



République Algérienne Démocratique et Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

Département Génie Electrique

Mémoire de Master

Spécialité : Réseaux électrique

Thème

La commande intelligente d'un système de
génération hybride solaire photovoltaïque et éolien a
axe horizontal

Réalisé par :

- NAIR Hamza
- RAHAL Mazigh Takie Eddine

Devant la commission composée de :

Mr : Mouassa Souhil	MCB	Univ. Bouira	Président
Mr : Ameziane Sadek	MAA	Univ. Bouira	Rapporteur
Mr : Bensafia Yassine	MCA	Univ. Bouira	Examineur

2020/2021

Remerciements

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite d'année universitaire.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis.

Merci à tous

Dédicaces

C'est avec un grand honneur et une immense joie que je dédie ce modeste travail à toute
personne qui est venue à mon aide.

Particulièrement à mes parents pour leurs soutiens et encouragement.

Et toute la famille.

NAIR Hamza

Dédicaces

C'est avec un grand honneur et une immense joie que je dédie ce modeste travail à toute
personne qui est venue à mon aide.

Particulièrement à mes parents pour leurs soutiens et encouragement.

Et toute la famille.

Rahal Mazigh Takie Eddine

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	iv
Liste des abréviations	vii
Introduction générale	1
1 GENERALITE SUR LES SYSTEMES SOLAIRES, EOLIENS ET SYSTEMES HYBRIDES	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur les systèmes solaires	4
1.2.1 Energie solaire	4
1.2.2 Rayonnement solaire	4
1.2.3 Les types d'exploitation de l'énergie solaire	5
1.2.4 L'effet photovoltaïque	6
1.2.5 La cellule photovoltaïque	7
1.2.6 Association de Cellules Photovoltaïques	8
1.2.7 Angle d'inclinaison des panneaux PV	10
1.2.8 Les technologies des cellules PV	11
1.2.9 Avantages et inconvénients du photovoltaïque	11
1.3 Généralités sur les systèmes éoliens	12
1.3.1 Définition de l'énergie éolienne	12
1.3.2 Types d'aérogénérateur (éolienne)	13
1.3.3 Constitution d'une éolienne	15

1.3.4	Loi de Betz	17
1.3.5	Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne	18
1.4	Généralités sur les systèmes hybrides	19
1.4.1	Les différentes combinaisons de système hybride	19
1.4.2	Système d'alimentation hybride éolien/diesel	19
1.4.3	Système d'alimentation hybride PV/Diesel	20
1.4.4	Système d'alimentation hybride PV/éolien	21
1.4.5	Système d'alimentation hybride PV/éolien/diesel	21
1.4.6	Avantages et inconvénients d'un système hybride	22
1.5	Conclusion	22
2	MODELISATION DES SYSTEMES SOLAIRES ET EOLIENS	23
2.1	Introduction	23
2.2	Caractéristiques et modélisation d'une cellule photovoltaïque	23
2.3	Présentation du modèle mathématique	25
2.4	Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque	25
2.5	Modélisation de la chaîne de conversion éolienne	27
2.6	Modèle du vent	28
2.7	Modèle de la turbine	28
2.8	Le multiplicateur de vitesse	29
2.9	Modélisation de l'Arbre Mécanique	29
2.10	Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents	30
2.11	Modélisation d'un hacheur buck-boost non inverseur	33
2.12	Régulateur PI	34
2.13	Le redressement non commandé	36
2.14	L'onduleur triphasé de tension	37
2.15	Commande par la logique floue	39
2.15.1	Principes généraux d'une commande par logique floue	39
2.15.2	Fonction d'appartenance	40
2.15.3	Variable linguistique	40
2.16	Conclusion	41

3 SIMULATION DU SYSTEME DU CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE, EOLIEN ET SYSTEME HYBRIDE	42
3.1 Introduction	42
3.2 Simulation et résultats de la chaîne de conversion éolienne	42
3.2.1 Essai à vitesse du vent variable	43
3.2.2 Essai d'une simulation de modèle de profil du vent	49
3.2.3 Essai à charge variable	55
3.3 Simulation et résultats de la chaîne de conversion photovoltaïque	56
3.3.1 Essai à éclaircissement variable	59
3.3.2 Essai à Température variable	60
3.4 Système de conversion d'énergie hybride	61
3.4.1 Essai entré et charge constant	62
3.4.2 Essai à entrées variables	65
3.4.3 Essai à charge variable	67
3.5 Conclusion	68
 Conclusion générale	 69
 Bibliographie	 71
 Annexe 1	 76
.1 Formule de betz	76
.2 Caractéristiques et paramètres des éléments considérés du système	77
.3 Logique floue	79
.4 Schémas sous MATLAB	80

Table des figures

1.1	Composants de rayonnement global sur un axe horizontal [29].	5
1.2	Principe de fonctionnement d'une cellule PV [34].	7
1.3	Cellules, module et panneaux photovoltaïques [33].	8
1.4	Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en série [10]. . . .	9
1.5	Caractéristique d'un groupement de n cellules identiques en parallèle [10]. .	9
1.6	Les angles d'un système solaire [14].	10
1.7	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	12
1.8	Technologie éolienne à axe vertical [33].	13
1.9	Eolienne à axe horizontal [32].	14
1.10	Composants d'une éolienne.	15
1.11	Éléments d'une nacelle [37].	17
1.12	Système hybride éolien-diesel-batterie [8].	20
1.13	Système hybride PV/Diesel	20
1.14	Exemple d'un système hybride PV/éolien [31]	21
2.1	Caractéristique I d'une cellule PV pour un éclairement et une température donnée [10].	24
2.2	Modèle équivalent électrique d'une cellule PV.	24
2.3	Schéma synoptique de l'aérogénérateur [39].	27
2.4	Schéma de la turbine éolienne.	28
2.5	Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne [40].	30
2.6	Représentation symbolique de la GSAP.	31
2.7	Schéma de principe du convertisseur non inverseur Buck-Boost.	33

2.8	Régulation de la tension du bus [43].	34
2.9	Redresseur double alternance non commandé.	36
2.10	Schéma d'un onduleur triphasé [34].	37
2.11	Représentation des transistors par des interrupteurs [34].	38
2.12	Configuration de base d'un régulateur flou [46].	39
2.13	Formes triangulaire et trapézoïdale des fonctions d'appartenance.	40
2.14	Fonctions d'appartenance avec trois sous-ensembles flous pour la variable linguistique.	41
3.1	Schéma synoptique du système éolien.	43
3.2	Couple turbine en fonction de temps.	43
3.3	Vitesse de rotation optimisée en fonction du temps.	44
3.4	Puissance de turbine.	44
3.5	Tension de génératrice synchrone.	45
3.6	Tension redressée.	46
3.7	Tension filtrée.	46
3.8	Tension de sortie avec un régulateur PI.	47
3.9	Tension de sortie avec une commande logique floue.	48
3.10	Vitesse du vent en fonction du temps.	49
3.11	Couple de la turbine en fonction du temps.	50
3.12	Puissance turbine en fonction du temps.	50
3.13	Vitesse de rotation de l'éolienne en fonction du temps.	51
3.14	Tension de la génératrice synchrone.	51
3.15	Tension de sortie du redresseur.	52
3.16	Tension après filtrage.	52
3.17	Tension a la sortie du hacheur commandé par régulateur PI et Floue.	53
3.18	Courant à la sortie du hacheur.	54
3.19	Tension a la sortie du hacheur commandé par régulateur PI/Floue.	55
3.20	Courant a la sortie du hacheur.	56
3.21	Schéma synoptique du système PV.	57
3.22	La caractéristique I (V) du GPV (effet (a) éclaircissement (b) température).	57
3.23	La caractéristique P(V) du GPV (effet (a) éclaircissement (b) température).	58
3.24	Courant à la sortie du hacheur.	59

3.25	Tension de la sortie.	60
3.26	Schéma de principe du système hybride.	61
3.27	Le courant du système hybride en fonction du temps.	62
3.28	La tension de système hybride.	62
3.29	Tension de l'onduleur.	63
3.30	Tension à la sortie de l'onduleur.	64
3.31	Courant en sortie de l'onduleur d'une phase.	64
3.32	Tension au bord de l'onduleur avec commande PI.	65
3.33	Tension au bord de l'onduleur avec commande Floue.	66
3.34	Tension à la sortie de l'onduleur avec commande PI.	67
3.35	Tension à la sortie de l'onduleur avec commande floue.	67

Liste des abréviations et des acronymes

V_v	La vitesse instantanée du vent [m/s].
C_p	Coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
P_v	Puissance du vent [W].
P_t	Puissance de la turbine [W].
Ω_t	La vitesse de la turbine.
ρ	La densité de l'air.
S	L'aire balayée par la turbine.
G	Le gain du multiplicateur.
Ω_{mec}	La vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
Ω_t	La vitesse de la turbine (rad/s).
C_t	Le couple aérodynamique (N.m).
C_g	le couple du générateur en (N.m).
R	Le rayon de la surface balayée [m].
λ	Le rapport entre la vitesse périphérique en bout de pales et la vitesse du vent.
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale de la turbine éolienne.
J	Inertie totale de l'arbre de transmission [kg.m ²].
β	L'angle d'orientation des pâles.
R_s	Résistance statorique [].
d, q	Indices des axes direct et en quadrature du référentiel lié au champ tournant.
ω_s, ω_r	Pulsation statorique, rotorique [rad/s].
I_{cc}	Le courant de court-circuit [A].
V_{opt}	Tension au point de puissance maximale [V].
I_{opt}	Courant au point de puissance maximale [A].

V_{co}	La tension à vide [V].
I_{ph}	Le photo-courant [A].
ϕ_f	le flux de l'aimant permanent. [Wb]
I_d	Courant de diode.
I_{sc}	Le courant de court-circuit.
f_c	Fréquence de commutation [HZ]
R_{rs}	Résistance des enroulement []
N_s	nombre de cellules solaires en série
N_p	nombre de cellules solaires en parallèle
FF	Facteur de forme.
PI	Proportionnel intégrale
PV	Photovoltaïque
MSAP	machine synchrone a aimant permanant
AOI	L'angle d'incidence solaire

Introduction générale

Depuis des milliers d'années, le climat de la Terre est en constante évolution, mais il n'a jamais changé à un rythme aussi rapide que ces dernières années : recul des glaciers, inondations catastrophiques, canicules, sécheresses, cyclones plus fréquents. Les signes tangibles de notre système climatique ne peuvent pas être entièrement expliqués par des causes naturelles. Dans ce cas, depuis la révolution industrielle, une grande quantité de gaz à effet de serre a été émise dans l'atmosphère pour porter une responsabilité importante [47].

Le changement climatique et ses conséquences naturelles, économiques et humaines potentiellement graves ont suscité une réponse internationale à la fin des années 1970, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles [52].

En 1979, la première Conférence mondiale sur le climat a négocié un protocole pour réduire les émissions anthropiques de gaz à effet de serre, suivi d'un protocole d'objectifs quantitatifs pour plusieurs pays industrialisés [48].

L'utilisation d'énergies renouvelables pour produire de l'électricité est une option énergétique prometteuse qui peut répondre à la demande croissante d'énergie dans le monde. Longtemps négligées mais elles reprennent la place qui leur est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires. Parmi les énergies renouvelables nous citons : L'éolien, le solaire photovoltaïque et thermique, la biomasse, l'hydraulique, la géothermie.

Les systèmes d'énergies renouvelables hybrides sont des systèmes qui combinent deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables (telles que l'énergie solaire et éolienne). Ils offrent de nombreuses améliorations et avantages globaux par rapport aux systèmes qui reposent sur une seule source. Cependant, les sources d'énergie renouvelables dépendent fortement des conditions météorologiques, ce qui les rend incohérentes et instables.

Notre objectif dans cette étude est de mettre en œuvre deux techniques de régulation qui sont le régulateur intégral proportionnel (PI) et la commande à logique floue pouvant améliorer la stabilité du système hybride éolien-PV lors de différents changements climatiques et demandes de charge, par la suite nous prévoyons faire une comparaison entre ces deux commandes intelligentes.

Afin d'atteindre cet objectif nous avons réparti notre mémoire en 3 chapitres :

- Le premier chapitre a pour vocation de donner un aperçu général sur la conversion d'énergies solaires, éolien en plus de quelques architectures des systèmes hybrides.
- Le deuxième chapitre consiste à modéliser les différents dispositifs utilisés pour la simulation de la chaîne de conversion énergétique éolienne à axe horizontal et solaire photovoltaïque.
- Le dernier chapitre sera consacré à la présentation en plus à l'interprétation des différents résultats obtenus par la simulation de la chaîne de conversion énergétique éolienne à axe horizontal et solaire photovoltaïque sous l'environnement MATLAB.

GENERALITE SUR LES SYSTEMES SOLAIRES, EOLIENS ET SYSTEMES HYBRIDES

1.1 Introduction

De nos jours, les énergies renouvelables sont un sujet de préoccupation pour de nombreux pays et ce pour plusieurs raisons; épuisement des énergies non renouvelables, réchauffement climatique, impact environnemental des énergies non renouvelables...etc.

Il existe plusieurs systèmes qui fonctionnent avec les énergies renouvelables, parmi ceux on distingue les systèmes éoliens fonctionnant avec l'énergie du vent et les systèmes solaires fonctionnant avec l'énergie solaire.

Dans ce chapitre on présente un aperçu global sur les systèmes solaires et les systèmes éoliens précisément les systèmes solaires photovoltaïques et le système éolien a axe horizontale. En plus de quelques généralités sur les systèmes hybrides et leurs différentes combinaisons et architectures.

1.2 Généralités sur les systèmes solaires

1.2.1 Energie solaire

Le soleil est une source d'énergie gigantesque disponible en pérennité : c'est un énorme four qui brûle de l'hydrogène. L'énergie sous forme de chaleur et de rayonnement se propage lorsque des atomes d'hydrogène fusionnent et forment des atomes plus lourds.

L'énergie solaire est l'énergie du soleil qui est convertie en énergie thermique ou électrique. L'énergie solaire est la source d'énergie renouvelable la plus propre et la plus abondante disponible. Les technologies solaires peuvent exploiter cette énergie pour diverses utilisations, notamment la production d'électricité, la fourniture de lumière ou un environnement intérieur confortable et le chauffage de l'eau à des fins domestiques, commerciales ou industrielles [1].

1.2.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire à ondes courtes tombant sur une surface horizontale à partir du soleil et du ciel combiné est connu sous le nom de rayonnement global à ondes courtes. Le flux global de rayonnement à ondes courtes, c'est-à-dire le flux d'énergie rayonnante par unité de temps, est connu sous le nom d'irradiance. L'unité la plus couramment utilisée est le watt par mètre carré (W m^2) [2].

Le rayonnement solaire est formé de photons dont la longueur d'onde varie de l'ultraviolet ($0.2\mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($2.5\mu\text{m}$). L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur la distance soleil-terre est de l'ordre de 1350W/m^2 hors atmosphère terrestre, il arrive au sol après la perte d'une grande partie de son intensité, en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. À 90° d'inclinaison Le rayonnement solaire direct encaissé au niveau du sol atteint 1000W/m^2 En raison de l'absorption dans l'atmosphère [3,4].

Il existe plusieurs types de rayonnement : le rayonnement direct (directement du Soleil), rayonnement diffus (selon les conditions météorologiques), rayonnement Réflexion (objets au sol ou sa surface), et enfin rayonnement global est la somme des rayonnements ci-dessus.

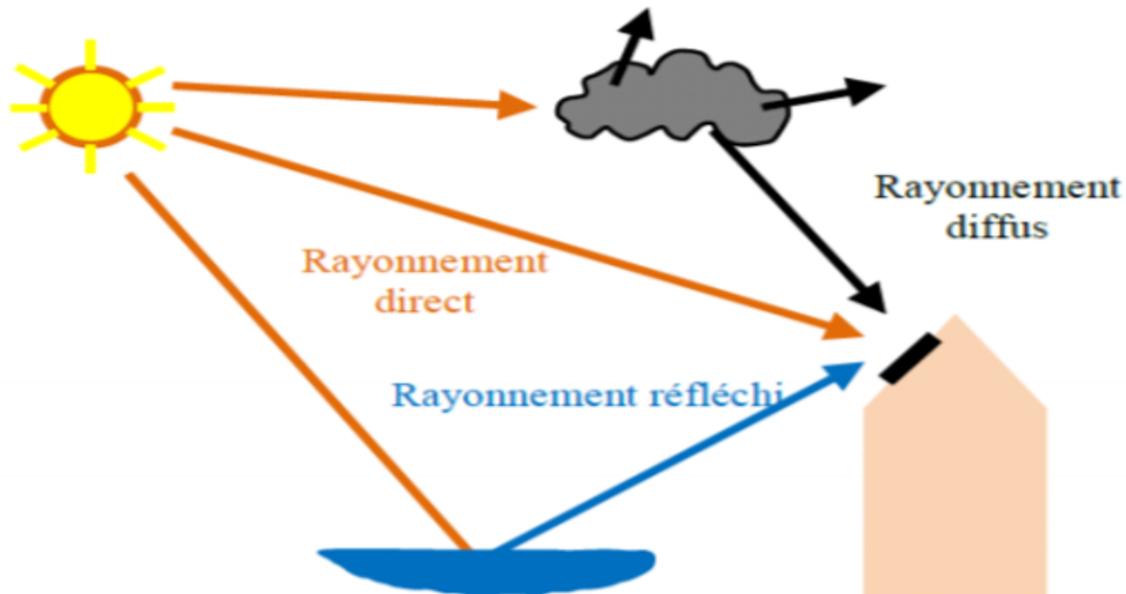


FIGURE 1.1 – Composants de rayonnement global sur un axe horizontal [29].

1.2.3 Les types d'exploitation de l'énergie solaire

Il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

- Le solaire photovoltaïque.
- Le solaire thermique.

a. Le solaire photovoltaïque

Les dispositifs photovoltaïques (PV) génèrent de l'électricité directement à partir de la lumière du soleil via un processus électronique qui se produit naturellement dans certains types de matériaux, appelés semi-conducteurs tel que le silicium. Les électrons contenus dans ces matériaux sont libérés par l'énergie solaire et peuvent voyager à travers un circuit électrique, alimentant des appareils électriques envoyant de l'électricité au réseau.

