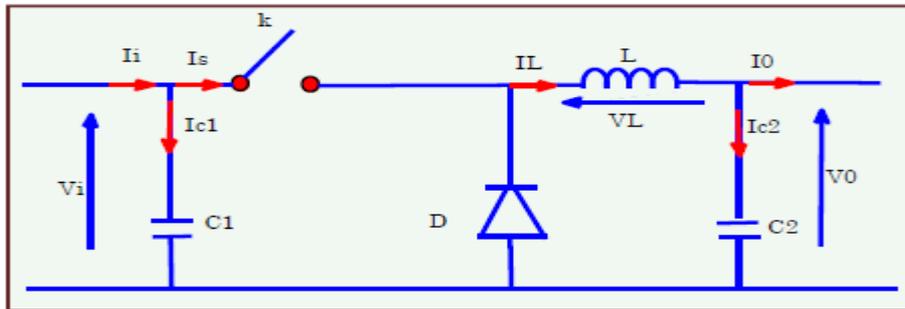


Figure 8: Convertisseur DC/DC Hacheur.

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite [3].

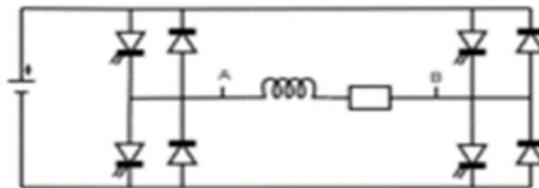


Figure 9: Convertisseur DC/AC Onduleur

I.3.2 Convertisseur AC/DC(Redresseur)

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général durés eau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi-continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu [3].

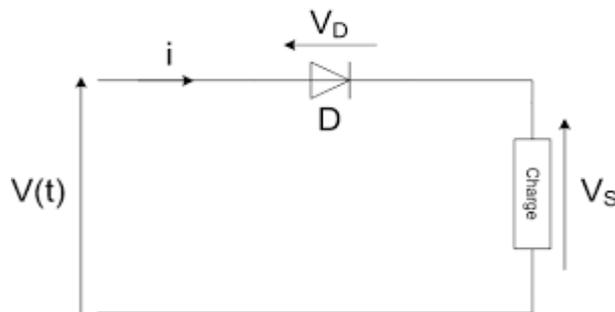


Figure 10: Convertisseur AC/DC Redresseur.

Systèmes électriques hybrides SEH

Un système hybride à sources d'énergies renouvelables (SHSER) est un système Electrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage [16]. Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge. La combinaison de plusieurs sources d'énergies renouvelables permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique qu'économique [17].

Toutes ces composantes peuvent être connectées en différentes architectures, celles-ci sont résumées dans la figure (12). Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides contiennent deux bus : un bus a CC pour les sources, les charges à CC et les batteries, un bus à CA pour les générateurs a CA et le système de distribution.

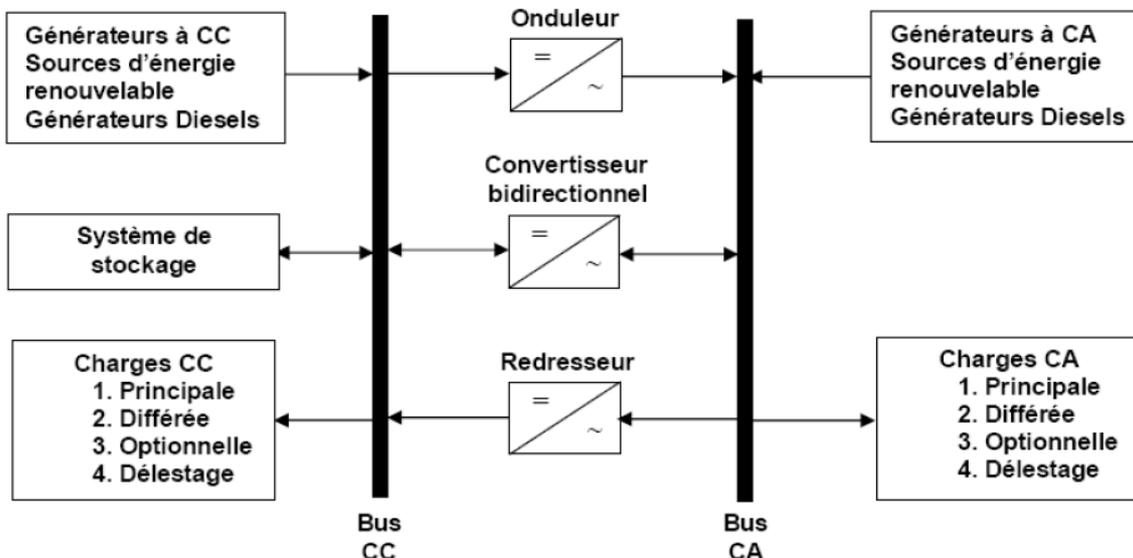


Figure 11: Architecture des systèmes hybrides d'énergie [17].

I.3.3 Configuration du bus dans les systèmes hybrides

Les générateurs électriques d'un Système Hybride peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient à énergie renouvelable pure, non renouvelable pure ou mixte. Deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybride constitués de sources d'énergie renouvelable sans stockage [18].

I.3.3.1 Architecture à bus continu CC

Dans le système hybride présenté dans la figure (12), la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (CA) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en suite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur

pour alimenter les charges alternatives. L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu [19].

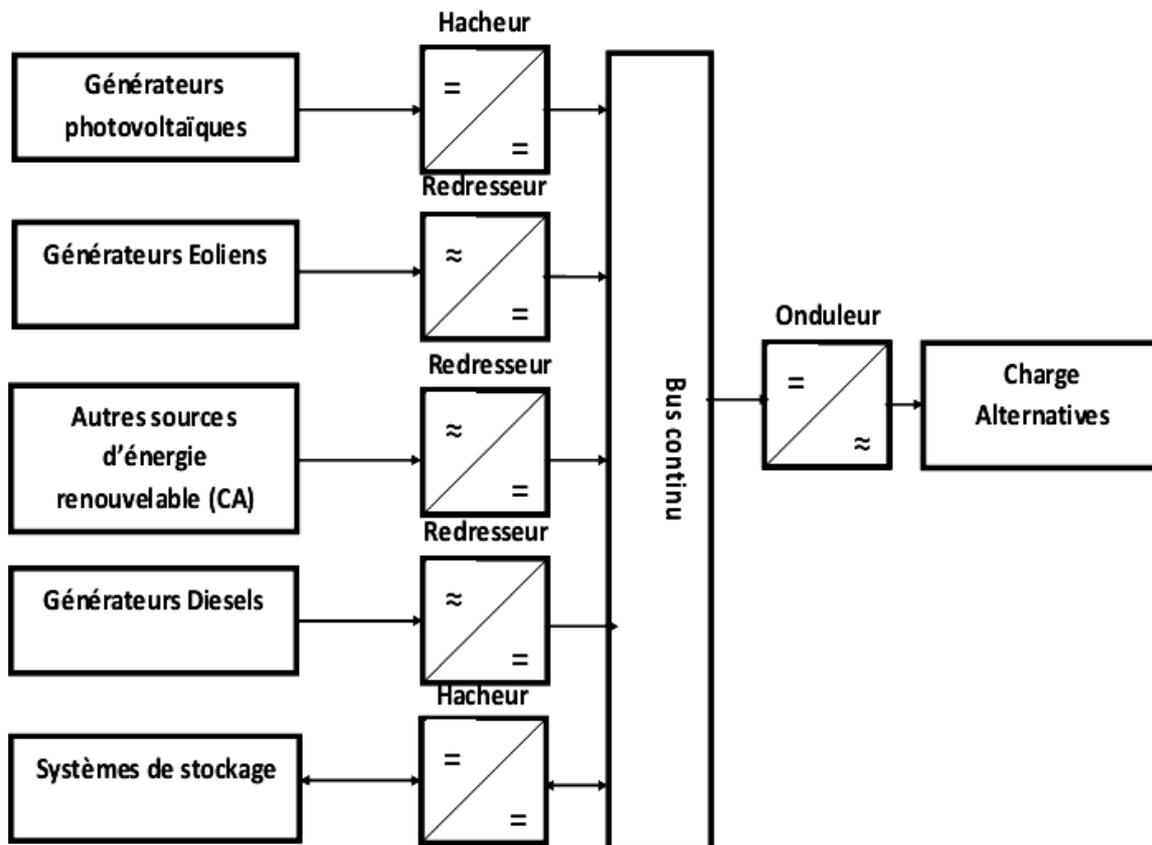


Figure 12: configuration du système hybride à bus continu [19].

I.3.3.2 Architecture à bus alternatif AC

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montré sur la figure (I.15). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs, Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [17].

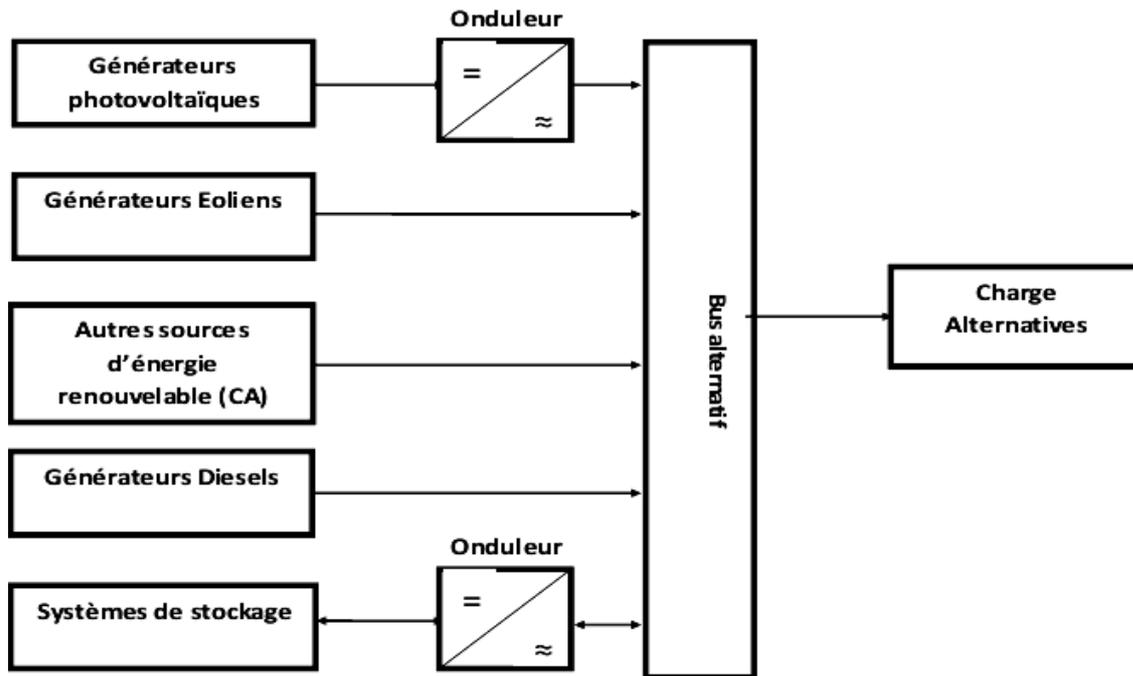


Figure 13: configuration du système hybride à bus alternatif [17].

I.3.4 Les avantages et les inconvénients d'un système hybride

✓ Avantages

- Flexible, extensible et Capable de satisfaire des charges évolutives.
- Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduite.
- Non dépendant d'une seule source d'énergie [20].

✓ Inconvénients

- Coût de capital élevé comparé aux générateurs diesel.
- Plus complexe que les systèmes électriques isolés, nécessite le stockage de batterie et le conditionnement de l'électricité
- Pas encore entièrement en production commerciale et peu de fournisseurs [20].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des définitions et identités des énergies photovoltaïque et éolienne et identifier leurs types et modes de fonctionnement, nous avons aussi mentionné certains avantages et inconvénients de ces deux types.

A travers ce chapitre aussi, nous avons présenté quelques différents types de convertisseurs. On a ensuite présenté c'est quoi un système hybride et de quoi se constitue comme on a cité ses différents avantages et inconvénients. Dans le prochain chapitre nous allons modaliser un système hybride PV-éolien avec ses éléments.

I. Introduction

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge. Le stockage d'énergie présente un grand intérêt stratégique et économique dans les conditions du marché libéralisé d'électricité, parce qu'il contribue à la capacité de satisfaire les besoins énergétiques en temps réel et aussi à prévenir les coupures dans l'approvisionnement. Dans ce chapitre nous allons dimensionner notre système étudié afin de connaître la taille des générateurs éolien et photovoltaïque.

I.1 Système hybride étudié

Le système hybride illustré dans la figure (15), comprend un sous-système photovoltaïque de 13 panneaux photovoltaïques branchés en parallèle et 2 en séries avec des boost pour filtrer la tension pour permettre avoir une tension et le courant plus stable qui permet d'alimenter une charge de 5.162 kW. Un système éolien associé à un système de délestage. Le système éolien est constitué d'une turbine éolienne tripale qui assure la conversion de l'énergie du vent en électricité et d'une génératrice synchrone à aimants permanents associé à un redresseur. Les deux sources d'énergie sont reliées à un bus continu branché à travers un onduleur monophasé de 220V qui alimente une charge de 5.162kW.

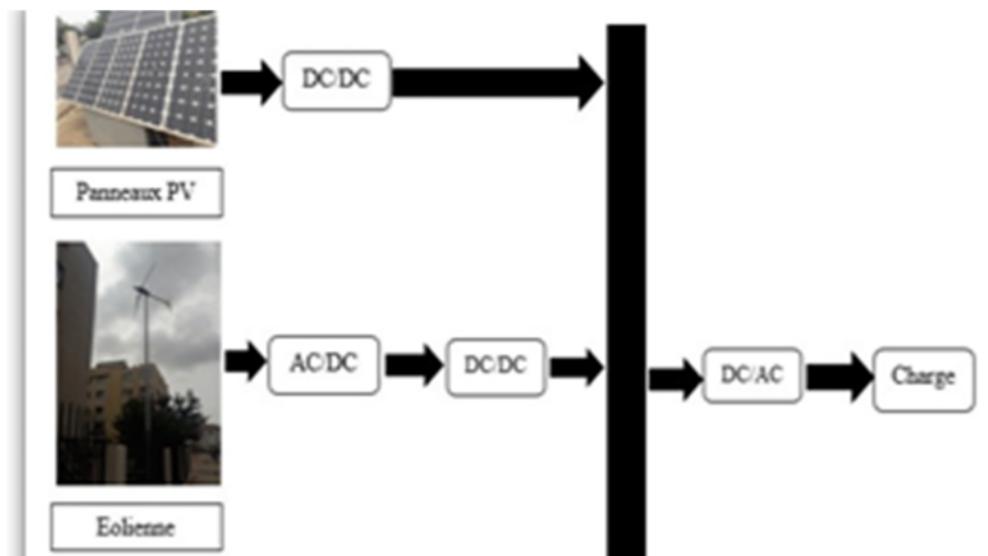


Figure 14: Système hybride étudié.

I.2 Dimensionnement du système hybride

Dans les installations hybrides, les concepteurs doivent combiner entre l'énergie et les systèmes de stockage pour :

- Assurer la continuité de production pour couvrir le besoin consommation. Garantir le coût minimal de l'énergie consommée par les utilisateurs.
- Pour le dimensionnement, il s'agit de déterminer la puissance et la capacité des différents composants. Pour éviter le manque d'énergie et satisfaire la charge à tout moment. Ce dimensionnement dépend des conditions météorologiques du lieu d'installation.

En effet, nous devons faire un dimensionnement de chaque élément en termes de puissance et de capacité afin d'assurer une alimentation permanente de la charge, tout en obtenant une énergie à moindre coût.

- de l'estimation du flux global d'irradiation solaire sur un plan incliné

Les panneaux solaires peuvent être installés sur le sol ou sur la toiture, orientés vers la direction la plus ensoleillée, pour Bejaia ils sont orientés vers le sud et l'écart des zones ombragées. Ils devraient présenter un angle de telle sorte que la surface de captation soit perpendiculaire au rayonnement solaire.

I.2.1 L'énergie produite par le générateur photovoltaïque

Elle est estimée à partir des données de l'irradiation globale sur un plan incliné, de la température ambiante et des caractéristiques du panneau PV utilisé. L'énergie électrique produite par un panneau photovoltaïque est donnée par :

$$E_{pv} = \eta_{pv} * S_{pv} * E_{irr} \quad (II.1)$$

Où:

S_{pv} : la surface totale du panneau PV en (m²)

η_{pv} : le rendement du panneau PV

E_{irr} : l'irradiation solaire sur un plan incliné en (kWh/m²)

L'énergie produite par le générateur éolien.

L'énergie produite par le générateur éolien est exprimée par:

$$E_{\text{éol}} = P_{\text{éol}} * \Delta_t = P_{\text{éol}} * (24 * N_{\text{jours}}) \quad (II.2)$$

Avec :

$E_{\text{éol}}$: L'énergie de la génératrice l'éolien

$P_{\text{éol}}$: La puissance de l'éolien

Δ_t : Le temps de fonctionnement du pal

Le générateur éolien récupère qu'une partie de cette puissance du vent et qui représente la puissance produite par le générateur éolien, elle est calculée par l'équation suivante

I.2.2 Méthodes de dimensionnement du système hybride

L'étape de dimensionnement d'un système est très importante, car elle permet de déterminer sa taille d'une manière optimale. Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement

- La méthode de la probabilité d'erreur dans la consommation
- La méthode du mois le plus défavorable
- La méthode de la moyenne mensuelle

Nous allons utiliser la méthode basée sur la moyenne mensuelle annuelle de l'énergie totale incidente.

L'énergie mensuelle produite par le système par unité de surface est notée par E_{pv} , Pour le panneau PV et $E_{éol}$, pour l'éolienne ($m=1 \dots 12$ représente le mois de l'année).

On estime la quantité d'énergie mensuelle produite durant une période critique, nommée le mois le plus défavorable, ce dernier est en fonction de la charge mensuelle, des ressources climatiques et des performances des composants du système.

La surface du générateur nécessaire pour assurer la couverture totale de la charge durant le mois le plus défavorable est donnée par:

$$S_{PV} = \max \frac{E_{ch,m}}{E_{pv,m}} \quad (\text{II. 1})$$

$$S_{éol} = \max \frac{E_{ch,m}}{E_{éol,m}} \quad (\text{II. 2})$$

L'énergie totale produite par le GPV et le générateur éolien pour alimenter la charge est donnée par:

$$E_{ch} = S_{PV} \cdot E_{PV} + S_{éol} E_{éol} \quad (\text{II. 3})$$

Avec

$$S_{PV} = f \left(\frac{E_{ch}}{E_{pv}} \right) \quad (\text{II. 4})$$

$$S_{éol} = (1 - f) \left(\frac{E_{ch}}{E_{éol}} \right) \quad (\text{II. 5})$$

Où

(f) représente la fraction de la charge alimentée par la source PV et (1-f) par la source éolienne. La valeur limite $f=1$ indique que la charge est alimentée que par le GPV, quant à $f=0$ correspond à une alimentation 100% éolienne.

Dans cette méthode, la taille des générateurs PV et éoliens est tirée des valeurs moyennes annuelles et chaque contribution nommée, $E_{pv moy}$ et $E_{éol moy}$ (pour un mois). De la même façon, la charge est représentée par la valeur moyenne mensuelle annuelle $E_{ch moy}$.