Les appareils photovoltaïques peuvent être utilisés pour alimenter n'importe quoi, des petits appareils électroniques tels que les calculatrices et les panneaux de signalisation jusqu'aux maisons et aux grandes entreprises commerciales.

b. Le solaire thermique

La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique. Les capteurs solaires thermiques sont composés d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement Solaire en s'échauffant, et d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur qui peut être liquide et air, d'une barrière thermique qui assure l'isolement en sous-face, en règle générale une couverture transparente qui garantit l'effet de serre, et potentiellement d'un coffrage imperméable à l'eau et d'un système de support mécanique de l'assortiment [5]. L'énergie solaire capté est transformée en énergie thermique est cédée au fluide caloporteur. Cette énergie thermique peut être transférée vers un réservoir de stockage d'énergie ou utilisée directement.

1.2.4 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839 par le physicien français Alexandre Edmond Becquerel. Il a découvert que certains matériaux peuvent produire une petite quantité de Courant électrique sous l'action de la lumière. Par la suite Albert Einstein a décrit le phénomène en 1904 [3].

L'effet PV est un processus pour lequel, lorsque les rayons du soleil frappent la couche limite des matériaux semi-conducteurs, un courant électrique peut être généré.

La lumière du soleil est composée de photons, qui peuvent être considérés comme des unités discrètes de l'énergie stockée dans la lumière. Lorsque les photons sont absorbés par une cellule photovoltaïque, qui contient un matériau semi-conducteur comme le silicium ou le platine, l'énergie du photon est transférée à un électron dans un atome de la "cellule solaire". L'électron excité est alors capable d'échapper à sa liaison avec l'atome et génère un courant électrique [6].

Cela laisse un trou. Combiné à une jonction PN, qui est une couche à l'intérieur de la cellule photovoltaïque formée par le contact intime de semi-conducteurs de type P et de type N qui créent un champ électrique, les trous se déplacent dans la direction opposée aux électrons, produisant ainsi un courant électrique [6].

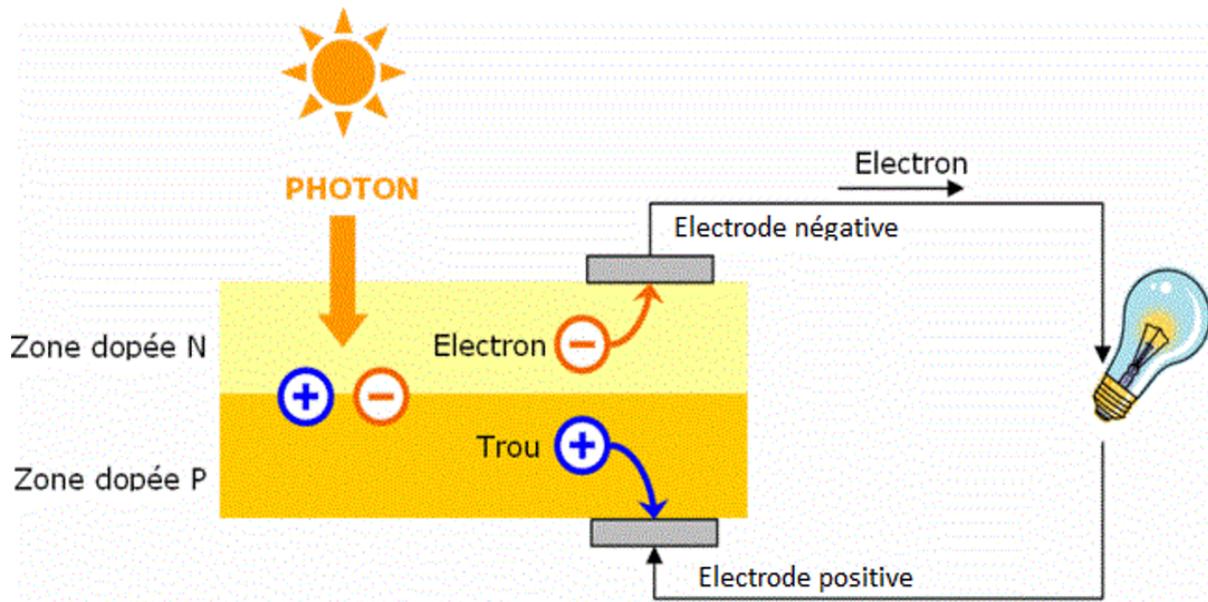


FIGURE 1.2 – Principe de fonctionnement d'une cellule PV [34].

1.2.5 La cellule photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques (PV) ont été développées à l'origine pour une utilisation dans l'espace, où la réparation est extrêmement coûteuse, voire impossible. Alors que nous commençons à réaliser et à respecter la fragilité de l'écosystème de notre planète, les choix d'énergie propre comme le PV deviennent extrêmement importants [7].

La technologie d'alimentation photovoltaïque (PV) utilise des cellules constituées de semi-conducteurs à base, par exemple, de silicium, de sulfure de cadmium, ou de tellure de cadmium. Généralement avec une taille de plusieurs centimètres carrés. Au point de vue de la physique du solide, la cellule photovoltaïque est assimilable à une diode p-n de grande surface avec la jonction Positionné près de la surface supérieure, elle permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique [8].

Une cellule photovoltaïque produit moins de 2 watts sous approximativement 0,5 Volt. Donc pour générer une puissance requise les cellules sont assemblées pour former un module, Le panneau solaire est formé par l'interconnexion en série et/ou en parallèle de modules photovoltaïques [9].

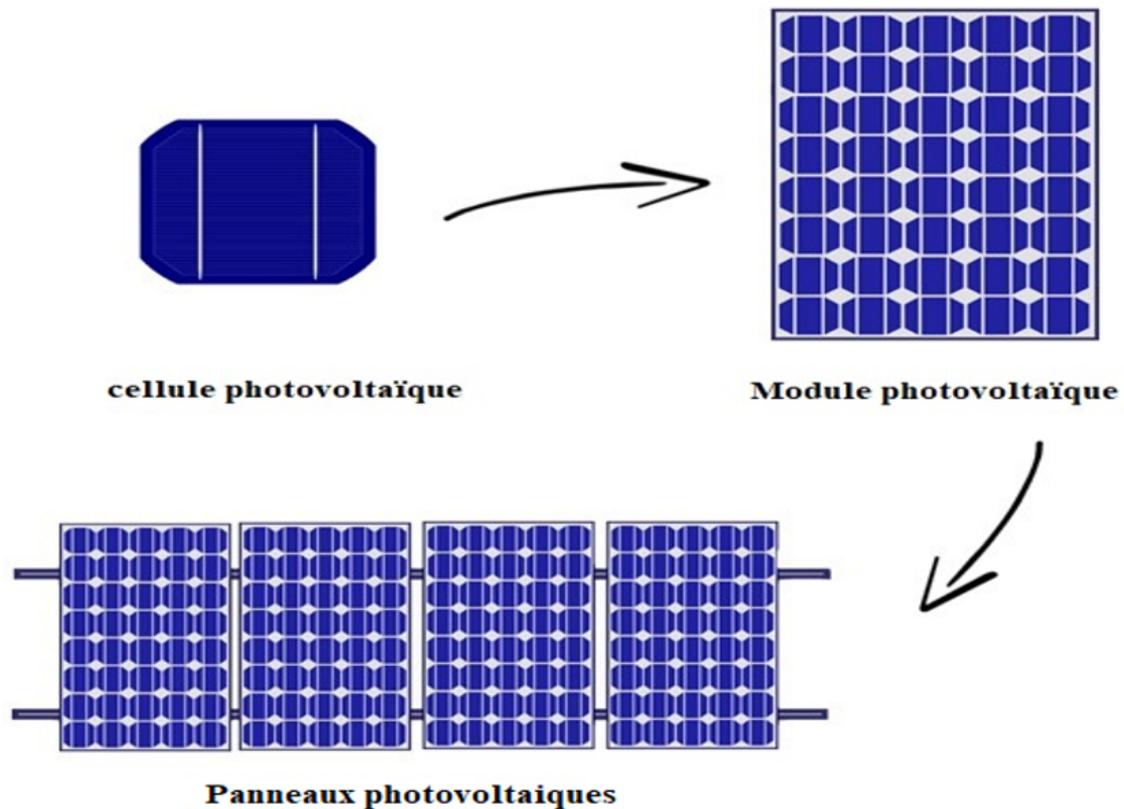


FIGURE 1.3 – Cellules, module et panneaux photovoltaïques [33].

1.2.6 Association de Cellules Photovoltaïques

a. Mise en série

Les circuits en série n'ont qu'un seul chemin pour le courant. Par conséquent, tout courant dans le circuit doit traverser toutes les charges. Un circuit en série est une boucle fermée continue, la rupture du circuit à tout moment empêche toute la série de fonctionner.

Lors de la mise en série des cellules PV, la tension est additive, mais l'ampérage (courant) reste le même (**Figure 1.4**) [12].

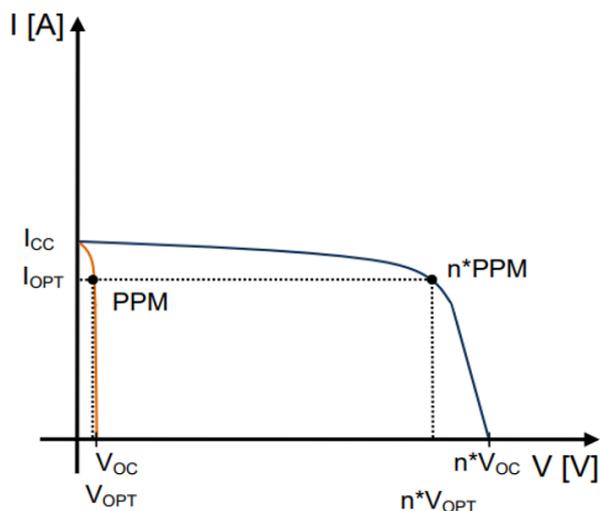


FIGURE 1.4 – Caractéristique d’un groupement de n cellules identiques en série [10].

b. Mise en parallèle

Les circuits parallèles ont plusieurs chemins pour que le courant se déplace. Si un élément du circuit est démolit, le courant continuera à se déplacer le long des autres chemins, tout en ignorant celui qui est démolit. Ce type de circuit est utilisé pour la plupart des câblages électriques domestiques.

Lors de la mise en parallèle des cellules PV, l’ampérage (courant) est additif, mais la tension reste la même (**Figure 1.5**) [12].

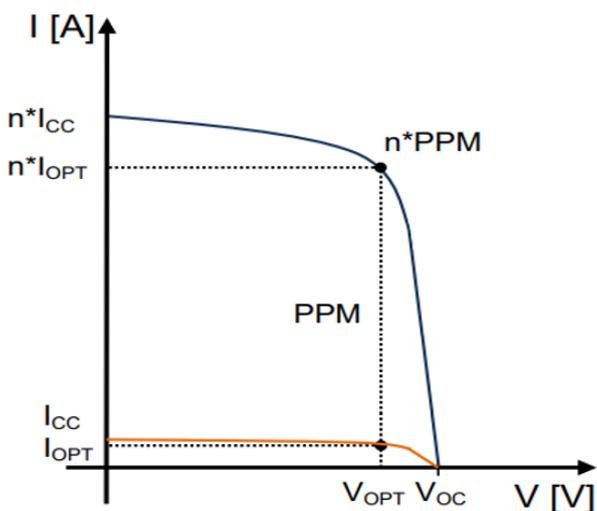


FIGURE 1.5 – Caractéristique d’un groupement de n cellules identiques en parallèle [10].

1.2.7 Angle d'inclinaison des panneaux PV

La performance d'un panneau solaire photovoltaïque est fortement influencée par son angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale. Cela est dû à le fait que l'angle d'inclinaison modifie le rayonnement solaire atteignant la surface du champ photovoltaïque. L'angle d'inclinaison, défini comme l'angle de les panneaux photovoltaïques par rapport à l'horizontale, est un paramètre dominant affectant le rayonnement collecté par un générateur photovoltaïque fixe. En général, l'angle d'inclinaison optimal d'un générateur photovoltaïque fixe est lié aux conditions climatiques locales, à la latitude géographique et à la période d'utilisation. Par conséquent, différents endroits auront différents angles d'inclinaison optimaux pour un générateur photovoltaïque utilisé chaque année [13].

L'angle d'inclinaison de la cellule solaire peut être calculé par (**Figure 1.6**) [14] :

$$AOI = \cos^{-1}([\cos(\beta) \cos(Zs)] + [\sin(\beta) \sin(Zs) \cos(AZs - AZm)]) \quad (1.1)$$

- AOI : L'angle d'incidence solaire.
- β : L'angle d'inclinaison de panneau.
- Zs : L'angle zénithal du soleil (l'angle que le panneau fait avec l'horizon).
- AZm : L'azimut (mesure angulaire dans un système de coordonnées sphériques).

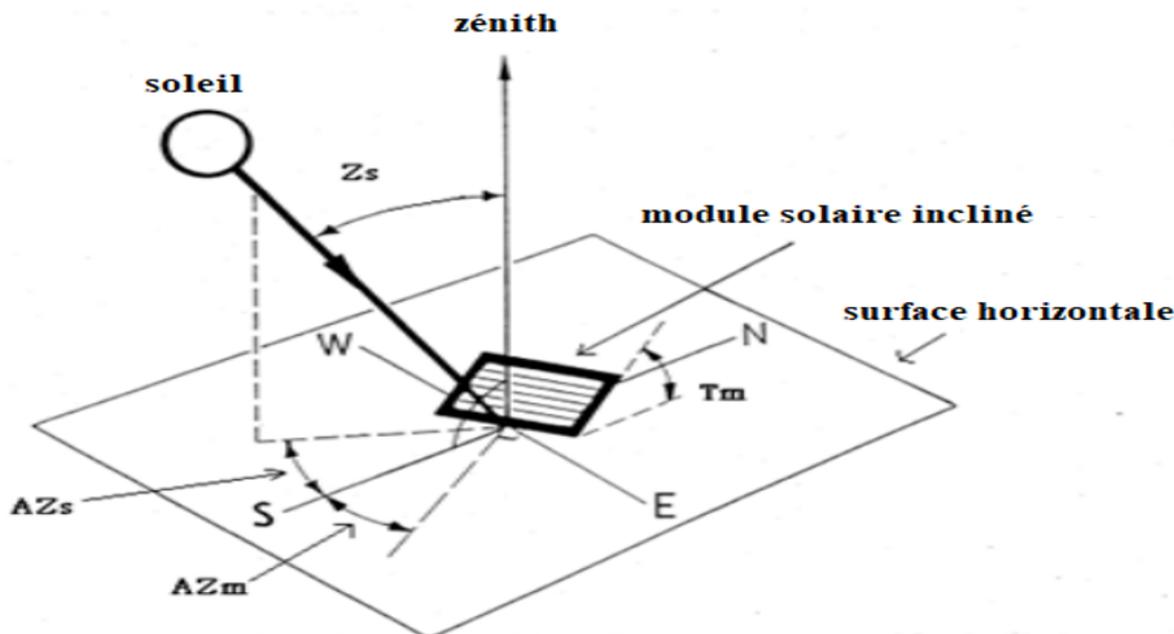


FIGURE 1.6 – Les angles d'un système solaire [14].

1.2.8 Les technologies des cellules PV

Dans les comparaisons entre les technologies énergétiques alternatives, la mesure la plus importante est le coût de l'énergie par kWh fourni. En énergie photovoltaïque, ce coût dépend principalement du rendement de conversion de l'énergie photovoltaïque et le coût d'investissement par capacité en watt. Ensemble, ces deux paramètres indiquent la compétitivité économique de l'électricité photovoltaïque [8].

Le rendement de conversion de la cellule photovoltaïque est défini comme suit :

$$\eta = \frac{\text{puissance électrique de sortie}}{\text{énergie solaire frappant la cellule}}$$

En termes d'efficacité de conversion et de coût de module. Les principaux types sont discutés dans la section suivante [8] :

- Silicium monocristallin.
- Polycristallin et semi-cristallin.
- Films minces.
- Silicium amorphe.
- Sphérique.

1.2.9 Avantages et inconvénients du photovoltaïque

● Avantages

- Délai d'exécution court pour concevoir, installer et démarrer une nouvelle usine.
- Hautement modulaire.
- La puissance de sortie correspond très bien aux demandes de charge de pointe.
- Structure statique, pas de pièces mobiles, donc pas de bruit.
- Capacité de puissance élevée par unité de poids.
- Durée de vie plus longue avec peu d'entretien en raison de l'absence de pièces mobiles.
- Très mobile et portable en raison de son poids léger [8].

- **Inconvénients**

- Coût de démarrage élevé.
- Instabilité du rayonnement solaire disponible.
- Nécessite un stockage d'énergie.
- L'efficacité doit être améliorée.
- Manque de connaissances et de compétences [8].

1.3 Généralités sur les systèmes éoliens

1.3.1 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, généralement appelées éoliennes, sont une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) est convertie en énergie mécanique Disponible sur l'arbre d'entraînement, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [30]. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne.

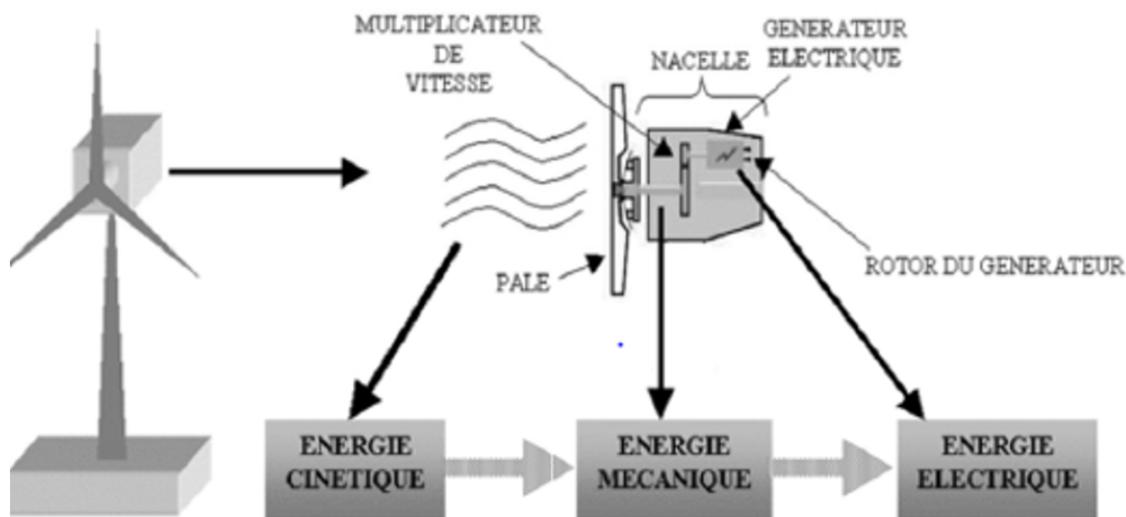


FIGURE 1.7 – Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'éolien est un nouveau moyen de production d'électricité décentralisée permettant une alternative acceptable à l'énergie fossile (centrale thermique ou à cycle combiné) sans pourtant prétendre à la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite est beaucoup plus faible) [31].