Par conséquent, les surfaces des deux générateurs PV et éolien sont données respectivement par:

$$S_{PV} = f \left(\frac{E_{ch moy}}{E_{pv moy}} \right) \quad (II.6)$$

$$S_{éol} = (1 - f) \left(\frac{E_{ch moy}}{E_{éol moy}} \right) \quad (II.7)$$

Le nombre de panneaux PV et éolien sont déterminés par les relations suivantes :

$$N_{pv} = ENT \left(\frac{S_{pv}}{S_{pvu}} \right) \quad (II.8)$$

$$N_{éol} = ENT \left(\frac{S_{éol}}{S_{éolu}} \right) \quad (II.9)$$

Après avoir calculé le nombre et la surface des panneaux et des éoliennes, nous allons recalculer la surface retenue de ces derniers, données par :

$$S_{PVret} = N_{PV} \cdot S_{PVu} \quad (II.10)$$

$$S_{éolret} = N_{éol} \cdot S_{éolu} \quad (II.11)$$

Ainsi recalculer l'énergie moyenne de la charge, appelée l'énergie retenue, donnée par :

$$E_{ch moyret} = E_{pv moy} \cdot S_{PVret} + E_{éol moy} \cdot S_{éolret} \quad (II.12)$$

I.3 Application

On veut faire une application d'un système hybride (PV-éolien) pour une maison autonome dans la région de Bejaïa ayant les coordonnées géographiques ci-dessous. On propose des caractéristiques de panneaux et éoliennes suivantes :

I.3.1 Les paramètres du panneau utilisé

On a utilisé des panneaux Sharp (NE-165 u1) :

Tableau II.1 : Les paramètres du Sharp (NE-165 u1)

Désignation	Valeur
La puissance max (W)	165 W
La tension de court-circuit (Voc)	43.1 V
La tension max (Vmp)	34.6 V
Coefficient de température (Voc)	-0.353995 (%/ deg. °C)
Nombre de cellule (Ncell)	72
Le courant de courts circuits (Isc)	5.46 A
Le courant maximal (Imp)	4.77 A
Coefficient de température (Isc)	0.062256(%/ deg. °C)
Le courant générer	5.263 A
La saturation de la diode	1.4196 e-10 A
Facteur idéal de la diode	0.95993
Rendement	15%
Surface	1.3 m ²

I.3.2 Les paramètres de la turbine

Le tableau au-dessous représente les caractéristiques de la turbine utilisée :

Tableau II.2 : Caractéristiques de la turbine utilisée

Désignation	Valeur
Puissance mécanique nominal (Pmec)	8 KW
Puissance électrique (Pele)	8.8 (Kva)
Vitesse nominale de la génératrice	12 m/s
Rendement maximal de la génératrice	0.85
Surface	3.46 m ²

I.3.3 Les données et les calculs

Le tableau ci-dessous représente la localisation de notre site :

Tableau II.3 : les données géographiques de lieu

Caractéristique	Longitude	Latitude	Altitude
Lieu de Bejaïa	5.067 N	36.75 E	153.4 m

L'estimation de l'énergie journalière consommée par les différents équipements du domicile, représentée dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : le besoin journalier de site étudié

Type de la charge	Puissance(W)	Nombre d'élément	Durée d'utilisation (h)	Consommation journalière (Wh/jour)
Lampe	25	8	3	600
Mixeur	200	1	1	200
Télévision	200	1	4	800
Réfrigérateur	100	1	24	2400
Chargeur mobil	5	5	1	25
Micro portable	30	1	3	90
Micro-onde	700	1	1	700
Modem wifi	6	1	7	40
Radio	5	1	1	5
Machine à laver	300	1	1	300
Besoin journalier total				5162

Les valeurs du dimensionnement du system hybride selon la méthode des moyennes mensuelles annuelles sont calculées par les relations donnes ci-dessus. Le tableau qui suite montre la production énergétique mensuelle des composants du système hybride pour satisfaire une charge journalière de 5162 Wh/j en utilisant l'irradiation mensuelle et la vitesse du vent moyenne mensuelle dans une région de Bejaïa.

Tableau II.5 : la production énergétique mensuelle des composant de système hybride

$E_{irr}(kW/m^2)$	$V_{vent}(m/s)$	E_{PV} (kWh/m ²)	$E_{\text{éol}}$ (kWh/m ²)	E_{ch} (kWh)	S_{pv} (m ²)	$S_{\text{éol}}$ (m ²)
160	3.06	31.2	29.146		12	13
162	3.03	31.59	28.297		11	13
186	4.72	36.27	106.966		23	8
185	4.17	36.027	73.761		18	9
195	4.17	38.025	73.761		18	9
190	3.89	37.05	59.878		16	10
200	4.44	39	89.037		20	9
202	4.44	39.39	89.037		19	9
193	4.72	37.635	106.966		23	8
180	3.89	35.1	59.878		16	10
157	3.61	30.615	47.856		15	10
150	5	29.25	127.155		32	8
Moyenne Mensuelle		31.93125	73.3115	309.0284	10	5

Le tableau ci-dessous illustre les différentes configurations possibles du couplage du système photovoltaïque, avec le système éolien.

Tableau II.6 : dimensionnement d'un SEH

F	$S_{pv,new}$ (m ²)	$S_{\text{éol},new}$ (m ²)	N_{pv}	$N_{\text{éol}}$	$S_{pv,ret}$ (m ²)	$S_{\text{éol},ret}$ (m ²)	$E_{ch,moy}$ (kWh)
0	0	4.16	0	2	0	6.92	/
0.1	0.96	3.74	1	2	1.3	6.92	61.44
0.2	1.93	3.328	2	2	2.6	6.92	210
0.3	2.9	2.912	3	1	3.9	3.46	81
0.4	3.87	2.496	3	1	3.9	3.46	180
0.5	4.83	2.08	4	1	5.2	3.46	290
0.6	5.8	1.66	5	1	6.5	3.46	285
0.7	6.77	1.248	6	1	7.8	3.46	325
0.8	7.74	0.83	6	1	7.8	3.46	325

0.9	8.7	0.416	7	1	9.1	3.46	262
1	9.677	0	8	0	10.04	0	/

Selon le besoin, la configuration (6, 1) est la meilleure à opter.

A travers ce tableau on constate qu'on aurait besoin de six panneaux et une éolienne dans notre système.

I.3.4 Dimensionnement de l'onduleur

L'onduleur a un rôle primordial dans une installation photovoltaïque autonome, il intervient comme étage d'adaptation entre les régulateurs de charge dont le courant de sortie est de type continu et la charge de consommateur dans le courant doit être de type alternatif. [23]

Pour effectuer un choix idéal de ce dispositif, on doit respecter les compatibilités suivantes :

I.3.4.1 Compatibilité en tension

Le nombre minimum et le nombre maximum de modules en série se calculent selon les équations suivantes :

$$N_{PVs-min} = Ent \left[\frac{V_{mpp-min(ond)}}{V_{mpp} * 0.85} \right] \quad (II. 13)$$

$$N_{PVs-max} = Ent \left[\frac{V_{mpp-max(ond)}}{V_{mpp} * 1.25} \right] \quad (II. 14)$$

Avec :

$N_{PVs-min(ond)}$: La valeur minimale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne.

$N_{PVs-max(ond)}$: La valeur maximale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne. V_{mpp} : Les coefficients 0.85 et 1.25 sont des coefficients de minoration permettant de calculer la tension MPP à 70C L'onduleur est caractérisé par une tension d'entrée maximale admissible V_{DC-max} . La tension délivrée par le groupe photovoltaïque ne devra en aucun cas dépasser cette valeur.

a) Calcul de la tension délivrée par les modules (Vmax) :

$$V_{max} = 1.15 * N_{PVs-max} * V_{co} \quad (II. 15)$$

D'où :

V_{co} : La tension de circuit ouvert.

I.3.4.2 Compatibilité au courant

L'onduleur est caractérisé par une tension d'entrée maximale admissible en entrée. Ce dernier peut être calculé suivant cette équation :

$$I_{max} = 1.15 * I_{cc} * N_{ch} \tag{II.16}$$

Avec :

I_{max} : Courant maximal admissible par l'onduleur.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

N_{ch} : Nombre de chaine en parallèle.

I.3.4.3 Compatibilité en puissance

La puissance totale délivrée se calcule avec la formule suivante :

$$P_{tot} = N_{PVt} * P_c \tag{II.17}$$

Tels que :

$$P_{PV-tot} = N_{PVs-max} * N_{ch} * N_t \tag{II.18}$$

Les résultats :

Npv-max = 7 Npv-min = 5 Vmax=346.955 V Imax=12.558 A Ptot=960 Wc

I.3.5 Dimensionnement du convertisseur boost

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. La figure au-dessous représente le schéma électrique d'un convertisseur boost.

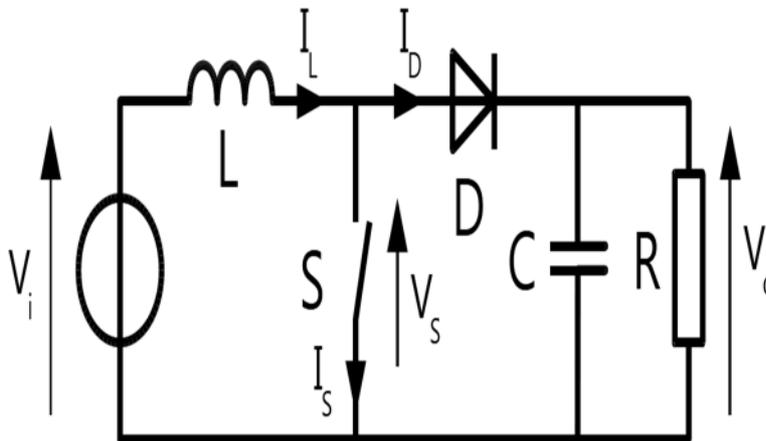


Figure 15: schéma électrique d'un convertisseur boost.

L'équation de lu condensateur est donnée par :

$$C = \left(\frac{I_o * D}{f_s * V_{ont}} \right) \tag{II.18}$$

Tels que :

$$1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} * \eta \tag{II.19}$$

Et celle de l'inductance est donnée par :

$$L = \frac{V_{in} * (V_{out} - V_{in})}{d_i * f_s * V_{out}} \quad (\text{II. 20})$$

On donne l'équation de la résistance par :

$$R = \frac{V_{out}}{I_0} \quad (\text{II. 21})$$

D'où :

V_{out} : La tension de la sortie.

V_{in} : La tension de l'entrée.

I_0 : Courant a la source.

f_s : La fréquence.

D : rapport cyclique.

η : Rendement du boost.

Les résultats de boost

$C = 0.00002 \text{ F}$ $L = 0.05 \text{ H}$ $R = 15 \text{ ohms}$ $D = 0.35$

I.3.6 Dimensionnement du filtre

Un filtre LC passe-bas est un circuit électronique qui atténue les hautes fréquences et laisse passer les basses fréquences. Il est composé d'une inductance et d'un condensateur pour créer une réactance variable en fonction de la fréquence du signal. L'inductance a une impédance élevée aux hautes fréquences, tandis que la capacité a une impédance faible. Cette différence d'impédance permet au filtre de bloquer ou d'atténuer les hautes fréquences. Le point de coupure du filtre dépend des valeurs de l'inductance et de la capacité. Cependant, les filtres LC passe-bas ont des limites, pouvant causer des distorsions et affecter la phase du signal, ce qui doit être pris en compte lors de leur utilisation [19].

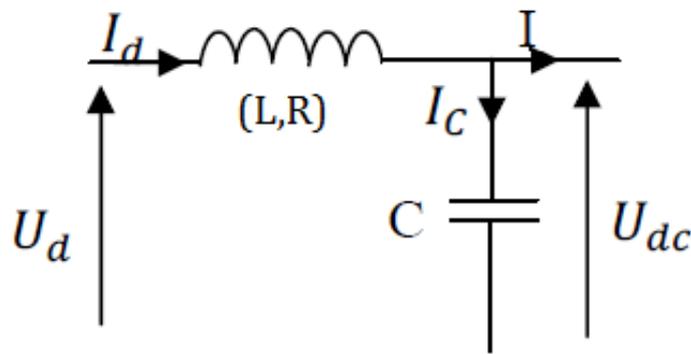


Figure 16: Schéma équivalent d'un filtre LC

- Equations filtre LC passe bas

Les courants dans le condensateur sont donnés par :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_{red} - I_{dc} \quad (II.22)$$

Considérons l'énergie stockée dans le condensateur est donnée comme suit :

$$W = \frac{1}{2} C \cdot V_{dc}^2 \quad (II.23)$$

Sa variation peut être exprimée comme suit :

$$\frac{dW}{dt} = C \cdot V_{dc} \cdot \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (II.24)$$

Nous obtenons l'équation d'équilibre des puissances suivante en multipliant par V_{dc} :

$$\frac{dW}{dt} = P_c - P_{ch} = \Delta P \quad (II.25)$$

P_c : Puissance active à la sortie du redresseur.

P_{ch} : Puissance active consommée par la charge.

À partir des équations (II.24) et (II.25), et pour une variation maximale de la tension continue la valeur du condensateur peut être approchée comme suit :

$$C_{max} \geq \frac{\Delta P \cdot \Delta T}{\Delta V_{dc-max} \cdot V_{dc}} \quad (II.26)$$

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le system étudié, et identifier les différentes méthodes du dimensionnement. A travers ce chapitre aussi, nous avons dimensionné tout un system avec ses éléments dans une maison de besoin journalier de 5.612 KW. Et designer les paramètres qui faut pour chaque élément dans ce système. Dans le prochain chapitre nous allons modéliser et simuler ce système hybride PV-éolien avec ses éléments, et discuter les résultats de simulation.

I. Introduction

Nous avons dimensionné dans notre chapitre précédent les composants de notre system étudié, afin de gérer le flux d'énergie entre ses composants une gestion sera appliquée. Dans ce chapitre on présentera la modalisation et la simulation de notre système étudié sur MATLAB.

I.1 Modélisation du panneau PV

Le modèle à une diode est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques

(Éclairement et température ambiante). Le modèle d'une des conditions climatiques (éclairage et température ambiante). Le modèle d'une cellule est celui de la figure ci-dessous :

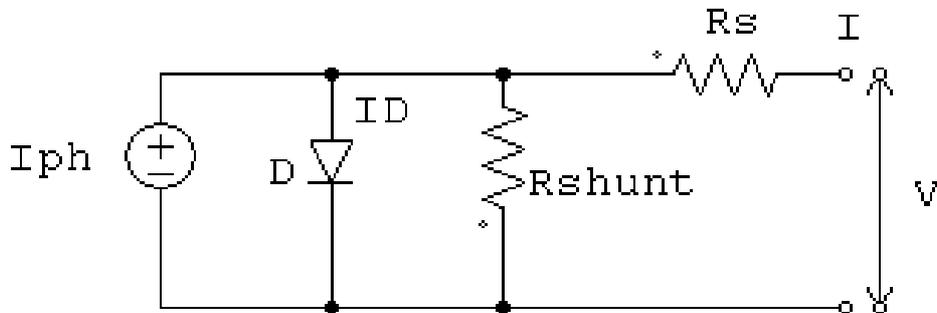


Figure 17 : Schéma électrique équivalent d'une cellule

A Partir de la figure récente la loi des nœuds nous permet décrire la relation suivante :

$$I_p = I + I_d + I_{sh} \tag{III.1}$$

Le courant de jonction I_d est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{q\left(\frac{V+R_s I}{n.k.T}\right)} - 1 \right) \tag{III.2}$$

Le courant dans la résistance sh est donnée par :

$$I_{sh} = \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{III.3}$$

A partir de l'équation 1 on obtient l'expression de courant de courant I :

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \tag{III.4}$$

En remplaçant dans 11 les courants I_d et I_{sh} par leurs expressions représentatives dans 2 et 3 on obtient :

$$I = I_p - I_0 \left(e^{q\left(\frac{V+R_s I}{n.k.T}\right)} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \tag{III.5}$$

Ou :

I : Courant de la cellule [A]

V : Tension de cellule [V]

I_p : Photo-courant de la cellule [A]

R_s : Resistance serie de la cellule [Ω]

R_{sh} : Resistance shunt de la cellule [Ω]

I_0 : Courant de saturation [A]

T : Température de la cellule [$^{\circ}\text{K}$]

Q : La charge de l'électron = $1.6 * 10^{-19}$ [C]

K : Constante de Boltzmann ($1.3854 * 10^{-2}$ [1/JK])

n : Facteur de non idéalité de la diode

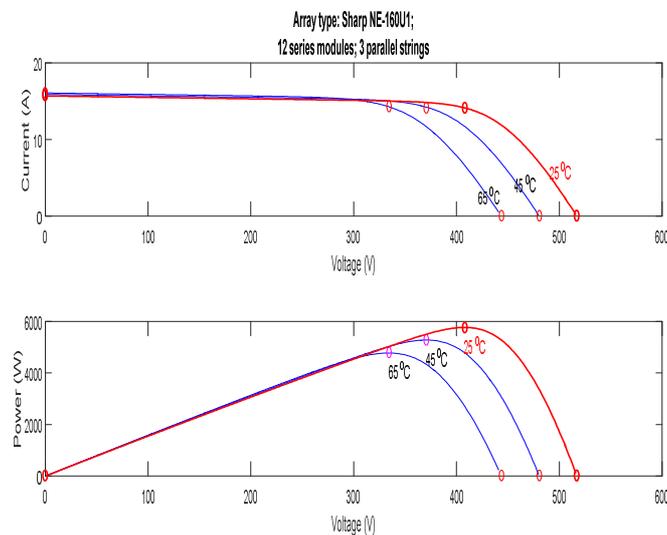


Figure18: Les caractéristiques du panneau photovoltaïque

I.2 Système de conversion PV

La figure (présente le schéma synoptique d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge. Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de réaliser l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est obtenu en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du MPPT (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...).

Cet étage d'adaptation utilise un algorithme MPPT qui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Parmi ces algorithmes de recherche du point à puissance

maximale, existant dans la littérature technique, nous citons : la méthode de Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O), de l'incrément de Conductance (IncCond) et par intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones). Dans notre travail nous avons opté pour la commande P&O, qui est aujourd'hui largement utilisée par sa facilité d'implémentation. Cette procédure présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi puisqu'elle doit être répétée périodiquement. Son principe et son algorithme de commande sont respectivement illustrés sur les figures (20 et 21).

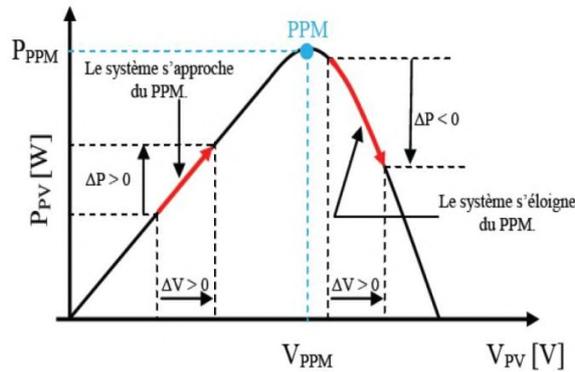


Figure19: Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par P&O

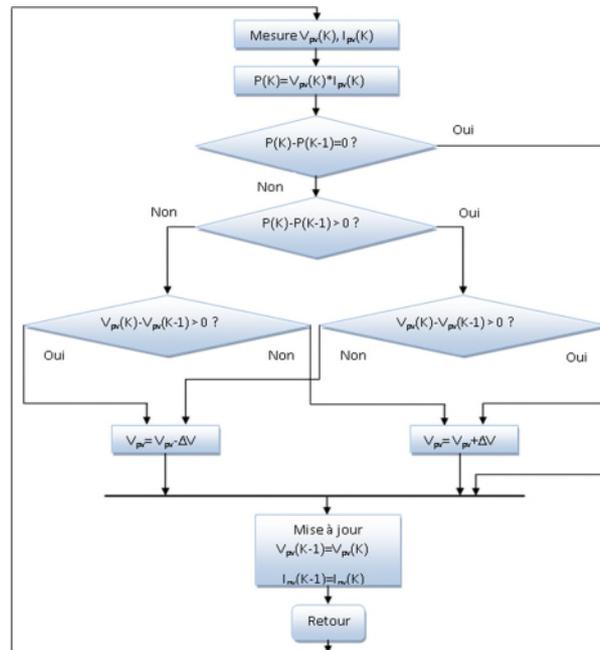


Figure20: Organigramme de la méthode P&O.