1.3.2 Types d'aérogénérateur (éolienne)

Les éoliennes sont classées en fonction de la disposition géométrique des arbres sur lequel est installée l'hélice. Il existe deux principaux types d'éoliennes [32] :

- Aérogénérateur à axe horizontal.
- Aérogénérateur à axe vertical.

a. Aérogénérateur à axe vertical

Ces éoliennes sont les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Les plus reconnue de ces turbines sont les aérogénérateurs de type Darrieus et Savonius [33].

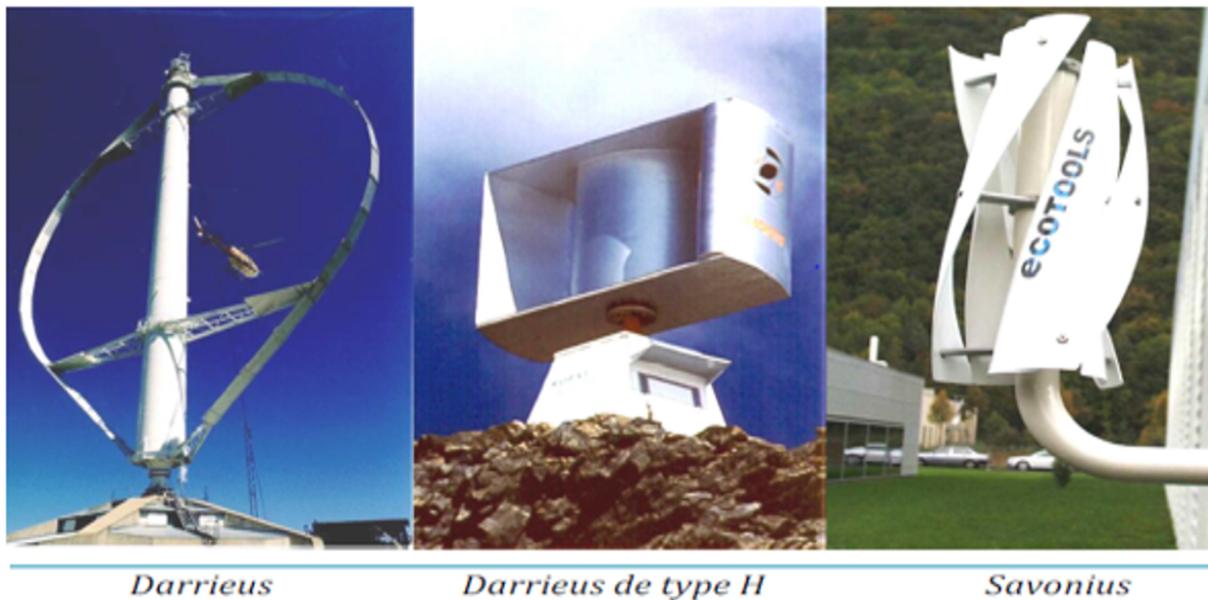


FIGURE 1.8 – Technologie éolienne à axe vertical [33].

Elles présentent certains avantages et inconvénients [33] :

- **Avantages**

- Pas besoin d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.
- Mettre les machineries directement au sol.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

- **Inconvénients**

- Vitesse du vent faible sur sol.
- Leur installation au sol occupe une surface plus importante que l'éolienne à axe horizontal.

b. Aérogénérateur à axe horizontal

Ce sont les types d'aérogénérateur les plus répandus et les plus utilisés dans les fermes éoliennes à grandes puissances. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [33].

Deux types de configuration peuvent être rencontrés : Les éoliennes dont l'hélice est en « amont » par rapport au vent, et ceux dont l'hélice est en « aval » par rapport au vent.

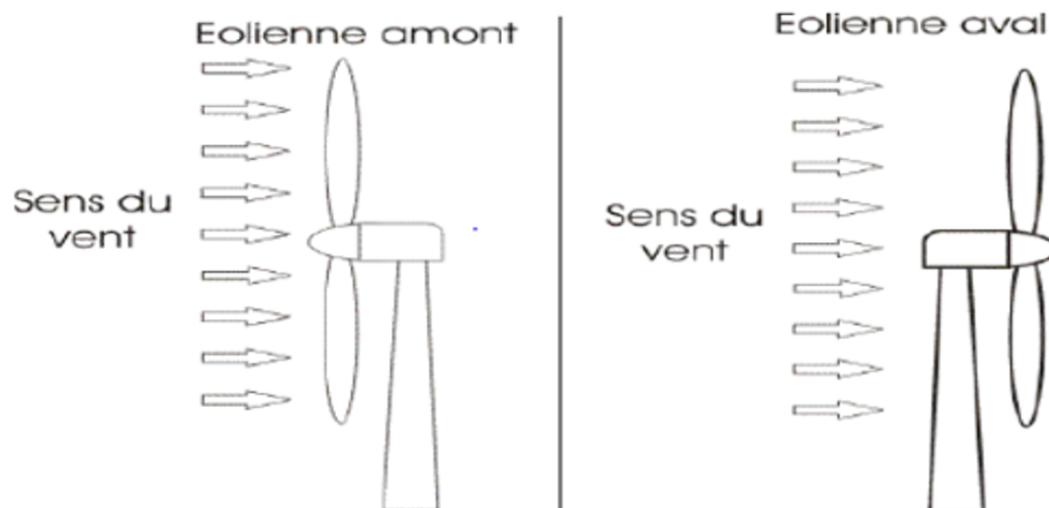


FIGURE 1.9 – Eolienne à axe horizontal [32].

- **Avantages**

- L'éoliennes à axe horizontal captent le vent en hauteur, elle est donc plus forte et plus régulière que les zones voisines sol.
- Mettre les machineries dans la nacelle au sommet de la tour, Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.
- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.

- **Inconvénients**

- Le coût de construction est très élevé.
- L'équipement est situé au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

1.3.3 Constitution d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, la tour (Mât), la nacelle et le rotor.

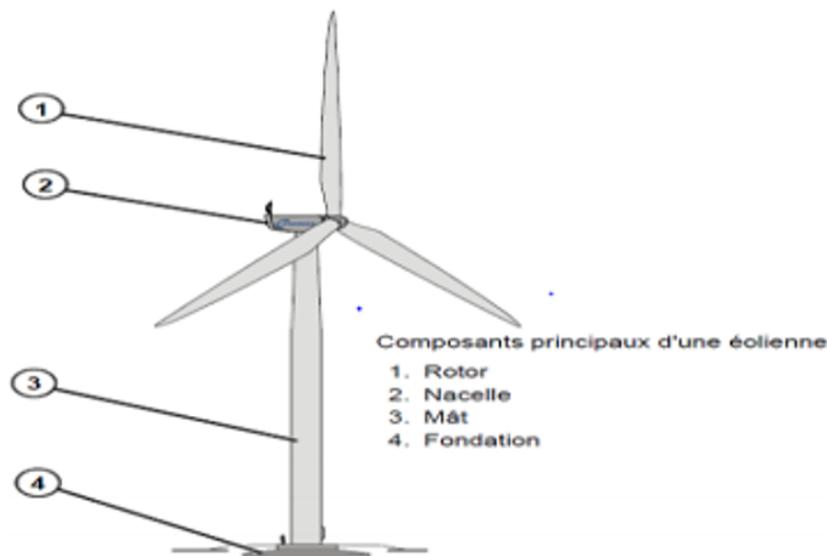


FIGURE 1.10 – Composants d'une éolienne.

- **La tour**

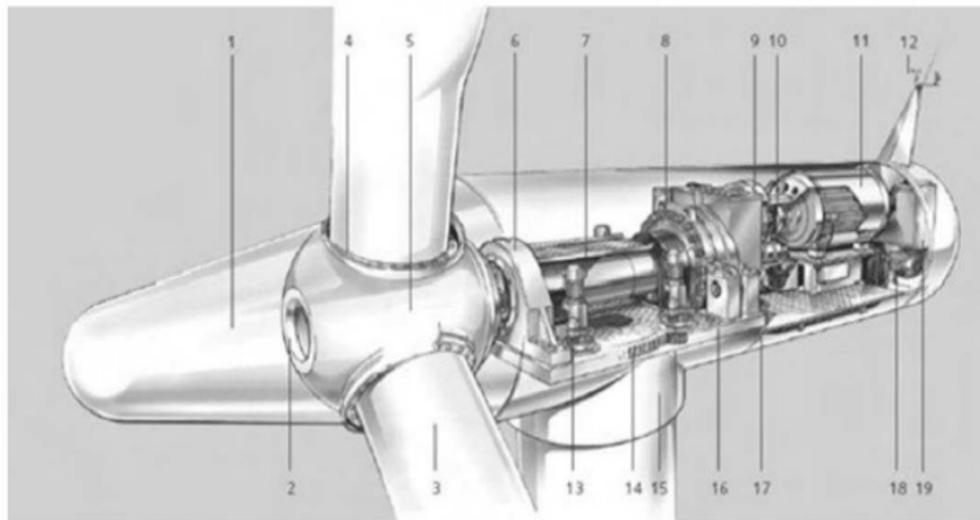
La tour est généralement un tube en acier, son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi il permet de placer le rotor à une hauteur élevée au-dessus du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie [32].

- **Nacelle**

La nacelle est installée au sommet du tour, permet de regrouper tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine [32].

Présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants [32,34] :

- Multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique (Qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/mn). En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire : comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- La génératrice : La génératrice est généralement asynchrone. Dans certains cas, des générateurs de conception spéciale pouvant fonctionner à la vitesse de l'arbre du rotor sans aucune boîte de vitesses. Différents types de génératrice peuvent être rencontrés.
- L'anémomètre et la girouette : habituellement situés à l'arrière de la nacelle, permettent respectivement de mesurer la vitesse du vent et de déterminer sa direction. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts instationnaires sur l'installation.
- Équipements de refroidissement par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour.



1 cône du rotor	8 multiplicateur	15 tour
2 support cône du rotor	9 frein à disque	16 support de la nacelle
3 pale	10 couplage	17 châssis de la nacelle
4 système de calage de pale	11 génératrice	18 ventilateur de la génératrice
5 moyeu des pales	12 capteurs météorologiques : anémomètre/girouette	19 système de refroidissement de l'huile
6 palier principal	13 moteur d'orientation en lacet	
7 arbre lent	14 couronne d'orientation en lacet	

FIGURE 1.11 – Eléments d'une nacelle [37].

• Le rotor

Le rôle d'un rotor est de capter l'énergie du vent et la transformer en énergie mécanique. Il est composé de plusieurs pales (en général trois) et du moyeu de l'éolienne. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...) [32,34].

1.3.4 Loi de Betz

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par [36] :

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (1.2)$$

- Avec, ρ la densité volumique de l'air.

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{MAX} = \frac{16}{27} \cdot P_V = 0.59P_V \quad (1.3)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_P^{OPT} = \frac{P_{MAX}}{P_V} = 0.59 \quad (1.4)$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_P = \frac{P_{EOL}}{P_V} \quad (1.5)$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée la vitesse réduite λ , qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent :

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_V} \quad (1.6)$$

1.3.5 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Il existe plusieurs types de machines sur le marché qui peuvent jouer le rôle de générateurs dans les systèmes éoliens qui nécessitent des caractéristiques très particulières. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités [36].

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Mais elles présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants aux dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes [36].

1.4 Généralités sur les systèmes hybrides

En général un système hybride est un système qui combine et exploite un ou plusieurs sources et technologies de production. À présent, l'association d'au moins deux technologies complémentaire est requise afin d'assurer une meilleure continuité de service. Les sources d'énergies renouvelables, tel que le photovoltaïque et l'éolienne délivre une puissance qui est variable, donc leur association avec des sources classiques permet d'avoir une production électrique plus continue [15].

1.4.1 Les différentes combinaisons de système hybride

Il existe plusieurs combinaisons [16] :

- Photovoltaïque-diesel.
- Eolien-diesel.
- Photovoltaïque-éolien.
- Eolienne-photovoltaïque-diesel.

1.4.2 Système d'alimentation hybride éolien/diesel

Il s'agit d'un système qui combine la turbine éolienne et un générateur diesel, L'éolienne (combustible gratuit) est prioritaire ce qui permet au groupes électrogènes diesel (carburant cher) d'arrêter de fonctionner lorsque les vents sont assez forts pour fournir toute la puissance électrique requise par le réseau [16].

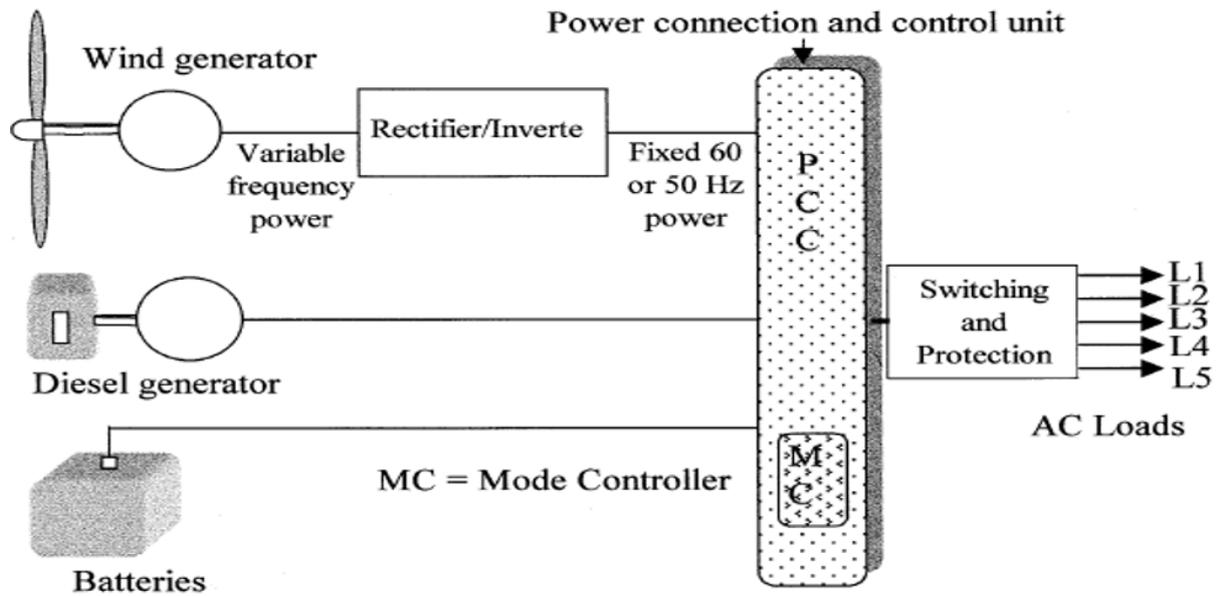


FIGURE 1.12 – Système hybride éolien-diesel-batterie [8].

1.4.3 Système d'alimentation hybride PV/Diesel

Il s'agit de l'intégration d'un système photovoltaïque avec un générateur diesel pour alimenter la charge. Cette technologie permet de réduire les heures de fonctionnement du générateur diesel de manière optimale et ce générateur est également utilisé pour faire face aux périodes de forte demande de pointe [17].

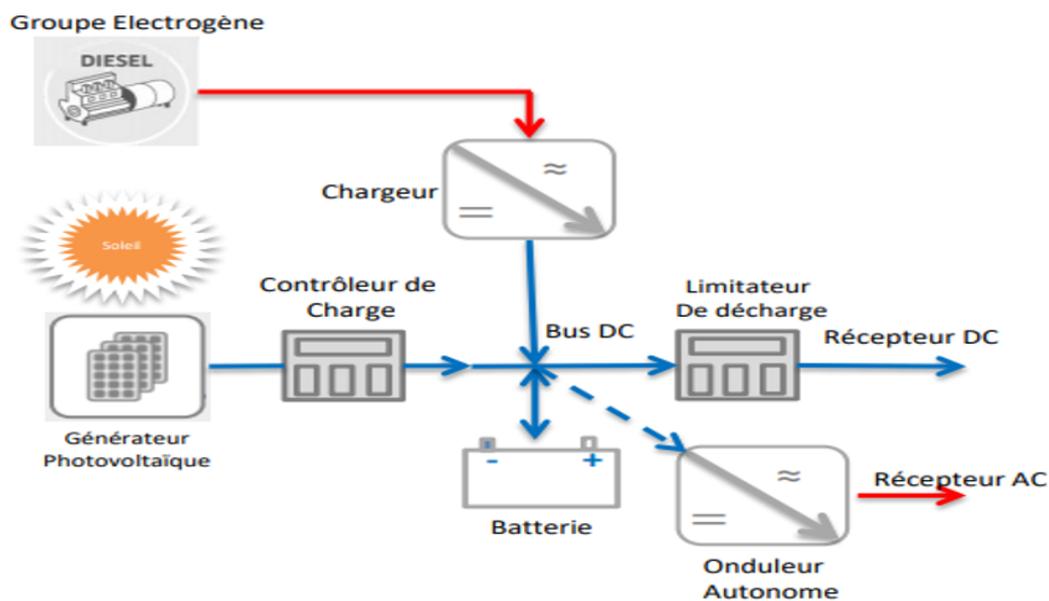


FIGURE 1.13 – Système hybride PV/Diesel

1.4.4 Système d'alimentation hybride PV/éolien

C'est un système qui fait la combinaison entre un générateur photovoltaïque et la turbine éolienne. Ce système fournit des performances plus constantes tout au long de l'année, réduisant ainsi le besoin de génération de secours par combustible fossile [16].

Tout surplus d'énergie peut être stocké dans des batteries jusqu'à ce qu'elles soient complètement chargées, Ainsi, la batterie entre en jeu lorsque la puissance des sources d'énergie renouvelables (PV-éolien) n'est pas en mesure de satisfaire la demande de charge [16-18].