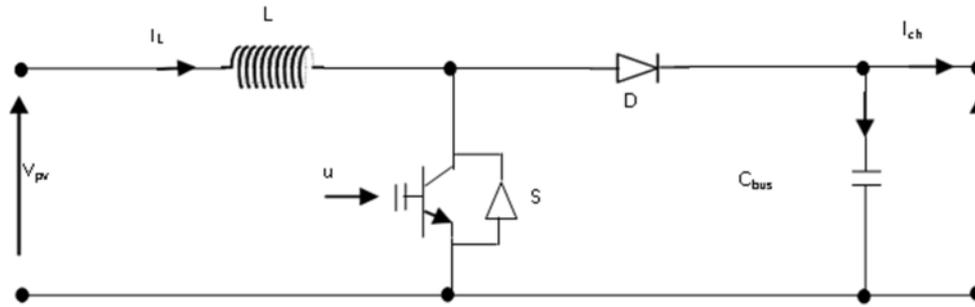


Figure21: schéma électrique du convertisseur élévateur DC/DC

Le convertisseur utilisé dans cette étude est de type DC /DC élévateur (boost). Son électrique équivalent est présenté par la figure

Le convertisseur est représenté par le système d'équation :

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1 - u) \quad (III.7)$$

$$(1 - u)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (III.8)$$

Ou

U: représente le rapport cyclique

I.3 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent

I.3.1 Hypothèse simplificatrice

La modélisation de la GSAP implique la création d'un modèle mathématique de la machine, qui traduit les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui gouvernent son fonctionnement. Cela permet d'examiner de manière précise le comportement des différentes variables à la fois en mode dynamique et statique, et d'utiliser ce modèle dans des simulations.

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases,
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- L'effet de peau et de la température est négligé.

I.3.2 La mise en équation de la MSAP

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes, d et q [22], [23].

Dans le repère conventionnel, il existe trois axes (a_s , b_s , c_s) alignés avec les enroulements statoriques de la machine. Généralement, l'axe a_s est utilisé comme référence pour les transformations ultérieures. Étant donné que les stators des machines asynchrones et synchrones sont similaires, les repères statoriques pour les deux types de machines sont identiques. En ce qui concerne les rotors, pour les machines asynchrones (MAS), il y a toujours trois axes (a_r , b_r , c_r) correspondant aux trois enroulements rotoriques, tandis que pour les machines synchrones à aimants permanents (MSAP), il y a un seul axe (F) correspondant à la direction d'aimantation. L'angle θ_r représente la position du rotor par rapport au stator.

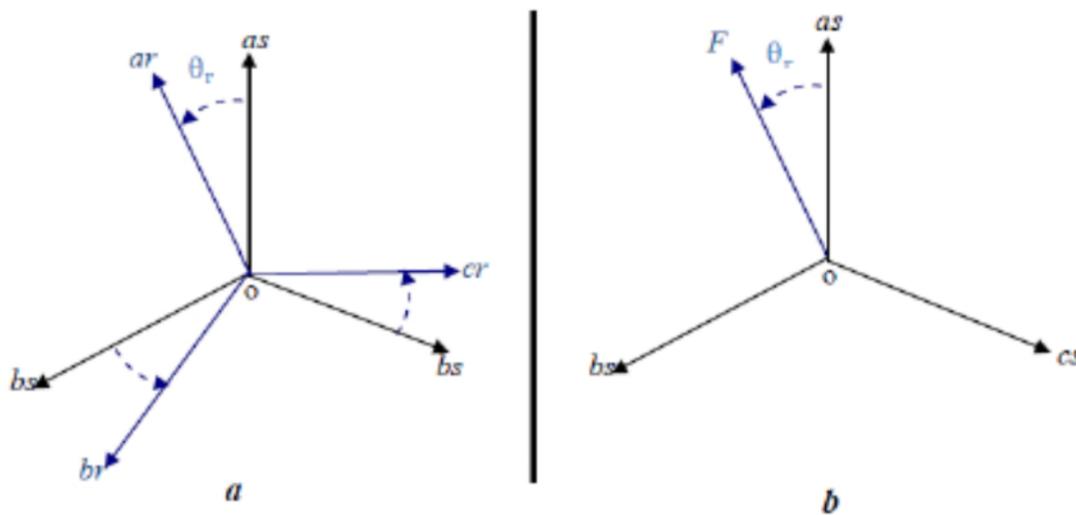


Figure22: a- machine asynchrone _ b- machine a aimant permanant

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante :

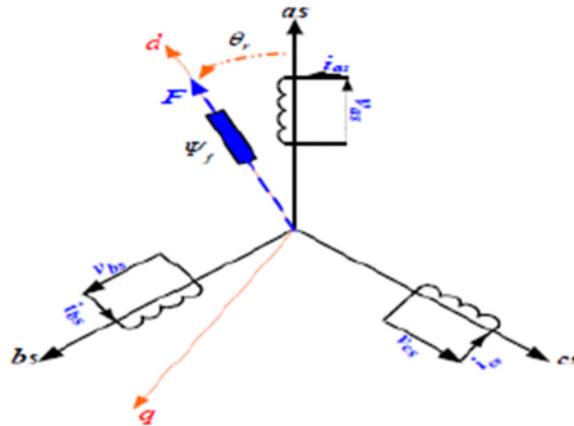


Figure23: Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)

I.3.2.1 Equations électriques

Les tensions des trois phases sont données par :

$$f \left\{ \begin{array}{l} V_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{array} \right. \quad \text{(III-9)}$$

Avec

$$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^t \quad \text{Vecteur tension des phases statoriques ;}$$

$$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^t \quad \text{Vecteur courant des phases statoriques ;}$$

$$[\varphi]_f = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t \quad \text{Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad \text{(III-10)}$$

Avec :

R_s : La résistance des phases statoriques. Ou bien on peut réécrire sous la forme suivante :

$$[V_s] = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt}[\varphi_s]_{abc} \quad (\text{III-11})$$

Ou :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances statoriques.} \quad (\text{III-12})$$

III.2.2.2. Equations magnétiques

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II-13})$$

Ou :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + L_{s1}(\theta) \quad (\text{III-13})$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_0 & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-14})$$

Où :

L_{s0} : Inductance propre d'une phase statorique

M_{s0} : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statoriques

$[\varphi_f]$: Flux des aimants permanents.

Et :

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III-15})$$

Avec :

θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

On peut réécrire le système (II-18) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \left\{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \right\} \quad (\text{III-16})$$

I.3.2.2 Equation mécanique

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f\Omega_g \quad (\text{III-17})$$

I.3.2.3 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park

La résolution du système d'équations matricielles présente une complexité excessive. Afin de réduire cette complexité, on recourt à des transformations pour passer d'un système triphasé (abc) à un système biphasé (d, q, o) en utilisant la transformation de Park. Dans notre étude, nous avons utilisé une version modifiée de la transformation de Park.

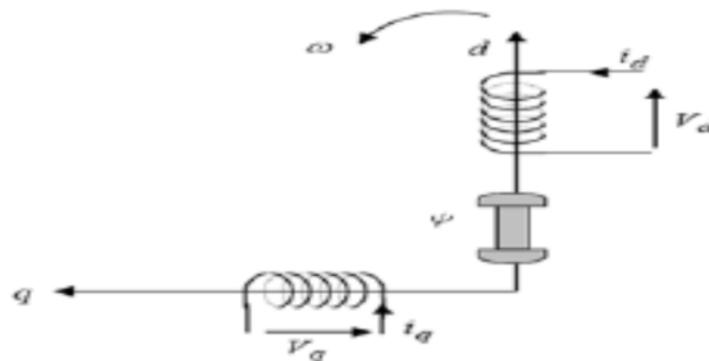


Figure24: Représentation de MSAP dans le repère (d, q)

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tournent avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tension, courants ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante [24] :

$$[\mathbf{V}_{dqo}] = [\mathbf{P}(\theta)[\mathbf{V}_{abc}]] \quad (\text{III-18})$$

$$[\mathbf{V}_{abc}] = [\mathbf{P}(\theta)^{-1}[\mathbf{V}_{dqo}]] \quad (\text{III-19})$$

Avec :

$\mathbf{P}(\theta)$ Et $\mathbf{P}(\theta)^{-1}$: Matrices de passage direct et inverse de Park qui conserve la puissance et assure le changement de variable. Elles sont données par les matrices suivantes :

$$[\mathbf{P}(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III-20})$$

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III-21})$$

$\mathbf{P}(\theta) = \mathbf{P}(\theta)^{-1} \theta$ C'est une matrice orthonormée

I.3.2.4 Equations électriques

Les équations de la MSAP dans le repère de Park sont :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_d = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_s + \frac{d\varphi_d}{dt} + p\Omega_{mec} \varphi_q \\ \mathbf{V}_q = \mathbf{R}_s \mathbf{i}_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + p\Omega_{mec} \varphi_d \end{cases} \quad (\text{III-22})$$

I.3.2.5 Equations magnétiques

Sur l'axe d, on a : $\varphi_d = L_d \mathbf{i}_d + \varphi_{sf}$ (III-23)

Où : φ_d Constante indiquant le champ dû à l'aimantation permanente du rotor.

Sur l'axe q, on a : $\varphi_q = L_q i_q$ (III-24)

Le système (II.24) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega_{mec} \varphi_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_{sd} p\Omega_{mec} \varphi_q + p\Omega_{mec} \varphi_{sf} \end{cases} \quad (III-25)$$

Le dernier système obtenu décrit le schéma équivalent de la MSAP dans le repère de Park comme il est illustré dans la figure précédente.

I.3.2.6 Couple électromagnétique

Le couple électromécanique C_{em} est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les F_{mm} dans l'entrefer généré par les courants statoriques [25].

Selon Park l'expression de la puissance produite ou consommée est la suivante :

$$P_a(t) = V_d i_d + V_q i_q \quad (III-26)$$

En remplaçant V_d et V_q par leurs expressions on aura :

$$P_a(t) = R_s (i_d^2 + i_q^2) + (i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (III-27)$$

Avec :

$R_s (i_d^2 + i_q^2)$: Représente la puissance dissipée en perte Joule dans les enroulements du stator ;

$i_d \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \frac{d\varphi_q}{dt}$: Montre la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements de stator ;

$\frac{d\theta}{dt} (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d)$: Indique la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$\omega = p\Omega_{mec} \quad (III-28)$$

Avec : ω pulsations électriques ;

Ω_{mec} vitesse de rotation de la machine (rotor).

$$C_g = p \left[\varphi_d i_q - \varphi_q i_d \right] \tag{III-29}$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire :

$$C_{em} = p \left[(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \varphi_{sf} \right] \tag{III.30}$$

Dans la suite de notre travail, on choisit le rotor à pôles lisses ($L_q = L_d$) et l'équation (III.31) devient :

$$C_g = p i_q \varphi_{sf}$$

I.4 Modélisation du bus continu

L'évolution de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif absorbé par le condensateur, elle est écrite alors comme suit:

$$I_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \tag{III. 32}$$

Avec I_c le courant qui traverse le condensateur

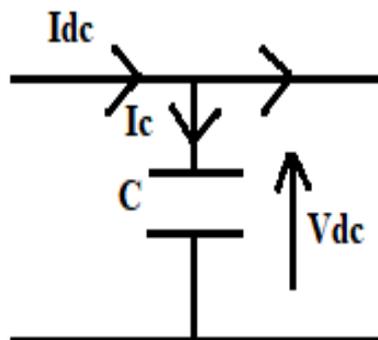


Figure25: Le bus continu V_{dc}

I.5 Modélisation de la turbine

Pour faire une simulation à la turbine, nous allons utiliser la relation du couple associé à la caractéristique $C_p(\lambda)$. Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p \cdot S \cdot \left(\frac{V_v^3}{G \Omega_t} \right) \tag{III. 33}$$

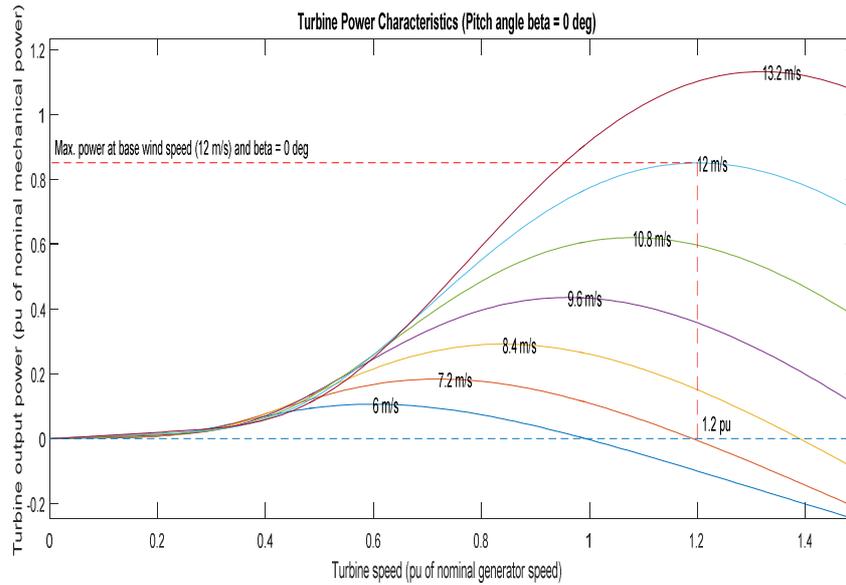


Figure26: les caractéristiques de la turbine

I.5.1 Modélisation du Cp

La courbe caractéristique de la voilure utilisée dans l'étude de ce système éolien est présentée dans la figure (29). La caractéristique (λ) qui est de forme parabolique admet un maximum C_{pmax} qui est le coefficient de puissance maximale et λ_{opt} est le rapport de la vitesse en bout des pales.

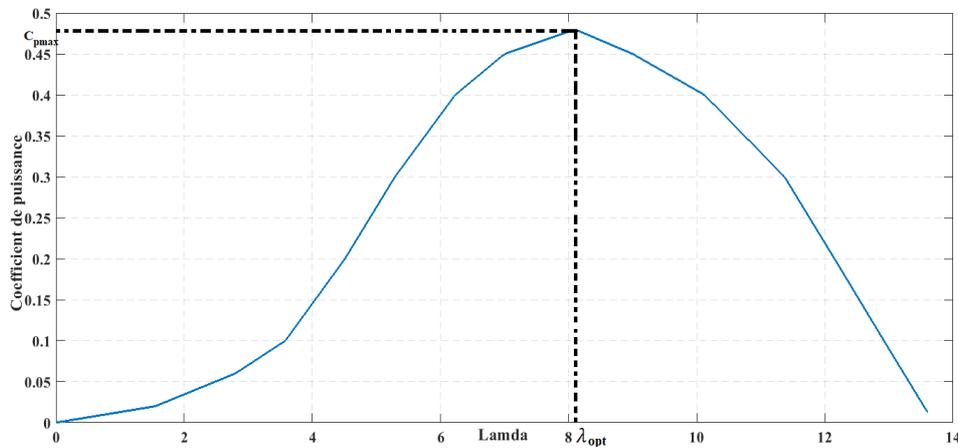


Figure27: Caractéristique Cp (λ)

I.5.2 Puissance récupérable par une éolienne

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme suivante: [12]

$$P_t = \frac{1}{2} \times C_p \times \lambda \times \pi \times R_t^2 \times V_v^3 \tag{III. 33}$$

Où:

C_p : Est le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine

(λ) : est la caractéristique propre de la turbine).

ρ : Est la masse volumique de l'air ($\rho=1,225\text{kg/m}^3$)

R_t : Le rayon de la surface balayée (m).

V_v : La vitesse instantanée du vent (m/s).

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent. Elle peut avantageusement s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique ou normalisée λ .

λ est le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent, comme la montre la figure (30) [12] :

$$\lambda = \frac{R_t * \Omega_t}{V_v} \quad (\text{III. 36})$$

Ω_t : est la vitesse angulaire de rotation de la turbine (rad/s).

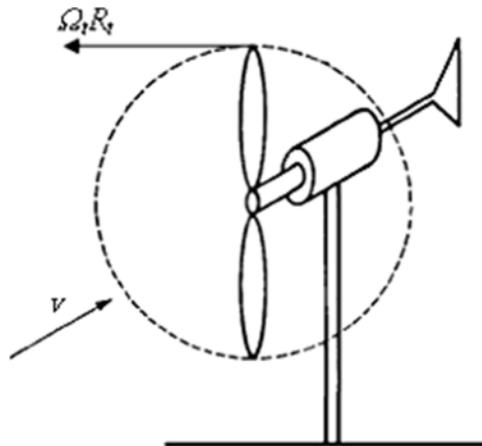


Figure28: Vitesse du vent (V_v) et vitesse tangentielle de l'aubage $R_t * \Omega$.

La figure (I.14) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1,2, 3 et 4 pales [13].

On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse normalisée λ , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.

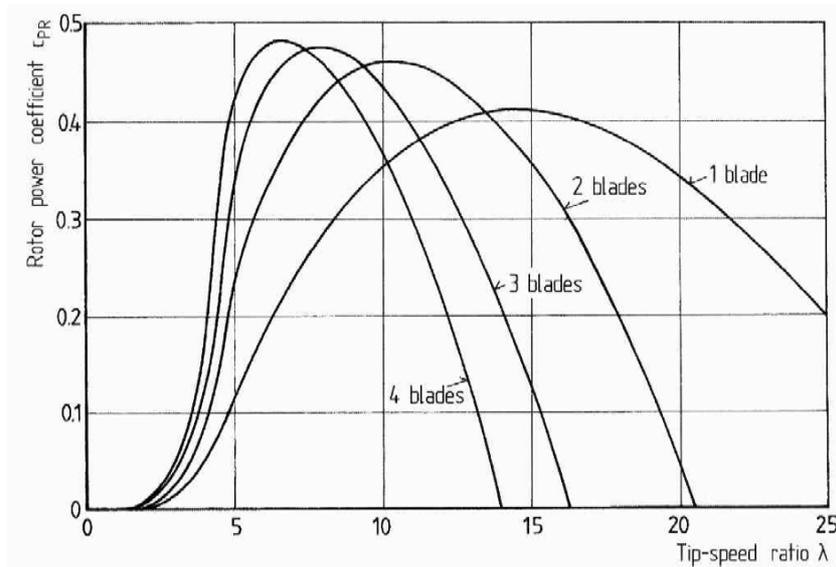


Figure29: Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée [13].

I.5.3 Régulation mécanique de la vitesse d’une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale à partir d’une vitesse du vent nominale (V_n). Pour des vitesses de vent supérieures à (V_n), la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d’éviter les surcharges mécaniques de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l’éolienne a été conçue.

Il y’a d’autres grandeurs dimensionnées :

(V_d) est la vitesse du vent à partir de laquelle l’éolienne commence à fournir de l’énergie et (V_M) est la vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l’éolienne doit être stoppée pour des raisons de sureté de fonctionnement [14].