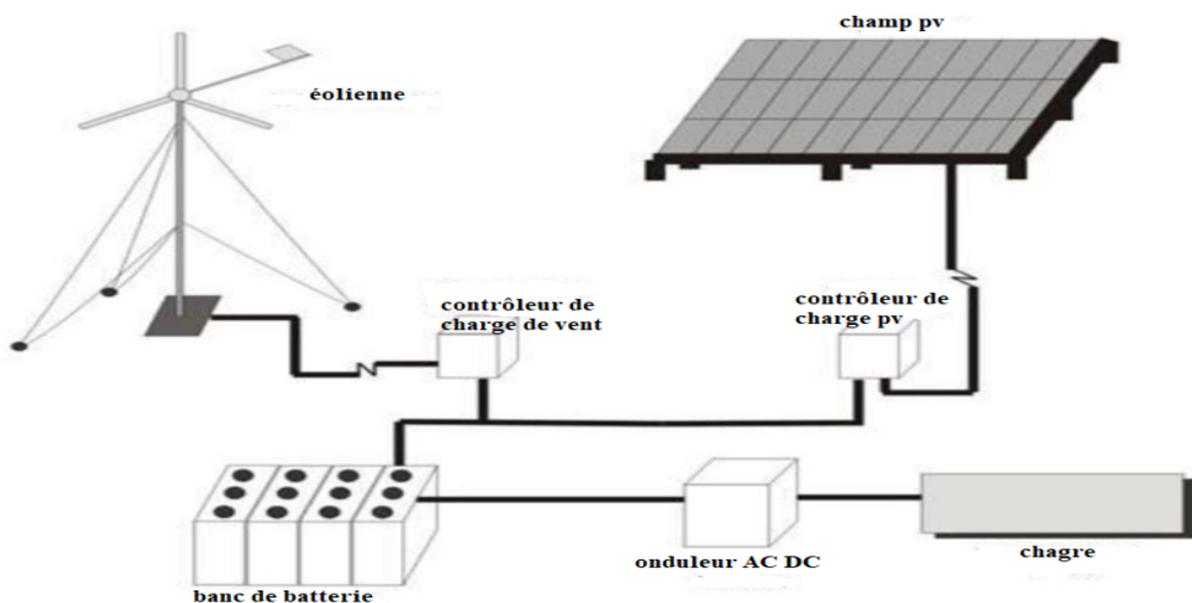


FIGURE 1.14 – Exemple d'un système hybride PV/éolien [31]

1.4.5 Système d'alimentation hybride PV/éolien/diesel

C'est un système qui combine entre le système solaire photovoltaïque et la turbine éolienne tout en ayant un générateur diesel en secours. Ce système présente une source d'énergie prometteuses et est économiquement réalisables pour une utilisation actuelle et future en raison de la demande accrue d'énergie et de l'épuisement des sources conventionnelles [16].

1.4.6 Avantages et inconvénients d'un système hybride

- **Avantage**
 - Non dépendant d'une seule source d'énergie.
 - Capable de satisfaire des charges évolutives.
 - Exploitation simple, travaux de maintenance et révision réduits.
 - Faible coûts liés au cycle de vie de l'électricité pour des applications [38].
- **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 [38].

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans la première partie une vue d'ensemble sur les systèmes solaires ceux d'origines photovoltaïques.

Ensuite en deuxième lieu nous avons parlé sur la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ainsi les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement, pour conclure la dernière partie a été réservée à une description de quelques systèmes hybride.

MODELISATION DES SYSTEMES SOLAIRES ET EOLIENS

2.1 Introduction

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné, afin de pouvoir comprendre son fonctionnement et faciliter son dimensionnement. Notre système global est composé de deux sous-systèmes éolien et photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous présentons la modélisation mathématique des différents dispositifs requis pour notre simulation.

2.2 Caractéristiques et modélisation d'une cellule photovoltaïque

La (**Figure 2.1**) résume la caractéristique non linéaire $I(V)$ d'une cellule PV pour un éclairement et une température données, Il existe un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par sa tension et son courant optimaux exprimés respectivement en V_{OPT} et I_{OPT} . Cette fonctionnalité balaie 3 des 4 quadrants existants.

La cellule PV est le récepteur dans le quadrant II et le quadrant IV. Le fonctionnement dans ces deux quadrants doit être évité car il peut y avoir un risque de dommages causés par le phénomène d'échauffement local.

Le fonctionnement dans le quadrant I correspond au fonctionnement normal en mode générateur. Dans ce cas la cellule génère de l'énergie.

L'ensemble des matériaux ayant des propriétés électriques proches du silicium peut être utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, mais avec des différences sur la gamme du spectre susceptible de convertir l'énergie des photons en électrons [10].

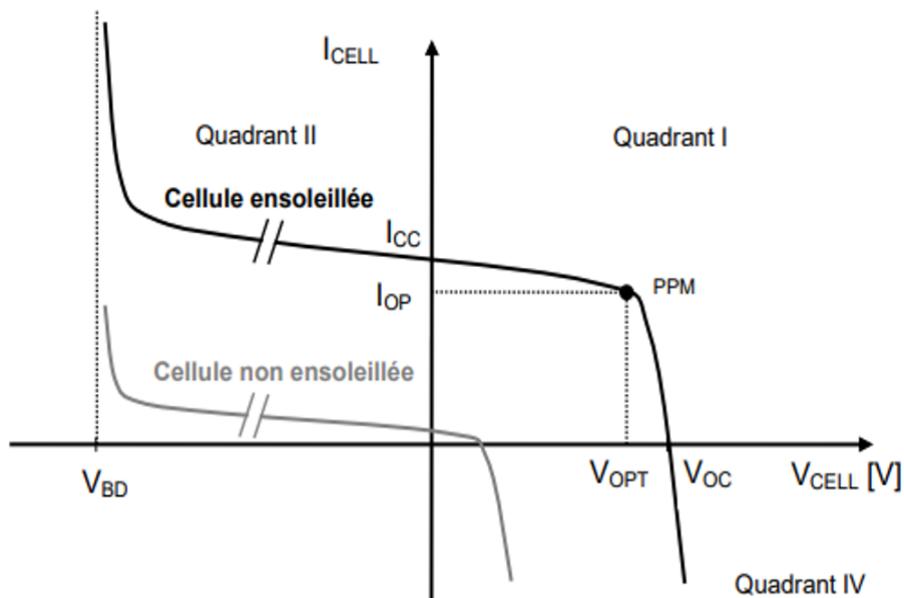


FIGURE 2.1 – Caractéristique I d'une cellule PV pour un éclairement et une température donnée [10].

La (Figure 2.2) illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle illustre le schéma électrique équivalent PV réel pour le fonctionnement du quadrant I et IV.

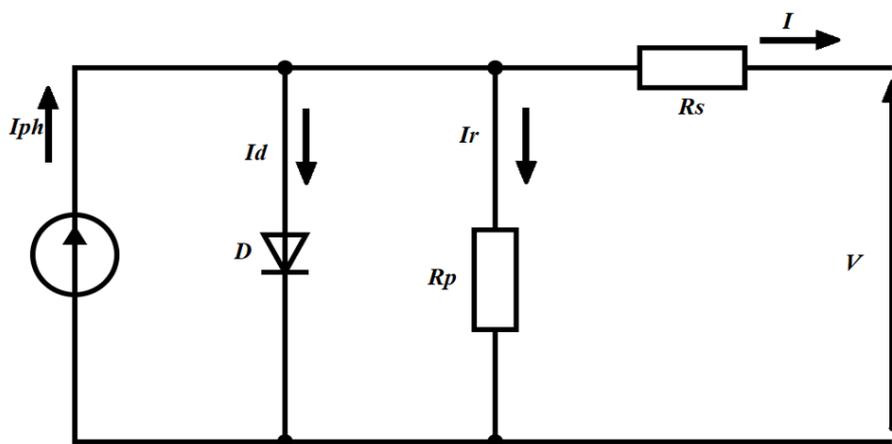


FIGURE 2.2 – Modèle équivalent électrique d'une cellule PV.

2.3 Présentation du modèle mathématique

Il est possible de modéliser une cellule PV à partir de l'équation ci-dessous qui définit son comportement [11-20].

Cette équation tient en compte :

- Le photo-courant I_{ph} associé à l'éclairement ψ :

$$I_{ph} = I_{sc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) \quad (2.1)$$

- Le courant traversant la diode ou le courant de la jonction I_d :

$$I_d = I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + I R_s}{n K T} \right)} - 1 \right) \quad (2.2)$$

- Le courant I_R dans la résistance R_p :

$$I_R = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (2.3)$$

A partir de la (**Figure 2.2**) nous pouvons écrire la relation suivante à l'aide de la loi des nœuds :

$$I_{ph} = I_d + I_R + I$$

A partir de ces équations le courant délivré par l'activité d'une cellule photovoltaïque composé d'une jonction peut être décrite par l'équation suivante :

$$I = I_{SC} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{q \left(\frac{V + I R_s}{n K T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (2.4)$$

2.4 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés par des courbes courant-tension ou de l'équation caractéristique. Les plus courantes sont les suivantes [21] :

a. Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans les conditions idéales (R_S nulle et R_P infinie), ce courant se confond avec la photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (2.4), on obtient :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{R_S I_{CC}}{V_T} \right)} - 1 \right) - \frac{R_S I_{CC}}{R_P} \quad (2.5)$$

Pour la plupart des photopiles (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left(e^{\left(\frac{V + I \cdot R_S}{nKT} \right)} - 1 \right)$ devant I_{ph} , L'expression approchée du courant de court-circuit alors :

$$I_{CC} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_S}{R_P}} \quad (2.6)$$

b. Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{CO} lorsque le courant fourni par le générateur photovoltaïque est nul (Il s'agit de la tension maximale de la photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{CO}}{V_T} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{CO}}{R_P} \quad (2.7)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

$$V_{CO} = V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (2.8)$$

c. Facteur de forme

Le facteur de forme ou facteur de remplissage (fill factor) est une mesure de la proximité avec laquelle une cellule solaire agit comme une source idéale.

C'est le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($V_M * I_M$) de la photopile sous les conditions de mesures standardisées, et le produit $I_{CC} * V_{CO}$.

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{CO} I_{CC}} \quad (2.9)$$

Graphiquement ce facteur est la déviation de la courbe courant-tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{CO} et largeur I_{CC}) qui correspond à la photopile idéale. Les facteurs de remplissage sont normalement d'environ 80% pour les cellules en silicium [22].

d. Le rendement

Le rendement η des cellules photovoltaïques représente le rapport entre l'énergie électrique maximale produite par la cellule et l'énergie lumineuse reçue sur la surface ou bien la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_M}{P_{in}} \quad (2.10)$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert [23].

2.5 Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

Pour optimiser le système de conversion d'énergie, il est nécessaire de connaître ses différentes parties, de la source à l'utilisation. Il est constitué d'une turbine éolienne, d'une génératrice, et d'un convertisseur statique. Ce système alimente une charge autonome par l'intermédiaire d'un dispositif d'interconnexion.

La (Figure 2.3) rappelle le schéma synoptique d'une chaîne éolienne [39].

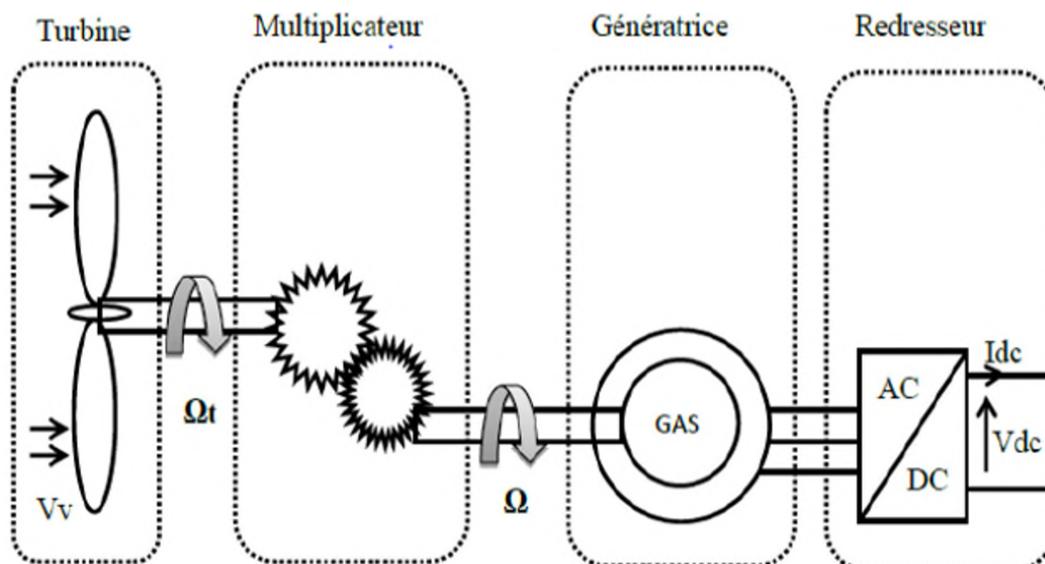


FIGURE 2.3 – Schéma synoptique de l'aérogénérateur [39].

2.6 Modèle du vent

Le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés [38]. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps [39].

$$V_V = f(t) \quad (2.11)$$

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_V^3 \quad (2.12)$$

2.7 Modèle de la turbine

Le dispositif à modéliser est constitué d'une turbine éolienne, qui comprend des pales. La longueur R entraîne le générateur à travers un multiplicateur de vitesse [34].

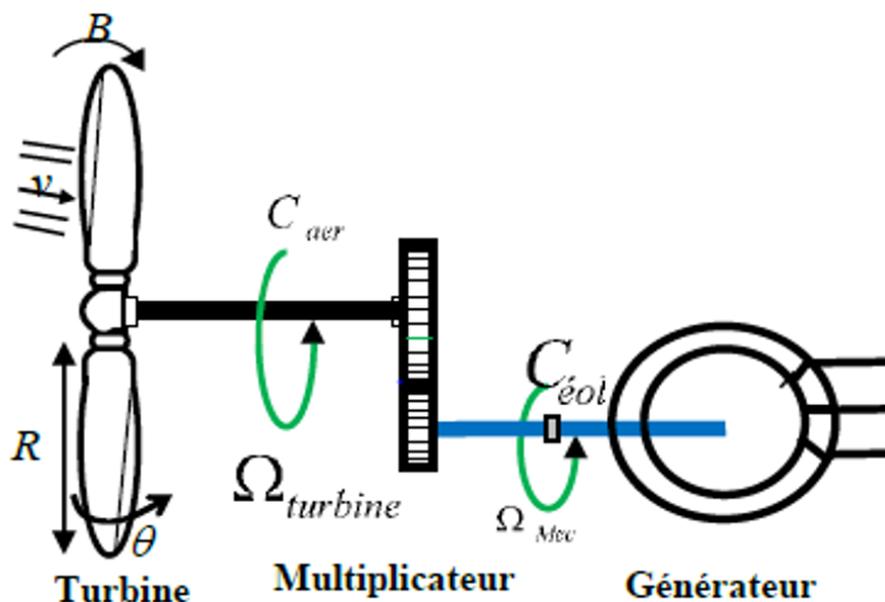


FIGURE 2.4 – Schéma de la turbine éolienne.

La puissance aérodynamique apparaissant au rotor s'écrit alors [38] :

$$P_t = C_P \cdot P_V = C_P \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_V^3}{2} \quad (2.13)$$

Le couple aérodynamique est donné alors par la formule suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V_V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_t} \quad (2.14)$$

- Ω_t : La vitesse de la turbine.
- ρ : La densité de l'air.
- S : L'aire balayée par la turbine.
- V_V : Vitesse du vent.
- C_p : Le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des dimensions de la pôle, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de la pôle β .

2.8 Le multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes [34] :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (2.15)$$

Le couple sur l'arbre est exprimé par la relation suivante :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \quad (2.16)$$

Avec :

- G : Le gain du multiplicateur.
- Ω_{mec} : La vitesse mécanique de la génératrice ($\frac{rad}{s}$).
- Ω_t : La vitesse de la turbine ($\frac{rad}{s}$).
- C_t : Le couple aérodynamique (N.m).
- C_g : Le couple du générateur en (N.m).

2.9 Modélisation de l'Arbre Mécanique

L'arbre est composé d'une masse correspondant à l'inertie du rotor de la turbine supportant les pales, le moyeu et une petite inertie représentant le rotor du générateur. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est celle du générateur J_g et l'inertie de la turbine J_t ramenée au rotor du générateur [40], où :

$$J = J_g + J_t \cdot G^2 \quad (2.17)$$

$$C_m = \frac{J \cdot d\Omega}{dt} \quad (2.18)$$

$$C_m = C_g - C_{em} - C_r \quad (2.19)$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f .

$$C_r = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.20)$$

En remplaçant (2.19) et (2.20) dans (2.21), nous aurons :

$$C_g - C_{em} = \frac{J \cdot d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.21)$$

En se basant sur ce qui a précédé, la turbine d'une éolienne peut être modélisée comme le montre le schéma bloc de la (Figure 2.5).

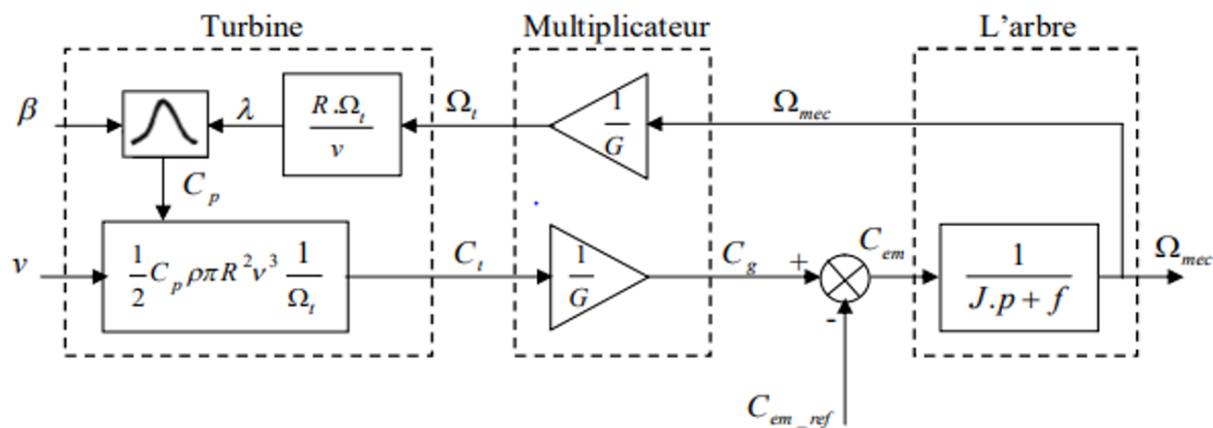


FIGURE 2.5 – Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne [40].

2.10 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La structure générale d'une machine synchrone à aimants permanents est présentée par la figure (2.6). L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. En supposant que ces aimants sont rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air [44].