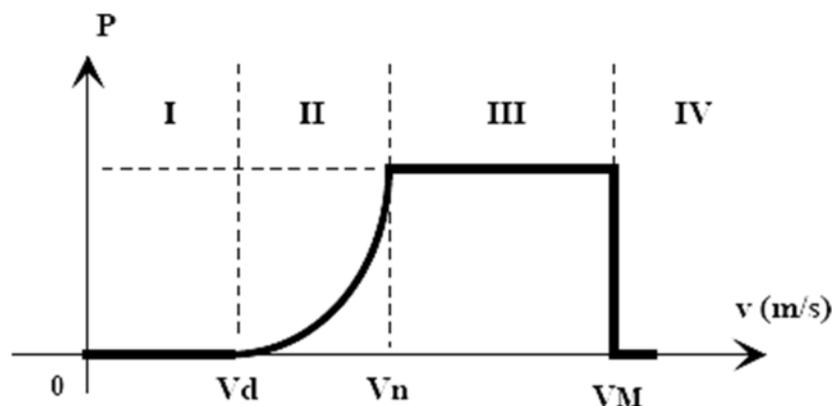


Figure30: Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent [14].

En fonction de la vitesse du vent, quatre zones peuvent être identifiées dans le fonctionnement d’une

Turbine éolienne tel que montré sur la figure (32):

Zone I : Pour des vitesses plus petites que la vitesse de démarrage, l’énergie du vent n’est pas suffisante pour entrainer la turbine et la puissance captée est nulle;

Zone II : Pour des vitesses supérieures à la vitesse de démarrage est inférieure à celle nominale (V_n), la puissance extraite augmente proportionnellement avec la vitesse du vent cubée. Cette zone correspond au régime de «charge partielle»;

Zone III : Pour des vitesses supérieures à la vitesse nominale (V_n), la puissance captée est limitée à celle nominale. Cette zone correspond au régime de «charge complète»;

Zone IV: Pour des vitesses supérieurs à la vitesse extrême d’opération, la turbine éolienne s’arrête, la puissance fournie s’annule.

I.6 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

La modélisation de l’éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pâles, du système mécanique de transmission, et du générateur électrique. Le schéma synoptique de la chaîne éolienne est présenté sur la figure (II.15). Il s’agit d’une turbine éolienne, d’une génératrice synchrone à aimants permanents, et d’un convertisseur statique.

Ce système alimente une charge autonome par l’intermédiaire d’un dispositif d’interconnexion.

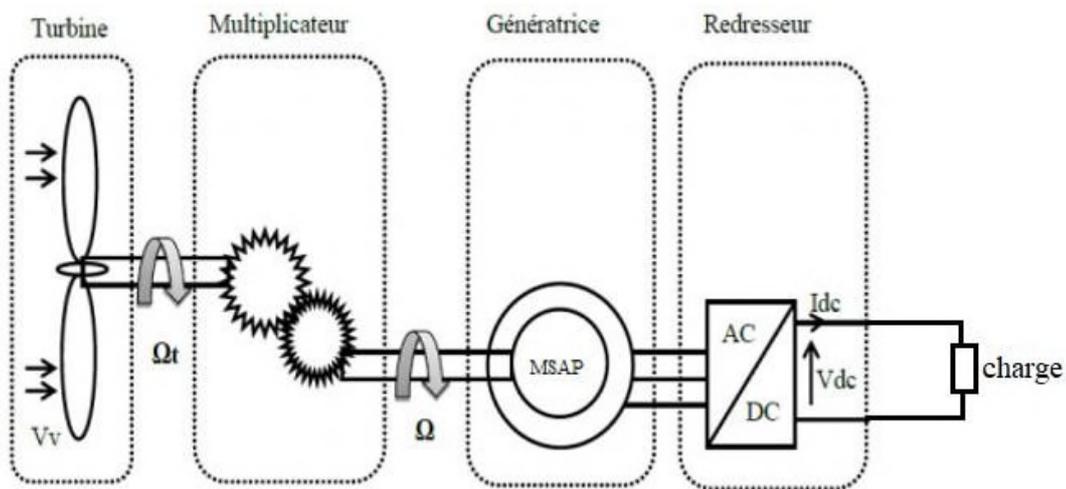


Figure31: Schéma synoptique de la chaîne éolienne

I.6.1 Modélisation du vent

La vitesse du vent est la grandeur d’entrée d’un système de conversion éolienne. Elle est souvent représentée sous forme d’une fonction scalaire temporelle : $V_v=f(t)$.

I.6.2 L’énergie produite par le générateur éolien

L’énergie produite par le générateur éolien est exprimée par:

$$E_{\text{éol}} = P_{\text{éol}} \cdot \Delta t = P_{\text{éol}} \cdot (24 \cdot N_{\text{jours}}) \tag{III.37}$$

Le générateur éolien récupère qu'une partie de cette puissance du vent et qui représente la puissance produite par le générateur éolien, elle est calculée par l'équation suivante:

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \times \rho \cdot s \cdot V_v \cdot \lambda \cdot C_p \tag{III. 38}$$

I.7 Modélisation du redresseur

Un redresseur, également appelé convertisseur alternatif-continu est un convertisseur destiné à alimenter une charge de type continu, qu'elle soit inductive ou capacitive à partir d'une source alternative. Son schéma est le suivant :

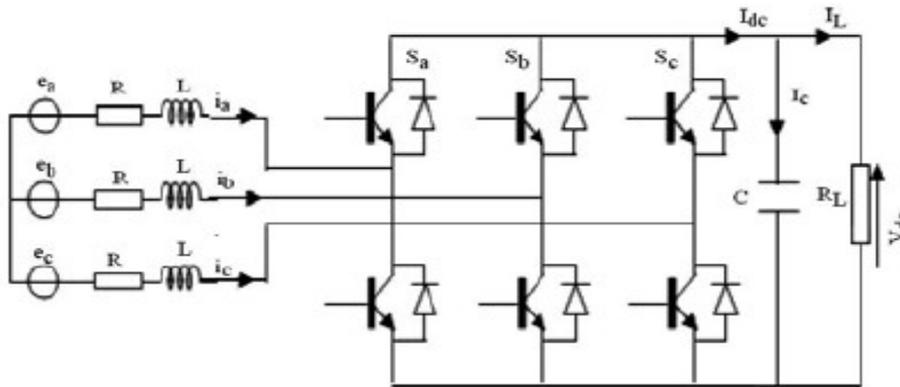


Figure32: Schéma du redresseur MLI

Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D3, D5) à anode commune assurant le passage du courant Id dans un sens, et trois diodes (D2, D4, D6) à cathode commune assurant le passage du courant Id dans l'autre sens. Si l'on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension [13].

$$\begin{aligned} V_1 &= V_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \\ V_2 &= V_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_3 &= V_m \cdot \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \tag{III. 39}$$

Et si on néglige l'effet d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suite :

$$U_{\text{red}} = \text{Max}(V_1, V_2, V_3) - \text{Min}(V_1, V_2, V_3) \tag{III. 40}$$

Cette tension est représentée par la figure 35 :

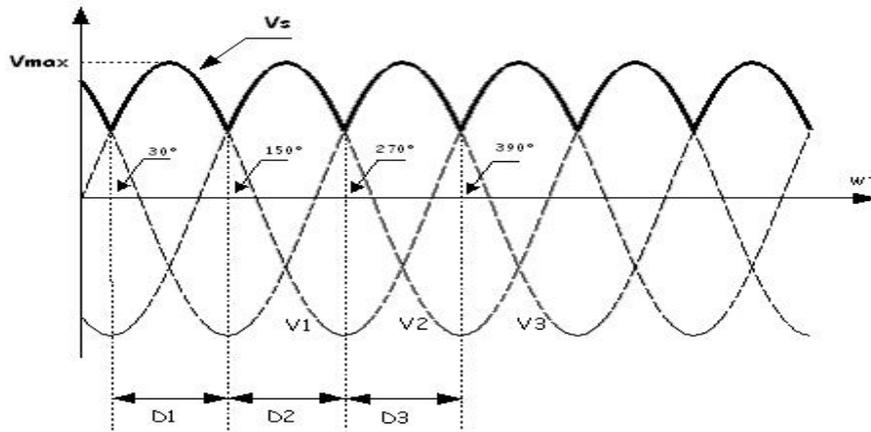


Figure33: Tension simple de phase et tension de sortie de redresseur

I.8 Modélisation du l'onduleur

Se composant d'une source de tension continue et des interrupteurs commandés avec un circuit composé de diodes l'onduleur monophasé dont La figure (II.18) montre le circuit équivalent.

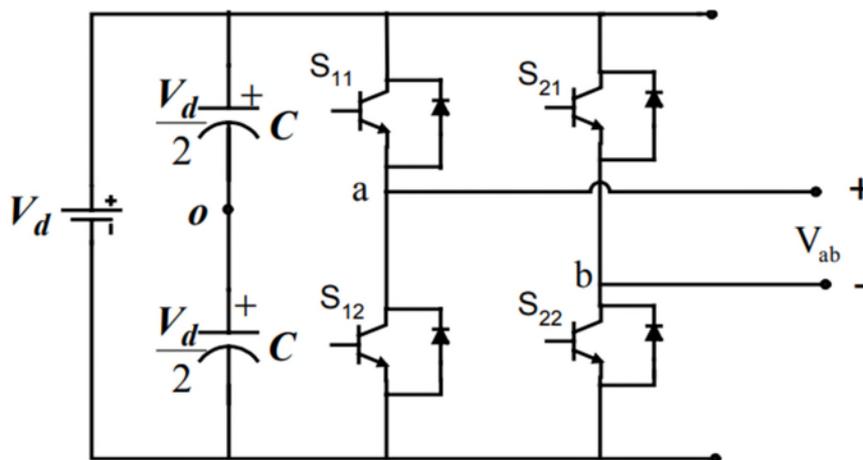


Figure34: Schéma d'un onduleur monophasé à pont complet.

$$\frac{V_{dc}}{2} (S_{11} - S_{12}) = V_{an} + V_{n0} = V_{a0} \tag{III. 41}$$

$$\frac{V_{dc}}{2} (S_{21} - S_{22}) = V_{bn} + V_{n0} = V_{b0} \tag{III. 42}$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \tag{III. 43}$$

Les tensions V_{an} et V_{bn} sont les tensions de sortie des phases A et B vers un point n arbitraire, V_{n0} est la tension neutre entre le point n et le point médian du réseau. Point arbitraire n, V est la tension neutre entre le point n et le point médian de la source de courant continu. La fonction de commutation des dispositifs peut être approximée par la série de Fourier de Fourier comme étant égale à $\frac{1}{2}(1 + M)$ où M est le signal de modulation qui, comparé à la forme d'onde triangulaire, produit les impulsions de commutation [21].