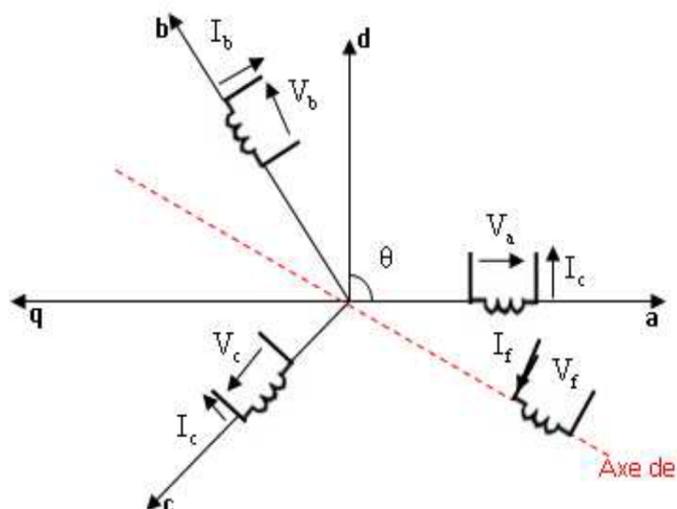


FIGURE 2.6 – Représentation symbolique de la GSAP.

Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes [33].

a. Equations des tensions

Les équations des tensions (convention moteur) sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Où :

- $V_{a,b,c}$: Les tensions de phase de la machine.
- $I_{a,b,c}$: Les courants de phase de la machine.
- L : Inductance.
- R_s : Résistance de l'enroulement statorique.
- $E_{a,b,c}$: Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

b. Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP

- En reportant la transformation de PARK, on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L \\ \omega L & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

- L'expression des fem est donnée par :

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \phi_f \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Ou : ϕ_f est le flux de l'aimant permanent.

- Le système d'équations (2. 27) devient :

$$\begin{aligned} V_d &= -R_s I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} + L_q I_q \omega \\ V_q &= -R_s I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} + (-L_d I_d + \phi_f) \omega \end{aligned} \quad (2.25)$$

- L'expression de la puissance transmise est la suivante :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (2.26)$$

- L'expression du couple :

$$\begin{aligned} C_{em} &= \frac{3}{2} p (\phi_d I_q - \phi_q I_d) \\ C_{em} &= \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) I_d I_q + \phi_f I_q] \\ C_m - C_{em} - F\Omega &= J \frac{d\Omega}{dt} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Avec C_m est le couple moteur appliqué sur la génératrice.

- Fonctionnement en charge (R_{ch}, L_{ch}) :

$$\begin{aligned} V_d &= -R_{ch} I_d - L_{ch} \frac{dI_d}{dt} + L_{ch} I_q \omega \\ V_q &= -R_{ch} I_q - L_{ch} \frac{dI_q}{dt} + (-L_{ch} I_d + \phi_f) \omega \end{aligned} \quad (2.28)$$

- En remplaçant V_d et V_q dans (2.28) on obtient le systeme suivant :

$$\begin{aligned} 0 &= -(R_s + R_{ch}) I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{dI_d}{dt} + (L_q + L_{ch}) I_q \omega \\ 0 &= -(R_s + R_{ch}) I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{dI_q}{dt} + (-L_d + L_{ch}) I_d + \phi_f \omega \end{aligned} \quad (2.29)$$

- On cherche à obtenir un système d'équations sous forme d'équation d'état :

$$[X] = [A][X] + [B][U], [X] = \begin{bmatrix} I_d & I_q \end{bmatrix}, [U] = \begin{bmatrix} 0 & \phi_f \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

- On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = [A_1] + W_r[A_2] : [A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s+R_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s+R_{ch}}{L_q+L_{ch}} \end{bmatrix} + W_r \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} \\ -\frac{L_q+L_{ch}}{L_d+L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$[B][U] = W_r \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

2.11 Modélisation d'un hacheur buck-boost non inverseur

Le convertisseur buck-boost inverseur ne sert pas les besoins des applications où une tension de sortie positive est obligatoire, On peut effectuer une configuration en cascade du convertisseur Buck et Boost, avec un interrupteur complémentaire comme est affiché sur la (figure 2.7) [43].

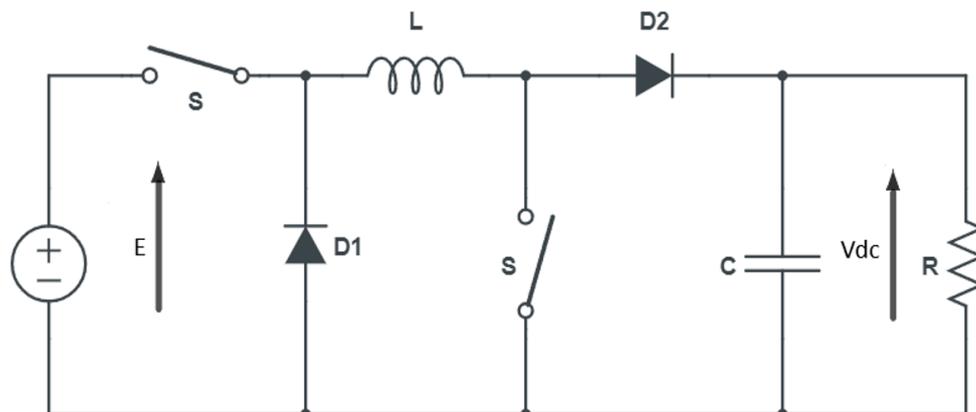


FIGURE 2.7 – Schéma de principe du convertisseur non inverseur Buck-Boost.

On a :

$$L \frac{dI_L}{dt} = UE - V_{dc}(1 - U) \quad (2.33)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_L(1 - U) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.34)$$

Après La procédure de dérivation des équations dynamiques en régime de conduction continue. En régime interrupteur passant, S est égal à 1, la diode est bloquée et les équations dans ce cas sont :

$$L \frac{dI_L}{dt} = UE \quad (2.35)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -\frac{V_{dc}}{R} \quad (2.36)$$

Lorsque l'interrupteur est bloqué, S est égal à 0 et la diode conduit. Les équations sont :

$$L \frac{dI_L}{dt} = -V_{dc} \quad (2.37)$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = I_L - \frac{V_{dc}}{R} \quad (2.38)$$

On appliquant la méthode d'espace d'état des équations (2.33 – 2.38) on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-U}{L} \\ \frac{1-U}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{U}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (2.39)$$

2.12 Régulateur PI

L'algorithme de commande utilisé pour la régulation de la tension aux bornes de deux systèmes est basé sur deux boucles de régulation en cascade : Une régulation du courant hybride par hystérésis et une boucle de régulation de la tension V_{dc1} . La fonction de transfert est la suivante [43] :

$$F(s) = \frac{V_{dc1}(s)}{I_{hy}(s)} = \frac{V_{dc1}}{C_s + \frac{1}{R_{ch}}} \quad (2.40)$$

$$R_{ch} \implies F(s) = \frac{V_{dc1}}{C_s}$$

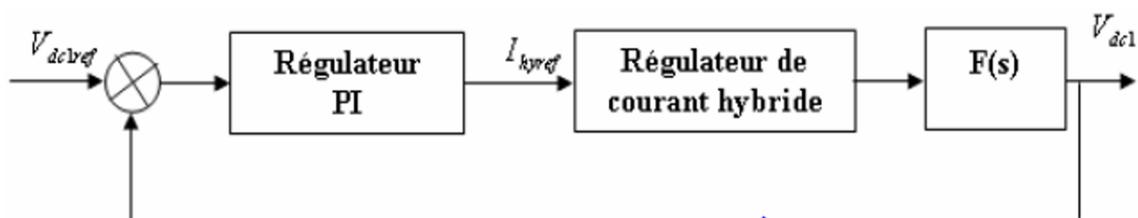


FIGURE 2.8 – Régulation de la tension du bus [43].

Soit $G(s)$ la fonction de transfert en boucle ouverte, elle peut être exprimée par :

$$G(s) = G_{PI}(s) \cdot G_I(s) \quad (2.41)$$

Les fonctions de transfert $G_{PI}(s)$ et $G_I(s)$ sont données :

$$\begin{aligned} G_{PI}(s) &= \left(K_P + \frac{1}{sT_i}\right) \\ G_I(s) &= \frac{1}{1+sT} \end{aligned} \quad (2.42)$$

En prenant $T_i = RC$ et $T \approx 0.8T_i$ la fonction $G(s)$ est égale à :

$$G(s) = \left(K_P + \frac{1}{sT_i}\right) \left(\frac{1}{1+sT}\right) \quad (2.43)$$

Alors, la fonction $G(s)$ en boucle fermée est donnée :

$$G(s) = \frac{\frac{K_p}{T} \left(s + \frac{1}{T_i K_p}\right)}{s^2 + s \left(\frac{1+K_p}{T}\right) + \frac{1}{TT_i}} \quad (2.44)$$

L'identification de l'équation caractéristique de deuxième ordre $s^2 + 2\xi\omega s + \omega^2$ est :

$$\omega^2 = \frac{1}{TT_i} \quad (2.45)$$

$$Kp = 2\xi\omega T - 1 \quad (2.46)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (2.47)$$

- ω est la bande passante et ξ est le coefficient d'amortissement.

Pour avoir une réponse du correcteur avec un petit dépassement, ξ doit être choisit entre 0.5 et 0.7.

2.13 Le redressement non commandé

Ce type de redresseur permet d'obtenir en sortie une tension redressée dont la valeur moyenne est fixée (non réglable). Ce dispositif est réalisé à partir des diodes.

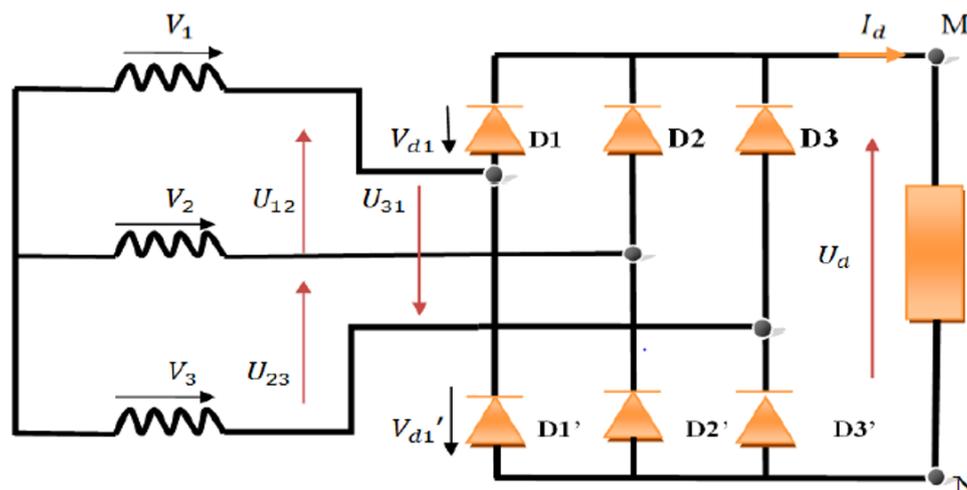


FIGURE 2.9 – Redresseur double alternance non commandé.

L'existence d'un courant continu dans la charge exige la conduction de deux diodes à tout instant, une de chaque commutateur.

Si $(v_1 > v_3 > v_2)$ D_1 et D_2' conduisant et $U_d = v_1 - v_2$

Si $(v_1 > v_2 > v_3)$ D_1 et D_3' conduisant et $U_d = v_1 - v_3$

Si $(v_2 > v_1 > v_3)$ D_2 et D_3' conduisant et $U_d = v_2 - v_3$ etc...

La tension u_d redressée est périodique de période $T/6$.

Entre $T/12$ et $T/4$, cette tension s'exprime par :

$$U_d = v_1 - v_2 = v\sqrt{2}(\sin(Wt) - \sin(Wt - \frac{2\pi}{3})) \quad (2.48)$$

avec v est la valeur efficace des tension simple.

La valeur de la tension moyenne redressée est donnée par la forme suivante :

$$U_{dmoy} = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} U_d(t) dt = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_M [\sin(Wt) - \sin(Wt - \frac{2\pi}{3})] d(Wt) = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_M \quad (2.49)$$

$$U_{red} = \max(V_a, V_b, V_c) - \min(V_a, V_b, V_c) \quad (2.50)$$

2.14 L'onduleur triphasé de tension

L'onduleur autonome de tension triphasé réalise une conversion réversible continu-alternatif. L'onduleur de tension à MLI est généralement choisi pour sa réponse rapide et ses performances élevées. Il permet d'imposer à la machine des ondes de tensions de différentes amplitudes et fréquences à partir d'un réseau standard 220/380-50 Hz. Après redressement, la tension filtrée U (étage continu) est appliquée à l'onduleur.

L'onduleur triphasé peut être considéré comme trois onduleurs monophasés. Il est composé de six transistors ($T_1, T_2, T_3, T'_1, T'_2, T'_3$) shuntés en antiparallèle par des diodes de récupération ($D_1, D_2, D_3, D'_1, D'_2, D'_3$) [34].

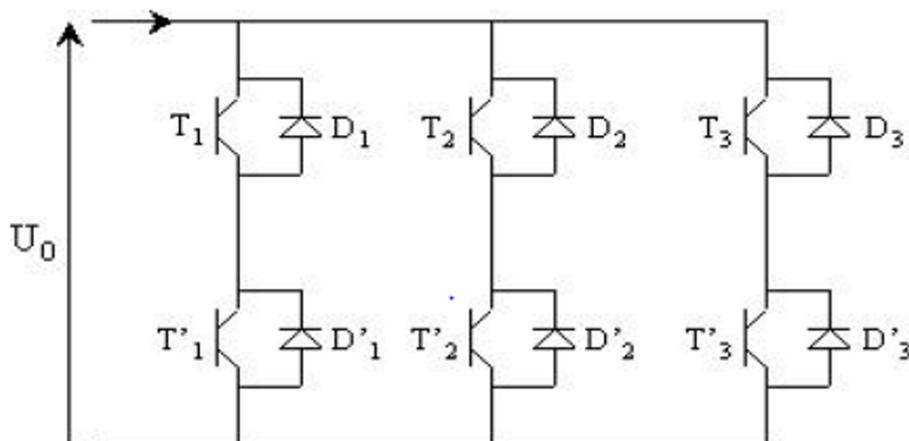


FIGURE 2.10 – Schéma d'un onduleur triphasé [34].

L'onduleur utilisé est un onduleur à trois bras, chaque bras étant constitué de deux interrupteurs bidirectionnels. Un interrupteur est composé par un transistor T_i et d'une diode D_i . La commande des transistors étant complémentaire, nous pouvons remplacer chaque bras de l'onduleur par un interrupteur à deux positions (K_i) [34].

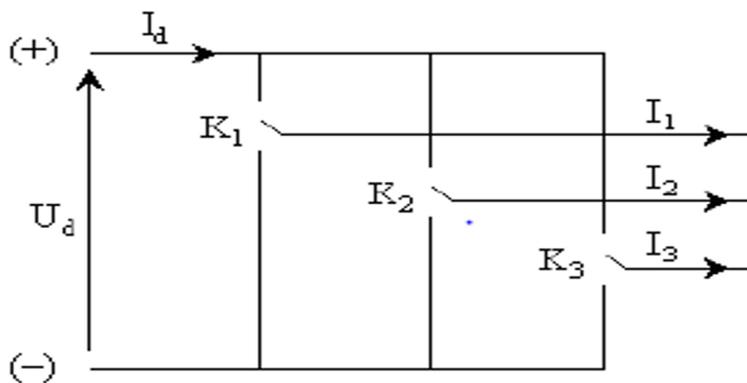


FIGURE 2.11 – Représentation des transistors par des interrupteurs [34].

On définit les fonctions logiques de connexion par :

$$K_i = \begin{cases} 0 & , \text{ si } T_i \text{ est fermé et } T'_i \text{ ouvert} \\ 1 & , \text{ si } T_i \text{ est ouvert et } T'_i \text{ fermé} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.51)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur sont données par :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= (K_1 - K_2)U_d \\ V_{bc} &= (K_2 - K_3)U_d \\ V_{ca} &= (K_3 - K_1)U_d \end{aligned} \quad (2.52)$$

Par conséquent, les tensions simples sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{U_d}{3}(2K_1 - K_2 - K_3) \\ V_b &= \frac{U_d}{3}(K_1 - 2K_2 - K_3) \\ V_c &= \frac{U_d}{3}(K_1 - K_2 - 2K_3) \end{aligned} \quad (2.53)$$

Avec une représentation matricielle, on a :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_d}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \\ K_2 \\ K_3 \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

2.15 Commande par la logique floue

Actuellement, la méthode de la commande par logique floue est en pleine expansion. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de régulation généralement très efficace sans avoir besoin de faire connaître des modèles mathématiques des systèmes à contrôler. Par contre aux régulateurs classiques, le régulateur flou utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques [46].

2.15.1 Principes généraux d'une commande par logique floue

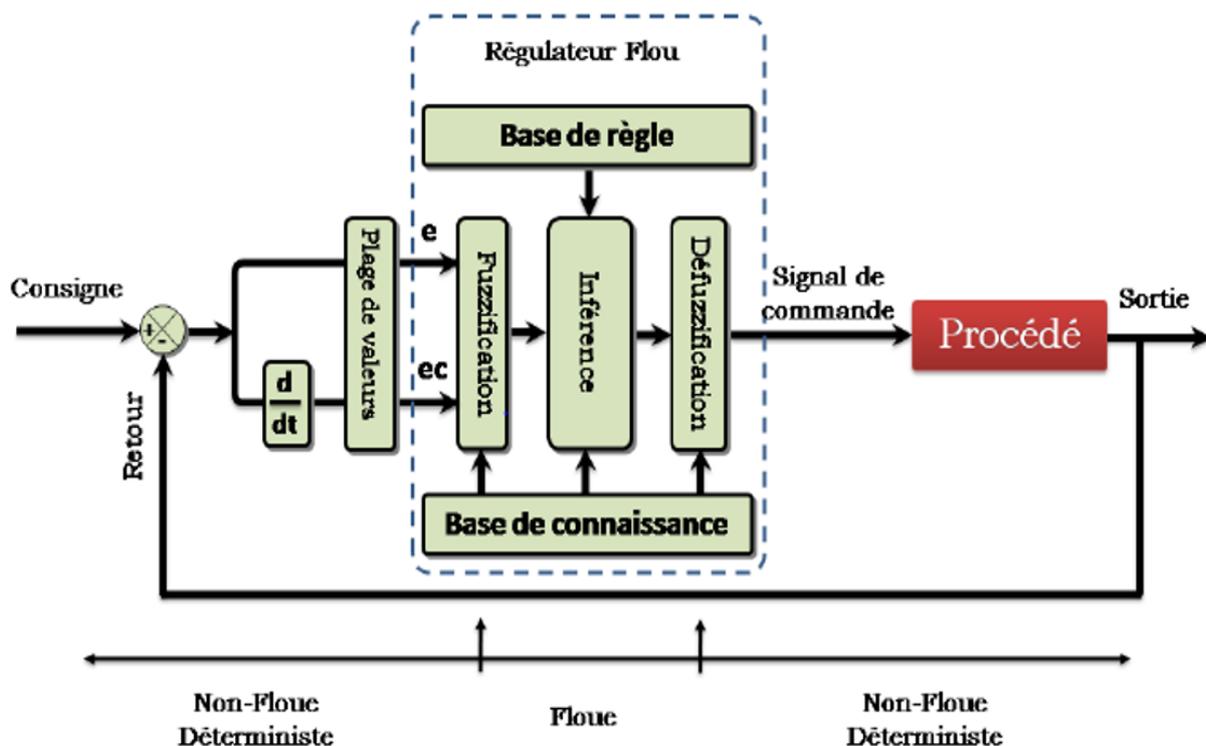


FIGURE 2.12 – Configuration de base d'un régulateur flou [46].