Ainsi, d'après les équations 41, 42 et 43, les expressions des signaux de modulation sont obtenues comme suit

$$M_{11} = \frac{2(V_{an} + V_{n0})}{V_{dc}} \quad (III.44)$$

$$M_{21} = \frac{2(V_{bn} + V_{n0})}{V_{dc}} \quad (III.45)$$

Les équations 44 et 45 donnent l'expression générale des signaux de modulation pour les convertisseurs DC/AC monophasés. Les différents types de schémas de modulation présentés dans la littérature peuvent être obtenus à partir de ces équations en utilisant les définitions appropriées pour V_{an} , V_{bn} et V_{n0} . En utilisant ce concept, différents schémas de modulation ont été proposés [22].

Insérer vos résultats de simulation ici

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons évalué les performances du système hybride, en prenant en compte les conditions météorologiques, les caractéristiques des panneaux solaires et des éoliennes, ainsi que les interactions entre ces deux sources d'énergie renouvelable.

CONCLUSION GENERALE

I. Conclusion générale

L'étude d'un système hybride photovoltaïque-éolien représente une approche prometteuse pour la production d'énergie renouvelable. Ce type de combine les avantages de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, ce qui permet une utilisation plus efficace et durable des ressources naturelles.

L'étude d'un système hybride PV-éolien implique une analyse approfondie de plusieurs aspects, tels que les conditions climatiques locales, la demande énergétique, les caractéristiques techniques des panneaux solaires et des éoliennes, ainsi que la stratégie de contrôle et de gestion de l'énergie. Cela nécessite une approche holistique et une planification minutieuse pour garantir des performances optimales.

Les avantages d'un système hybride PV-éolien sont nombreux. Tout d'abord, il permet une utilisation plus fiable de l'énergie, car il combine deux sources d'énergie renouvelable qui peuvent être complémentaires. Cela réduit les fluctuations de production dues aux variations climatiques offrant ainsi une stabilité accrue du système.

De plus, les systèmes hybrides PV-éolien permettent une utilisation plus efficace des ressources disponibles, en combinant les avantages de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne, il est possible de maximiser la production d'énergie tout au long de l'année, en exploitant les périodes de la production optimale de chaque source.

Un autre avantage important est la réduction de l'impact environnemental les systèmes hybride PV-éolien contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la diminution de dépendance aux combustibles fossiles, ce qui favorise la transition vers une économie à faible émission de carbone et la lutte contre le changement climatique.

Cependant, il est important de noter que l'étude d'un système hybride PV-éolien nécessite une évaluation rigoureuse des paramètres spécifique à chaque projet, tels que les conditions locales, la disponibilité des ressources et contraintes techniques. Chaque système doit être dimensionné et conçu de manière adaptée pour répondre aux besoins énergétiques spécifique et aux contraintes du site.

En conclusion, l'étude d'un système hybride PV-éolien représente une approche prometteuse pour la production d'énergie renouvelable, offrant des avantages tels que la fiabilité, l'efficacité et la réduction de l'impact environnemental. Ce type de système contribue à la transition vers une société plus durable et représente une solution prometteuse pour répondre à nos besoins énergétiques futurs de manière propre et responsable.

Références bibliographique

- [00] Adib, R., et al. Renewables 2015 global status. Paris : REN21 Secretariat, 2015.
- [01] M. MEZZAI, S. MOULODJI, «Contribution à l'étude d'un Systèmes de Pompage photovoltaïque» mémoire master II de l'université de Bejaia, 2014.
- [02] A. Labouret, M. Viloz, « Energie solaire photovoltaïque ». Le manuel du professionnel, édition DUNOD, août 2003, Paris (France).
- [03] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sadasy, « Le pompage photovoltaïque » Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Éditions Multi Mondes, 1998.
- [04] A. HAMIDAT, B. BENYOUCEF and T. HARTANI, « Small-scale irrigation with photovoltaic water pumping system in Sahara regions ». Renewable Energy, Vol. 28, pp. 1081-1096, 2003.
- [05] A. MOHAMMEDI « Etude d'un système de pompage ».
- [06] L. LAZARI, N. MEBARKI, « Etude d'un système photovoltaïque », Mémoire Master 2, de l'université de Bejaia, 2014
- [07] E. Golding, The generation of electricity by wind power, Haldsted Press, New York, 1976.
- [08] Le Gourrière, Désiré, Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations Paris, Editions Eyrolles, 1980.
- [09] S. Hamdouche, « Contribution à l'alimentation des structures de régulation des courants des machines à courant alternatif », Mémoire de Magister en Electromécanique, option Electronique de puissance, Université de Batna, Algérie, 2007.
- [10] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechnye, « éoliennes ». Technique de l'ingénieur, vol. BM4640, janvier 2011.
- [11] L. Menasri, I. Menasri, « étude d'un système Eolien Autonome basé sur une génératrice asynchrone avec stockage », Mémoire de fin d'études, option Electromécanique, Université de Bejaia. Algérie, 2008.
- [12] A. Miricki, « Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat de l'institut national de polytechnique de Toulouse France [2005].
Référence bibliographique
- [13] O. Gergoud, « Modélisation énergétique et optimisation économique associée à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan France [2002].

[14] B. Multon, « Etat de l'art des Aérogénérateurs Electriques », Techniques de l'Ingénieur, Ref D3960, Vol D7, 2004.

[15] H. KasbadjiMerzouk, « Evaluation du Gisement Energétique Eolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie », Thèse de doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université de Tlemcen, 2006.

[16] L. Styanov, « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables », Thèse de doctorat de l'université de technique de Sofia, 2011.

[17] Tiar Mourad, « commande optimale d'un système de génération photovoltaïque hybride », soutenue le 10-10-2011.

[18] M. Belhamel, S. Moussa et A. Kaabache, « Production d'électricité au Moyen d'un système hybride (éolien-photovoltaïque-diésel) », Revue des énergies Renouvelables, Zones Arides, 2002, PP-49-54.

[19] IonelVechui, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thème de doctorat de l'université du havre, soutenue le 15 décembre 2005.

[20] S.LALOUNI, « Etude, commande et simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-éolien) », Docteur en sciences de l'université de Bejaia 2009.

[21] HichemSemmoi «Conception d'un lien de communication pour BioMicroRobot» mémoire de fin d'étude de l'université de Sherbrooke.

[22] OussamaDzгла Tarek SayahLembarek « Etude par simulation de l'onduleur ».

[23] Cours des dimensionnements des systèmes PV autonomes (madame Rekioua)

Nomenclature

Abréviations

AC	Alternatif curant (courant alternatif)
BR	Boite de Raccordement
CESI	chauffe-eau solaire individuel
DC	Direct curant (courant continu)
ECS	Eau chaude sanitaire
HMT	Hauteur manométrique totale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation
STC	Conditions d'essais standards (Standard Test Conditions)

Symboles

B_j	Besoin journalier en énergie électrique	[Wh/j]
E_c	Énergie consommée journalière par un type d'appareil (Wh/j)	[Wh/j]
E_j	Énergie calorifique journalière	[kWh/j]
E_s	Ensoleillement	[W/m ²]
G_s	Énergie apportée par le soleil	[kWh/m ²]
h	Hauteur manométrique totale	[m]
I_B	Courant admissible	[A]
I_{mpp}	Courant au point de puissance maximum	[A]
I_{cc}	Courant de court-circuit.	[A]
j_{aut}	Nombre de jours d'autonomies	
L	longueur du câble	[m]
N_{ch}	Nombre de chaines photovoltaïques	
N_e	le nombre d'heures équivalent d'ensoleillement	
N_M	Nombre maximal de modules par rangée	

N_R	Nombre maximal de rangées	
N_{pv}	Nombre de panneaux photovoltaïques	
N_{pv_serie}	Nombre de panneaux série	
N_{pv_para}	Nombre de panneaux shunt	
N_{pvs_min}	Nombre minimale de modules en séries pour lequel le tracker fonctionne	
N_{pvs_max}	Nombre maximale de modules en séries pour lequel le tracker fonctionne	
N_{bat}	Nombre totale de batteries	
P_{hyd}	Puissance hydraulique	[W]
P_c	Puissance crête du panneau photovoltaïque	[W]
P_{ch}	Puissance unitaire de l'appareil	[W]
$P_{méc}$	Puissance mécanique	[W]
$P_{élé}$	Puissance électrique de la machine Asynchrone	[W]
Q	Débit volumique	[m ³ /s]
R	Résistance électrique	[Ω]
t_{EC}	Température d'eau chaude	[°C]
t_{EF}	Température d'eau froide	[°C]
t_{ST}	Température de stockage (souhaitée)	[°C]
V_{ch}	Tension du champ photovoltaïque	[V]
V_{pv}	Tension délivrée par un panneau photovoltaïque	[V]
V	volume de stockage d'eau	[m ³]
V_{co}	Tension de circuit ouvert	[V]
V_{max}	Tension maximale délivrée par les modules	[V]
V_p	Consommation journalière d'eau chaude par personnes	[L]

Lettre grecque

ρ	Masse volumique du fluide	[kg/m ³]
τ_p	Temps de pompage.	[h]
ϵ	Chute de tension	[%]
ρ	Résistivité électrique du matériau	[$\Omega.m$]

β	Facteur de forme
η_b	Rendement de la batterie.
η_p	Rendement de la pompe.
η_{ond}	Rendement de l'onduleur