Le régulateur flou doit convertir les valeurs non-floues à son entrée en valeurs floues, les traiter avec les règles floues et reconvertir le signal de commande de valeurs floues en valeurs non-floues pour activer le système [46].

2.15.2 Fonction d'appartenance

L'ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notion de fonction caractéristique en logique classique, elle permet de mesurer le degré d'appartenance d'un élément à l'ensemble flou [33].

La fonction d'appartenance est désignée par $\mu A(x)$. L'argument x se rapporte à la variable linguistique, tandis que l'indice A indique l'ensemble concerné.

A sera noté par :

$$A = (x, \mu A(x)) \quad \text{et} \quad x \in X \quad (2.55)$$

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale.

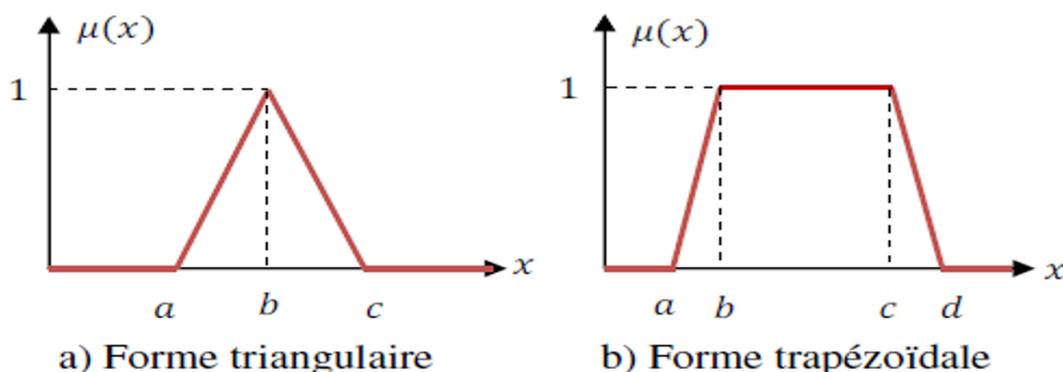


FIGURE 2.13 – Formes triangulaire et trapézoïdale des fonctions d'appartenance.

2.15.3 Variable linguistique

Comme son nom l'indique, une variable linguistique est une variable définie en fonction de mots ou des phrases au lieu des nombres. En effet, la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient généralement des expressions floues comme quelque, beaucoup, souvent, chaud, froid, rapide, lent, grand, petit ... etc. [33].

On peut présenter les variables linguistiques « vitesse petite », « vitesse moyenne » et « vitesse grande » avec des fonctions d'appartenance déterminant les limites de chaque catégorie.

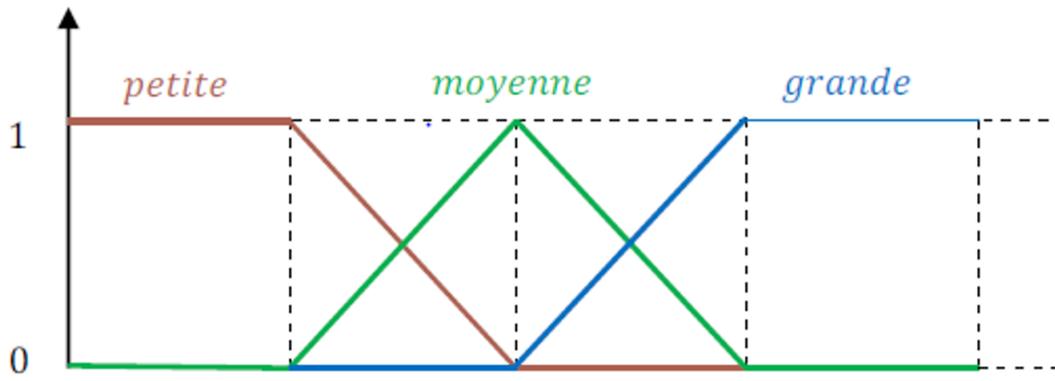


FIGURE 2.14 – Fonctions d'appartenance avec trois sous-ensembles flous pour la variable linguistique.

2.16 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les modèles mathématiques de la cellule photovoltaïque, la turbine éolienne, la machine synchrone à aimants permanents, le redresseur non commandé, le hacheur buck-boost non inverseur, l'onduleur en plus des commandes intelligentes de régulation (PI et logique Floue).

SIMULATION DU SYSTEME DU CONVERSION PHOTOVOLTAIQUE, EOLIEN ET SYSTEME HYBRIDE

3.1 Introduction

Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne, Cette étude porte sur la simulation du couplage des deux chaînes en parallèle.

Les résultats de simulation seront aussi présentés et une comparaison entre le régulateur PI et flou sera effectuée.

3.2 Simulation et résultats de la chaîne de conversion éolienne

L'éolienne ou l'aérogénérateur génère l'énergie électrique due au mouvement des pales tournées par l'énergie cinétique du vent, qui est convertie en énergie électrique a l'aide d'une génératrice synchrone.

Le système de contrôle utilisé possède deux techniques de commande par un régulateur PI et par la logique floue.

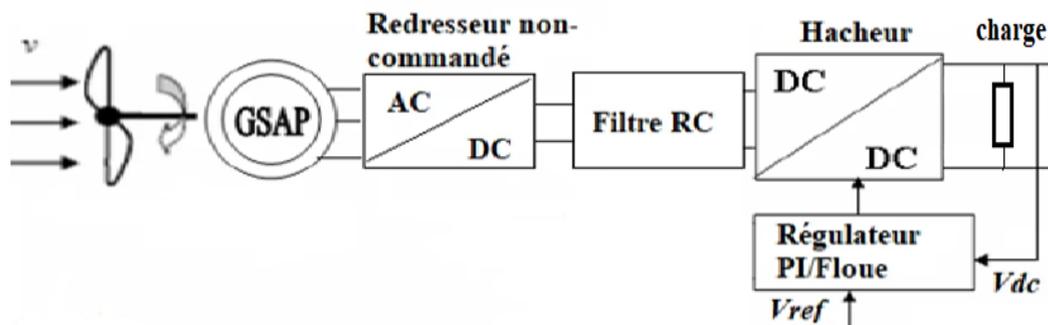


FIGURE 3.1 – Schéma synoptique du système éolien.

Pour une approche complète et réelle nous avons opté pour trois expérimentations : essai à vitesse du vent variable, simulation d'un profil du vent réel et essai avec augmentation de la charge, on prend en considération que l'angle de calage $\beta = 3^\circ$ et le coefficient du puissance égale à 0.35.

3.2.1 Essai à vitesse du vent variable

Pour le premier essai, nous avons appliqué une vitesse du vent de référence de (13m/s à $t=0$ s) et une autre de (15 m/s à $t=5$ s).

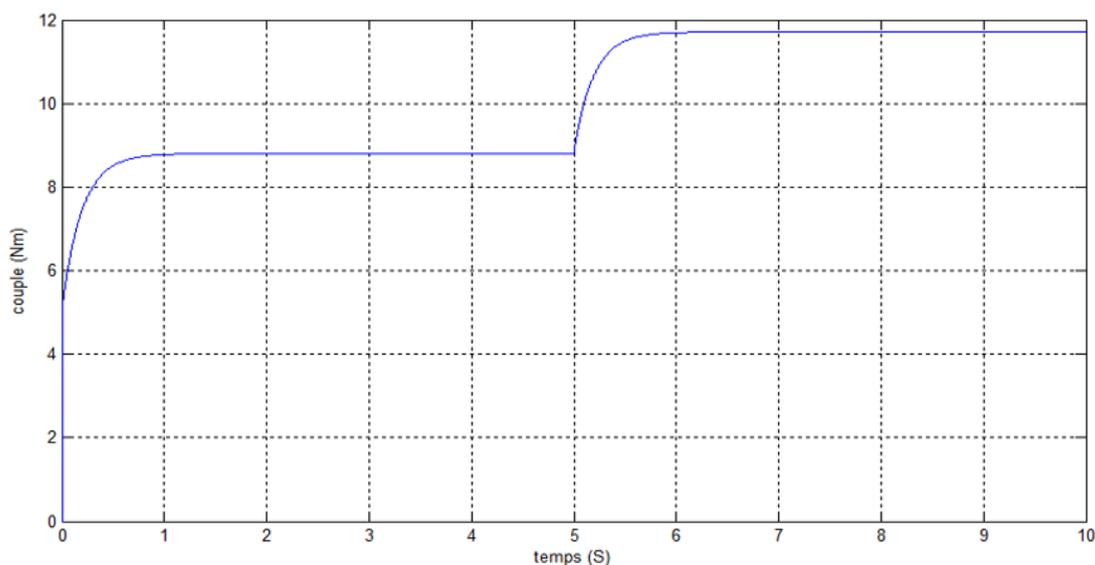


FIGURE 3.2 – Couple turbine en fonction de temps.

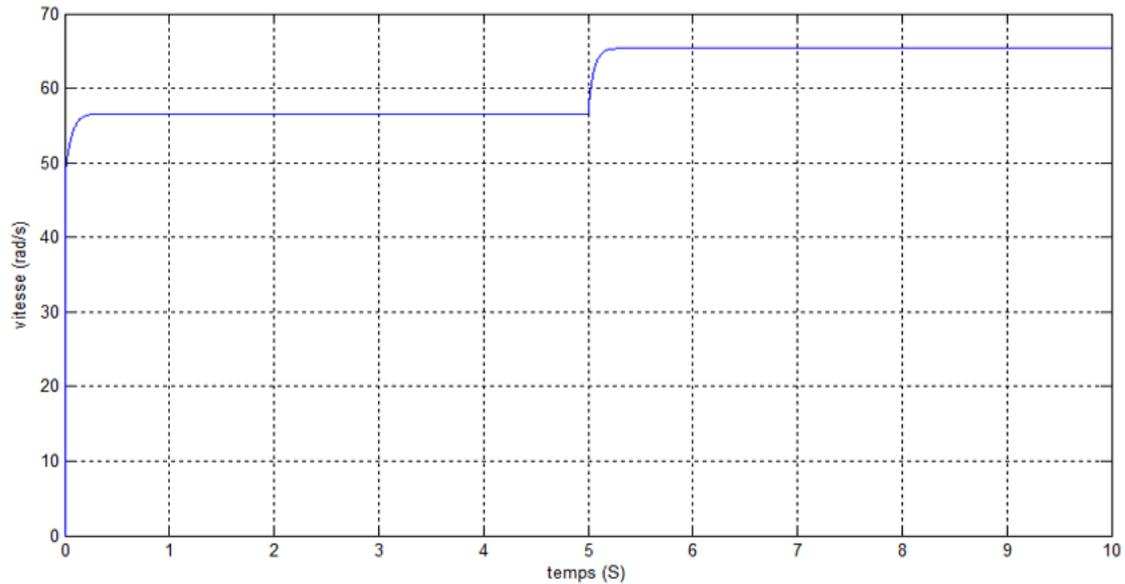


FIGURE 3.3 – Vitesse de rotation optimisée en fonction du temps.

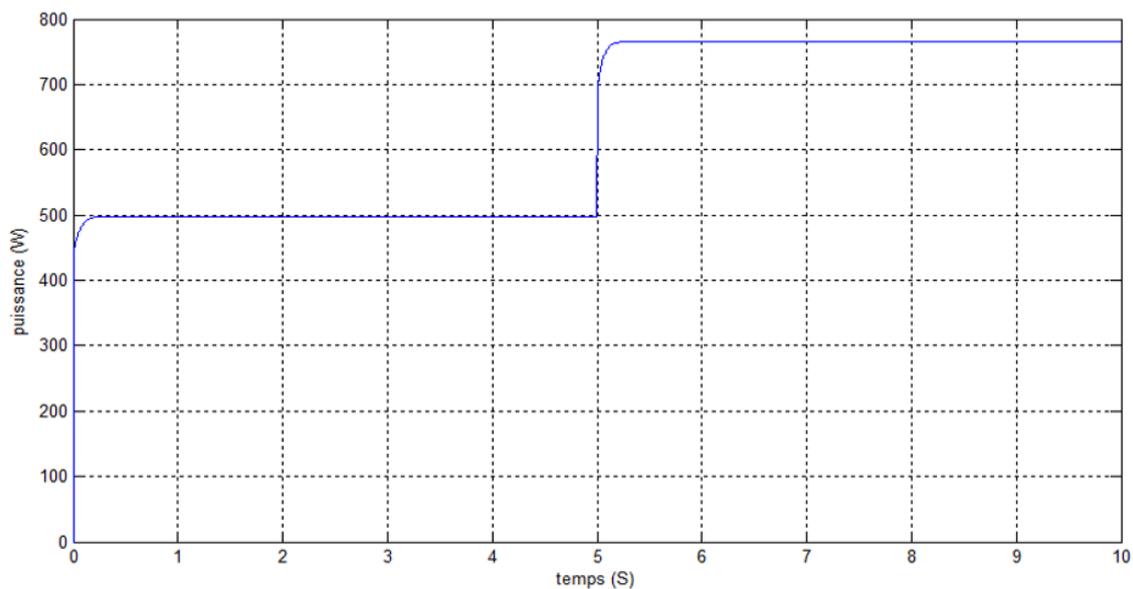


FIGURE 3.4 – Puissance de turbine.

Les résultats de simulation des (**Figures (3.2-4)**) représentant respectivement le couple et la vitesse et la puissance de la turbine simulée, avec une vitesse du vent = 13 m/s nous avons obtenu un couple = 8.9 Nm, vitesse éolienne = 56 rad/s et une puissance = 500W. Après 5 secondes au moment de l'application d'une vitesse du vent de 15 m/s nous remarquons une augmentation de couple à 11.6 Nm, la vitesse à 66 rad/s et la puissance à 760W.

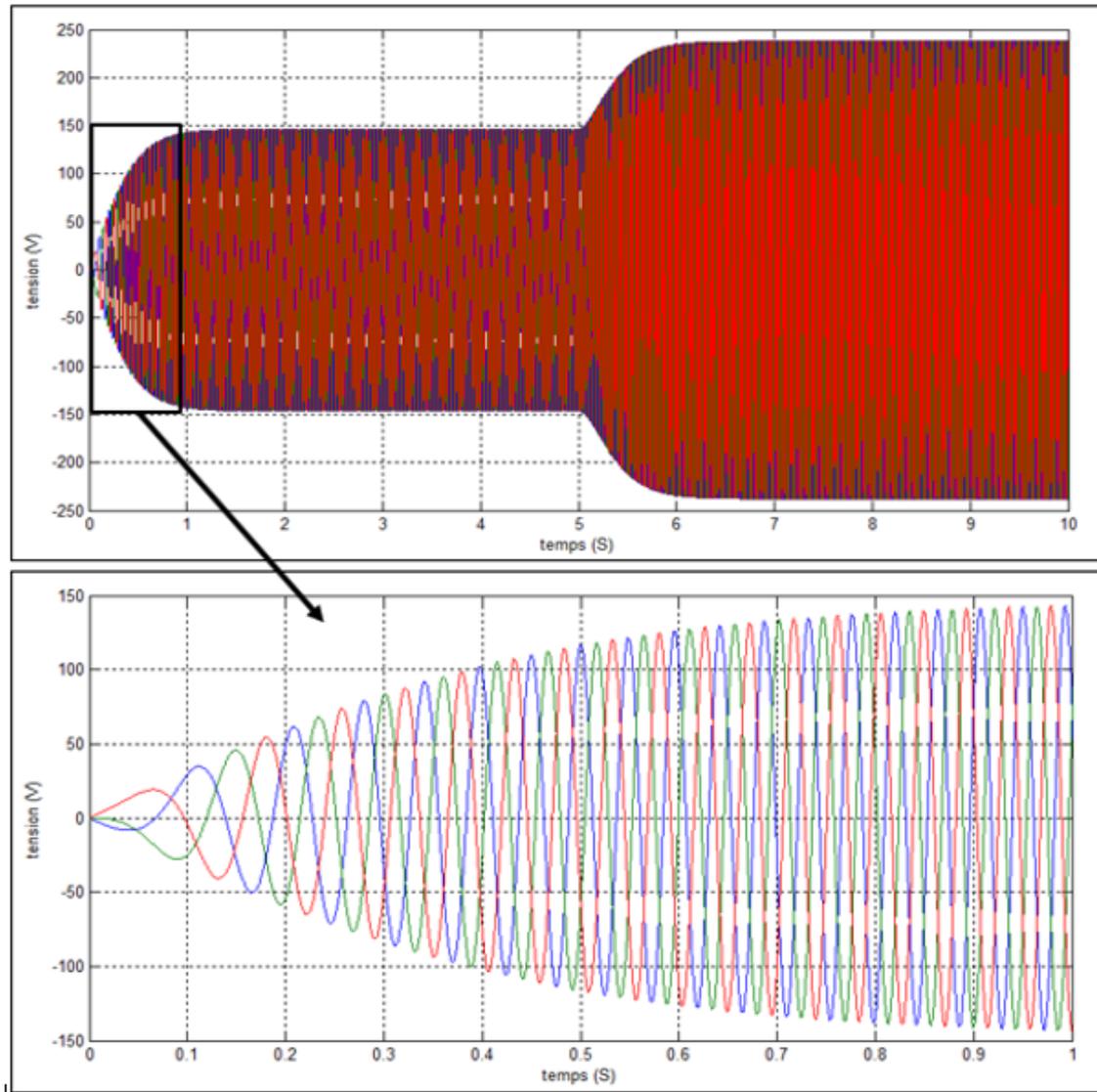


FIGURE 3.5 – Tension de génératrice synchrone.

La (Figure 3.5) montre le changement de la tension de sortie de la génératrice en fonction du temps. Après un régime de transit de l'état statique à l'état dynamique égal à 0.2 sec, on reçoit une tension triphasée sinusoïdale qui atteint 145V avec une vitesse du vent d'entrée 13 m/s, Au moment de l'augmentation de la vitesse à 15 m/s la tension de sortie augmente aussi à une valeur de 233 V.

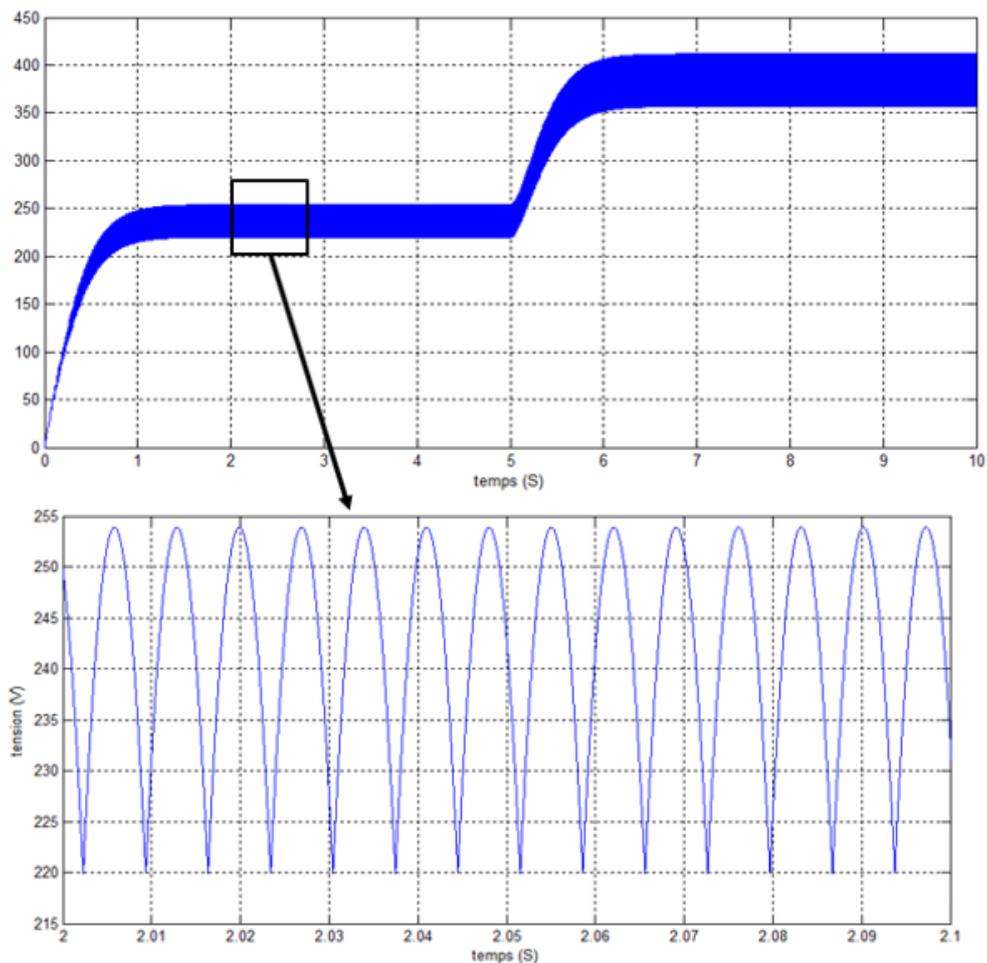


FIGURE 3.6 – Tension redressée.

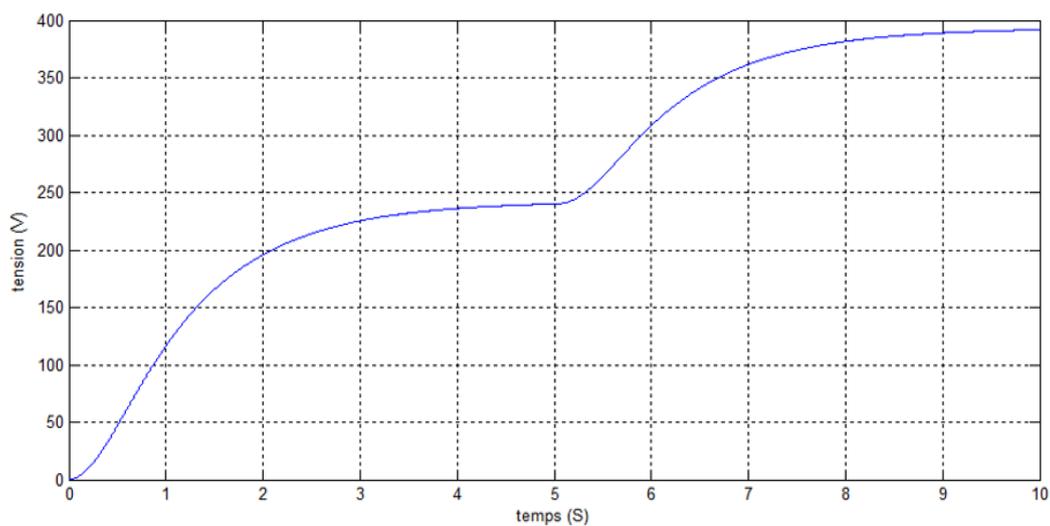


FIGURE 3.7 – Tension filtrée.

La figure précédente illustre la tension à la sortie du redresseur on observe qu'après un régime transitoire d'environ une seconde, la tension reste en moyenne égale à 237 V. Lors de l'augmentation de la vitesse après 5 sec, la tension redressée augmente à 380 V, mais avec une variation ou une plage d'erreur d'environ 15% c'est pour cela qu'on a utilisé un filtre RC (**Figure 3.7**), cependant le temps de réponse du système est dégradé.

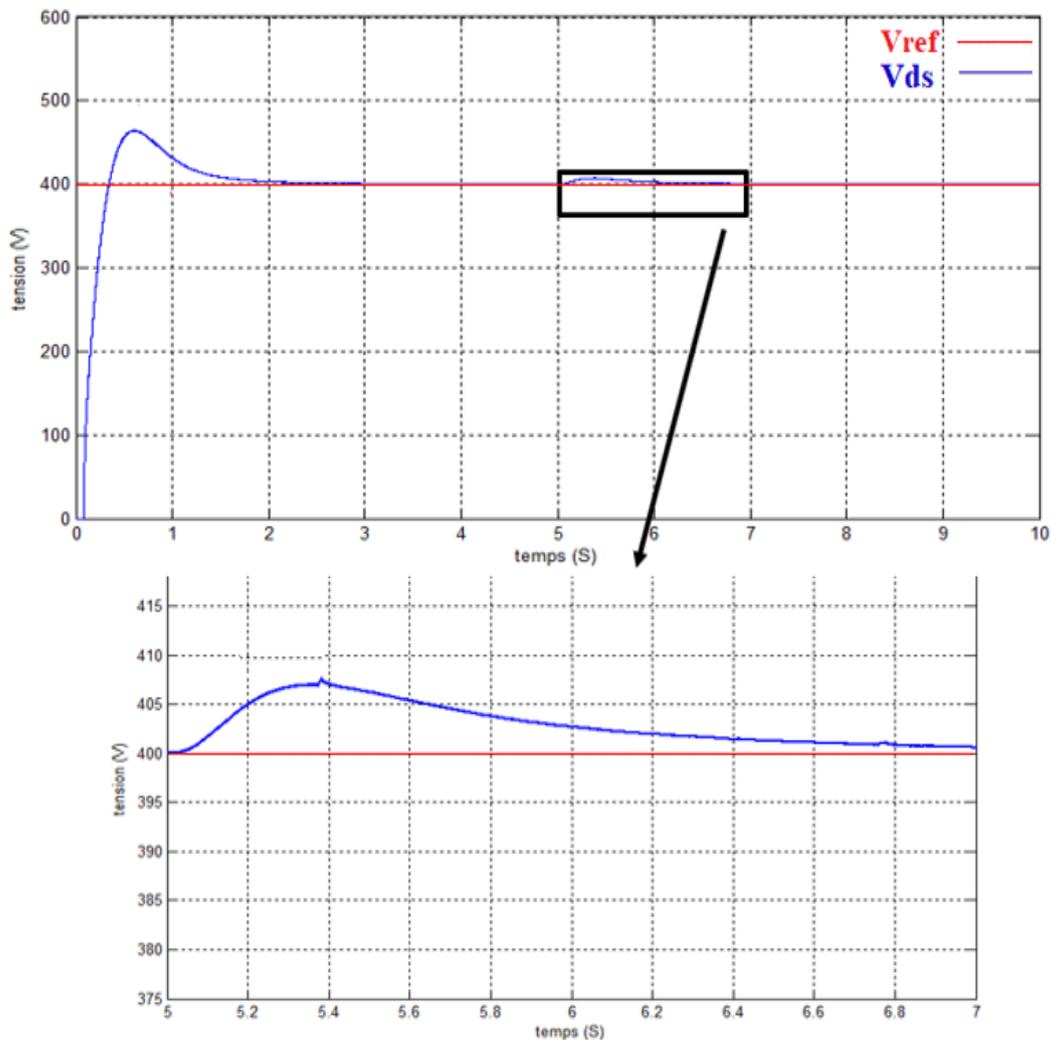


FIGURE 3.8 – Tension de sortie avec un régulateur PI.

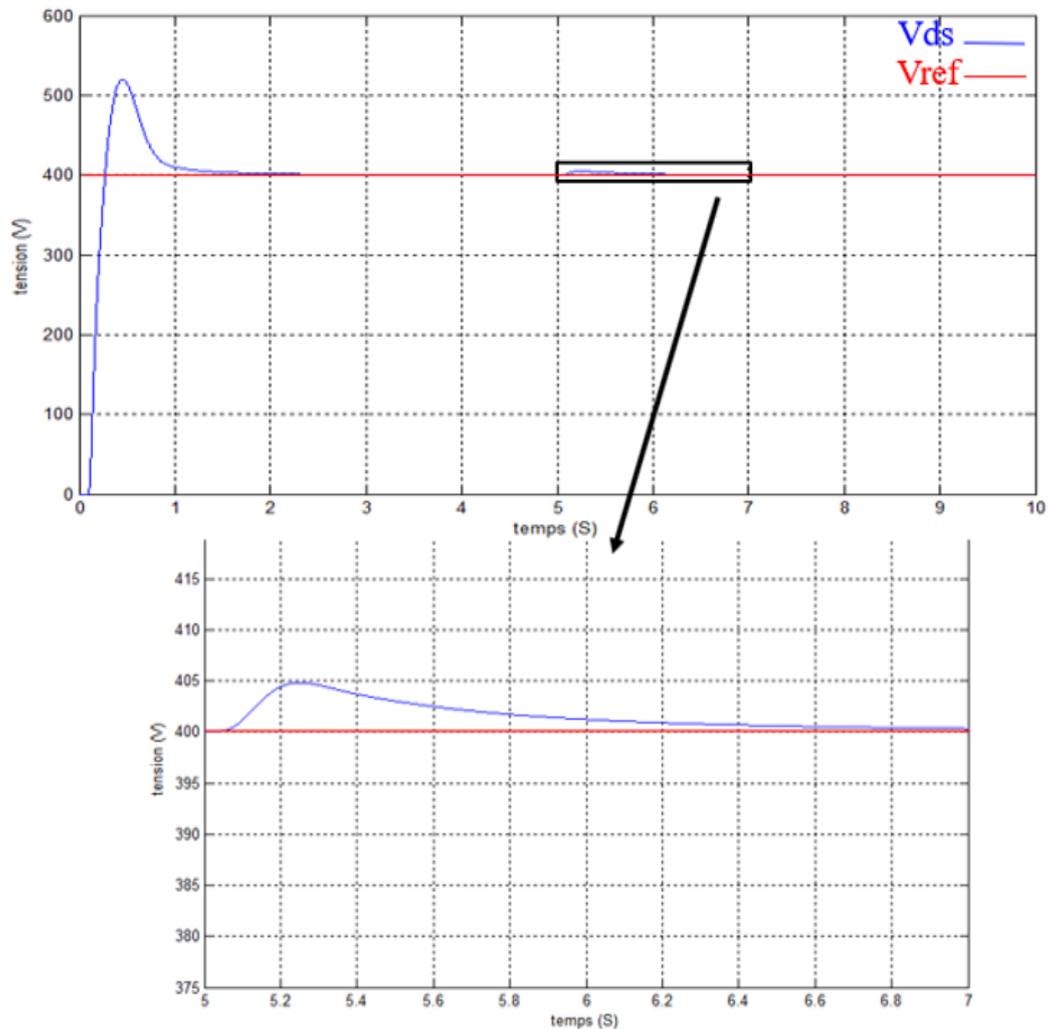


FIGURE 3.9 – Tension de sortie avec une commande logique floue.

L'intégration du contrôleur avec la chaîne de conversion éolienne peut stabiliser la tension de sortie autour la référence souhaitée ($V_{ref} = 400 \text{ v}$).

Pour la (Figure 3.8) on remarque qu'au début de simulation on a un temps de déclenchement de 0.2 sec et un régime transitoire de 1.8 sec suivi d'un pique important cela est causé par la transition d'état de la génératrice synchrone et du filtre RC, à la fin de ce régime transitoire la tension suit la consigne 400V. Après 5 sec lors de l'application de la nouvelle vitesse ce qui se traduit par une nouvelle tension à la sortie du filtre RC ou bien à l'entrée de l'hacheur, on remarque un dépassement de 7 V qui se corrige au bout de 2 sec afin de suivre la référence et passer au régime permanent.

Après l'intégration d'un régulateur flou Mamdani a sept classes on obtient les graphes illustrés par la (**Figure 3.9**).

Premièrement on observe un temps de réponse un peu plus rapide que le régulateur PI (1.4 sec, tandis que le régulateur PI est a 1.8 sec), après ce dernier la tension suit la consigne d'une façon similaire au correcteur PI, ensuite a 5 sec, on remarque que le dépassement dû à l'application de la nouvelle vitesse diminue et le temps de correction de ce dépassement est amélioré 1.6 sec.

3.2.2 Essai d'une simulation de modèle de profil du vent

La modélisation de l'éolienne requies la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande. Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte est assez complexe, pour notre cas ce n'est pas le but de notre étude donc nous avons adopté un modèle préalablement réalisé.

$$V_v = f(t) \quad (3.1)$$

La vitesse du vent sera modélisée, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$V_v = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t) \quad (3.2)$$

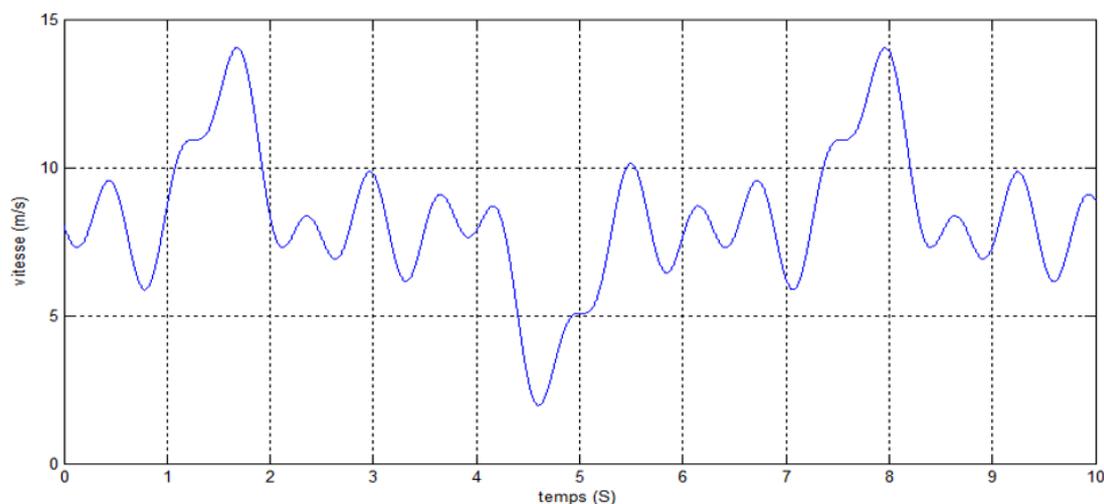


FIGURE 3.10 – Vitesse du vent en fonction du temps.

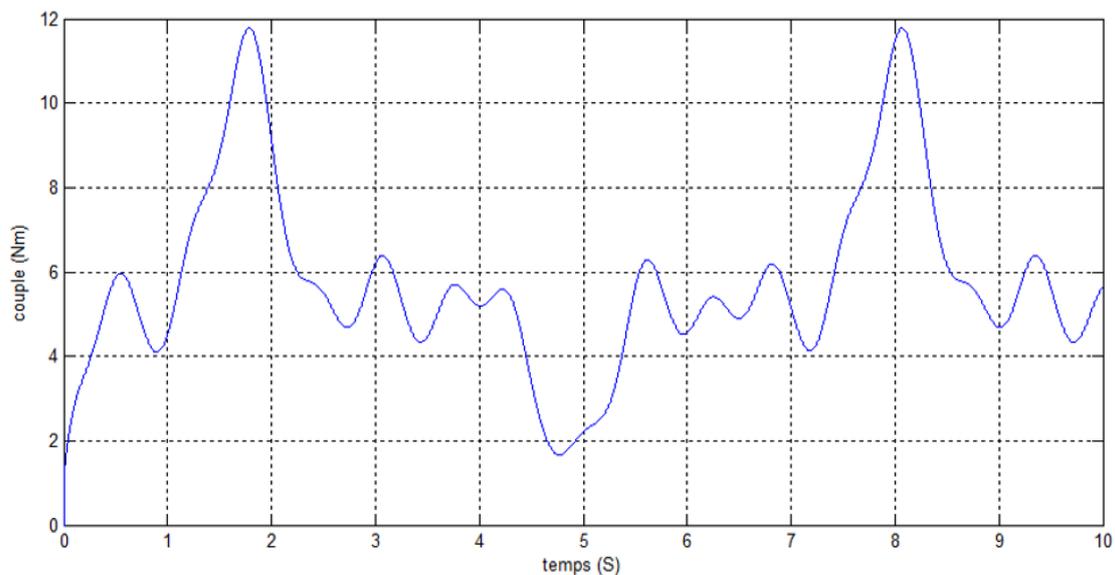


FIGURE 3.11 – Couple de la turbine en fonction du temps.

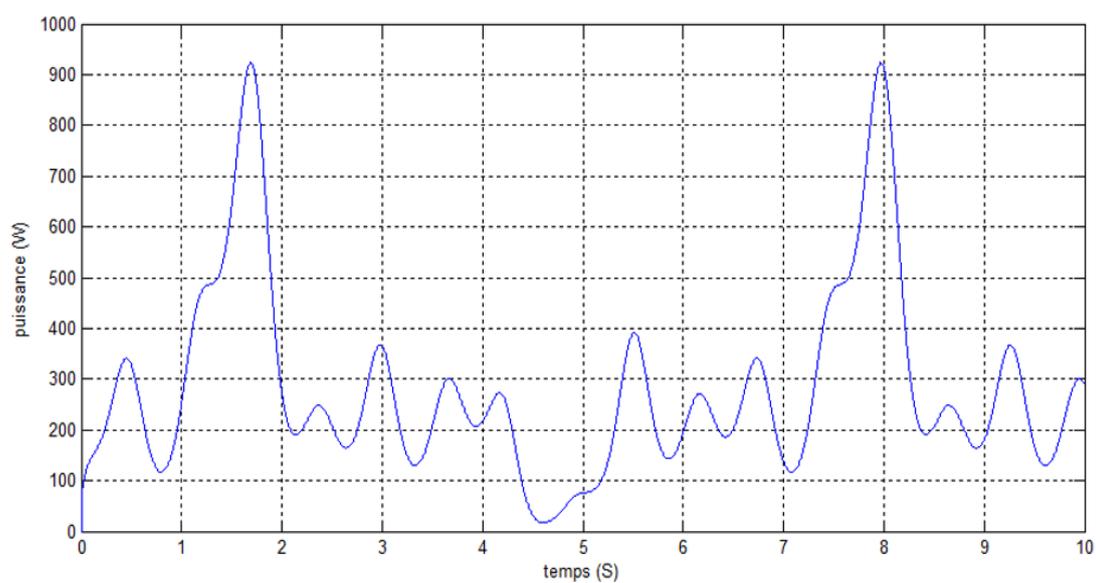


FIGURE 3.12 – Puissance turbine en fonction du temps.

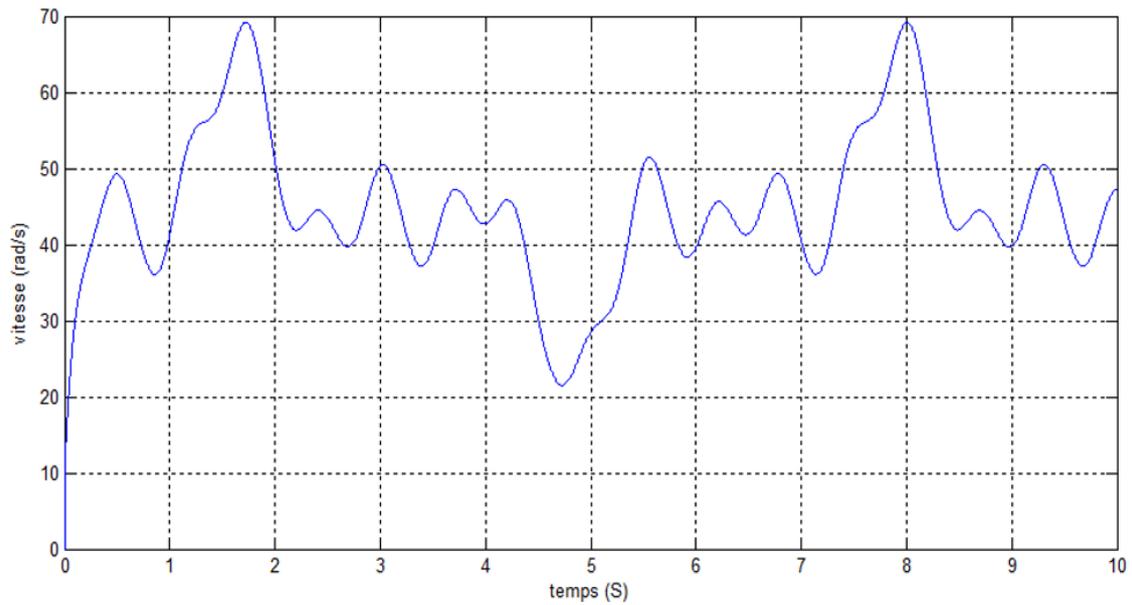


FIGURE 3.13 – Vitesse de rotation de l'éolienne en fonction du temps.

La **Figure 3.10** montre la variation de la vitesse du vent selon la variation de temps ($t=10s$). Cela donne un reflet d'un profil du vent réel.

Les résultats de simulation des (**Figures (3.11-13)**) représentant respectivement le couple et la puissance et la vitesse de la turbine simulée, avec une vitesse de vent variable. On remarque que les allures de couple, puissance et vitesse possède la même allure que le profil du vent appliqué.

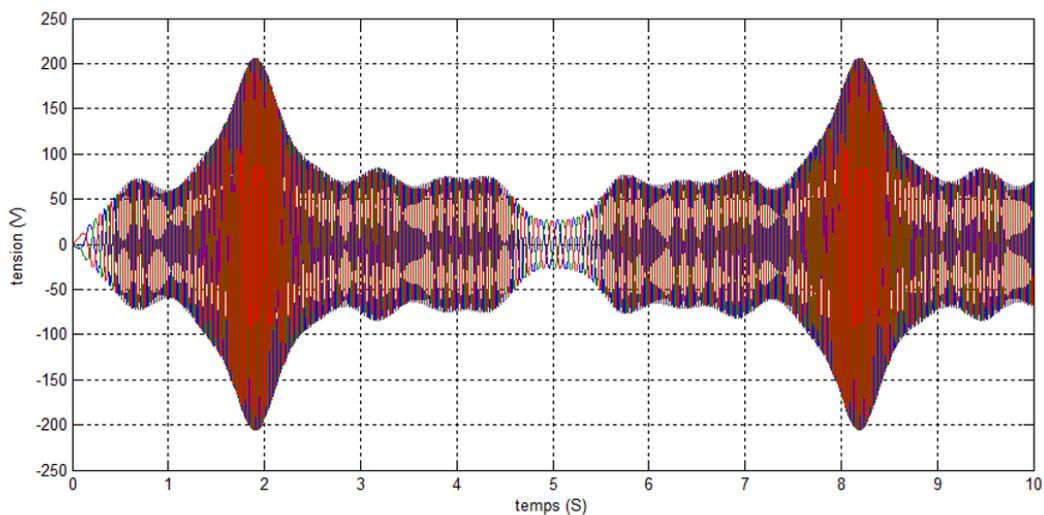


FIGURE 3.14 – Tension de la génératrice synchrone.

La (Figure 3.14) présente la tension de sortie du générateur synchrone en fonction du temps et affiche l'influence de la variation du profil du vent sur la qualité de l'induite f.é.m, la tension de sortie est proportionnelle au couple d'entrée qui est lui-même dépendant de la vitesse du vent.

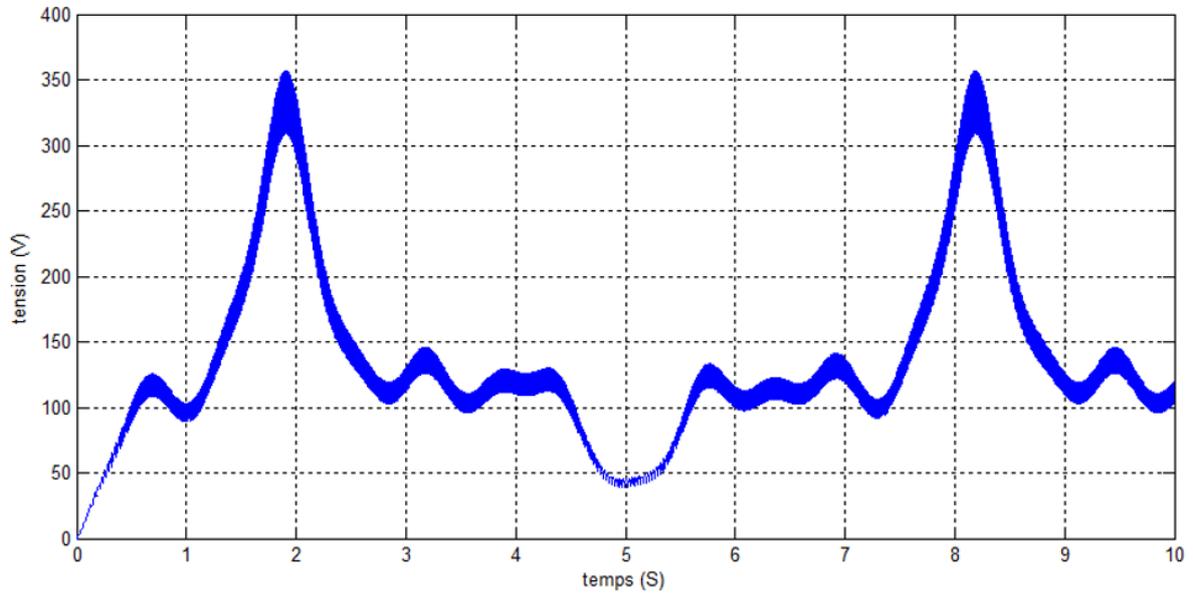


FIGURE 3.15 – Tension de sortie du redresseur.

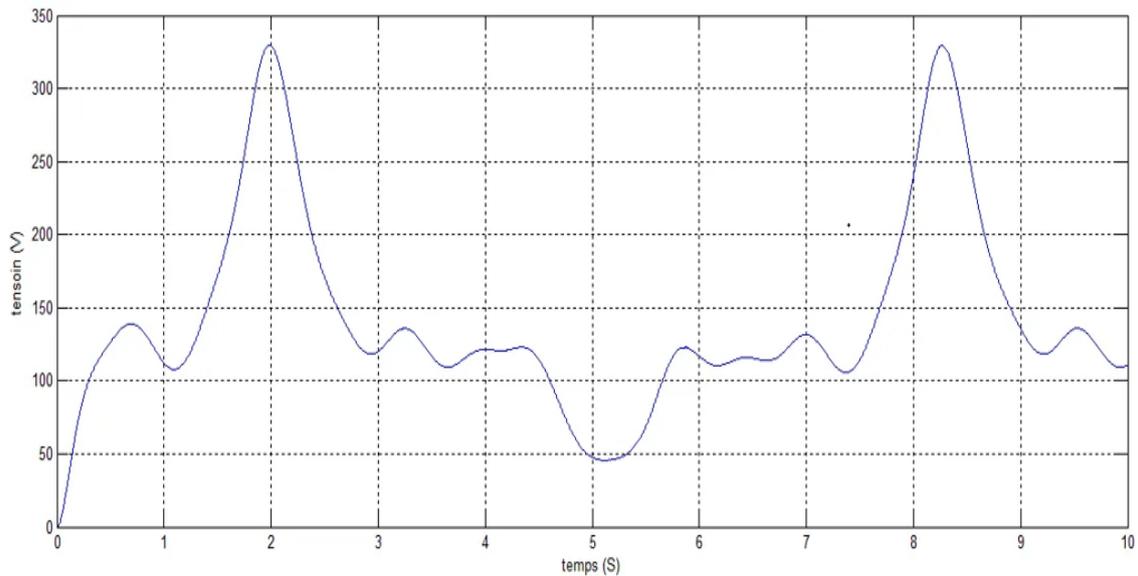


FIGURE 3.16 – Tension après filtrage.

La (Figure 3.15) représente la tension redressée en fonction du temps, on remarque une variation de tension qui reflète la tension d'entrée (f.é.m.) suivi de pics importants de tension qui dépasse 50% c'est pourquoi on a utilisé un filtre RC voir (Figure 3.16), on reçoit une tension filtrée avec des variations et des pics moins importants, mais avec une réponse un peu plus lente.

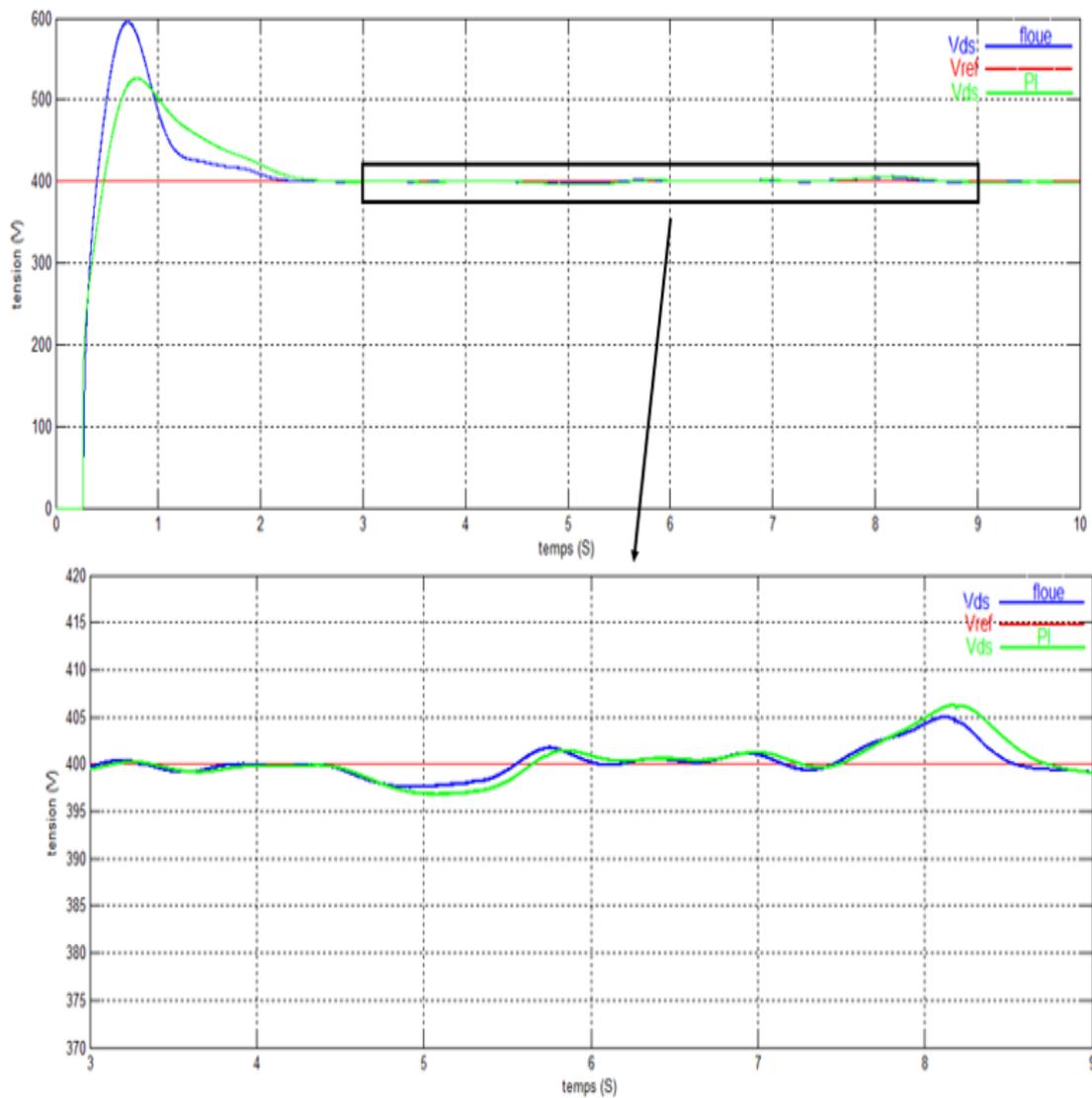


FIGURE 3.17 – Tension a la sortie du hacheur commandé par régulateur PI et Floue.

On observe dans la figure au-dessus que la tension régulée par la commande PI reste en moyenne égale à 400V et respecte le cahier des charges : les surtensions ne dépassent pas 407 V et les chutes de tension restent toujours supérieures à 397 V. Le profil de vitesse du vent est à l'origine des fluctuations de la tension. En effet, lorsque la vitesse du vent varie, la commande du hacheur suit le changement du point de fonctionnement afin de stabiliser la tension.

Après l'intégration d'un régulateur flou Mamdani à sept classes on observe un temps de réponse un peu plus rapide que le régulateur PI, et une diminution des surtensions et chutes de tension, les surtensions ne dépassent pas 405V et les chutes de tension restent toujours supérieures à 398V.

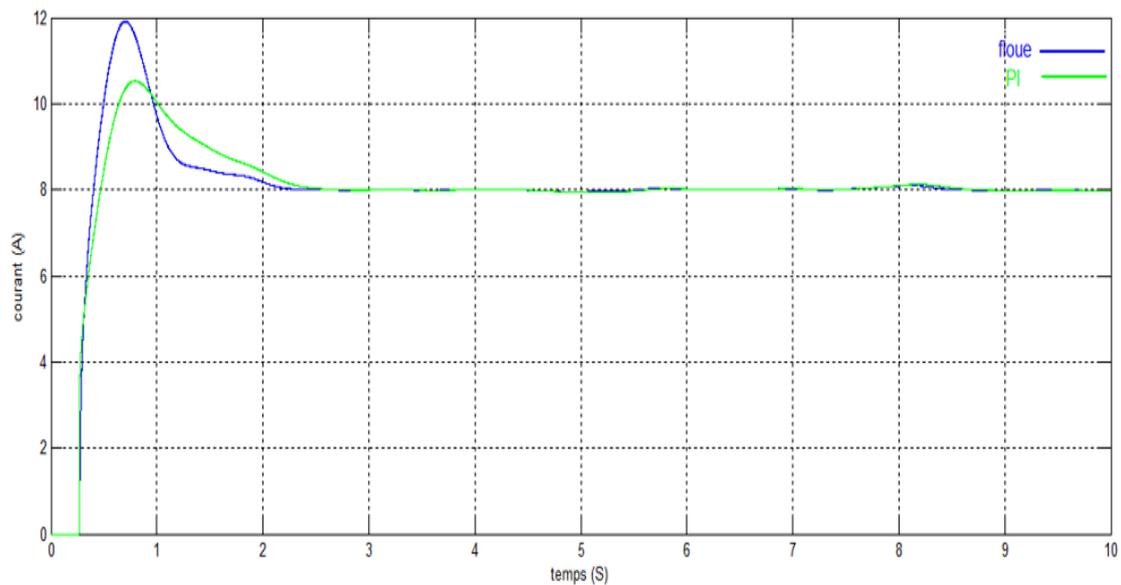


FIGURE 3.18 – Courant à la sortie du hacheur.

On observe que le courant de sortie est l'image de la tension quel que soit le régulateur utilisé, avec une valeur de 8A en régime permanent.

3.2.3 Essai à charge variable

Dans cet essai de 0 à 5 sec on a appliqué une charge de 50 ohm, ultérieurement à 5 sec on a augmenté la charge a 75 ohm.

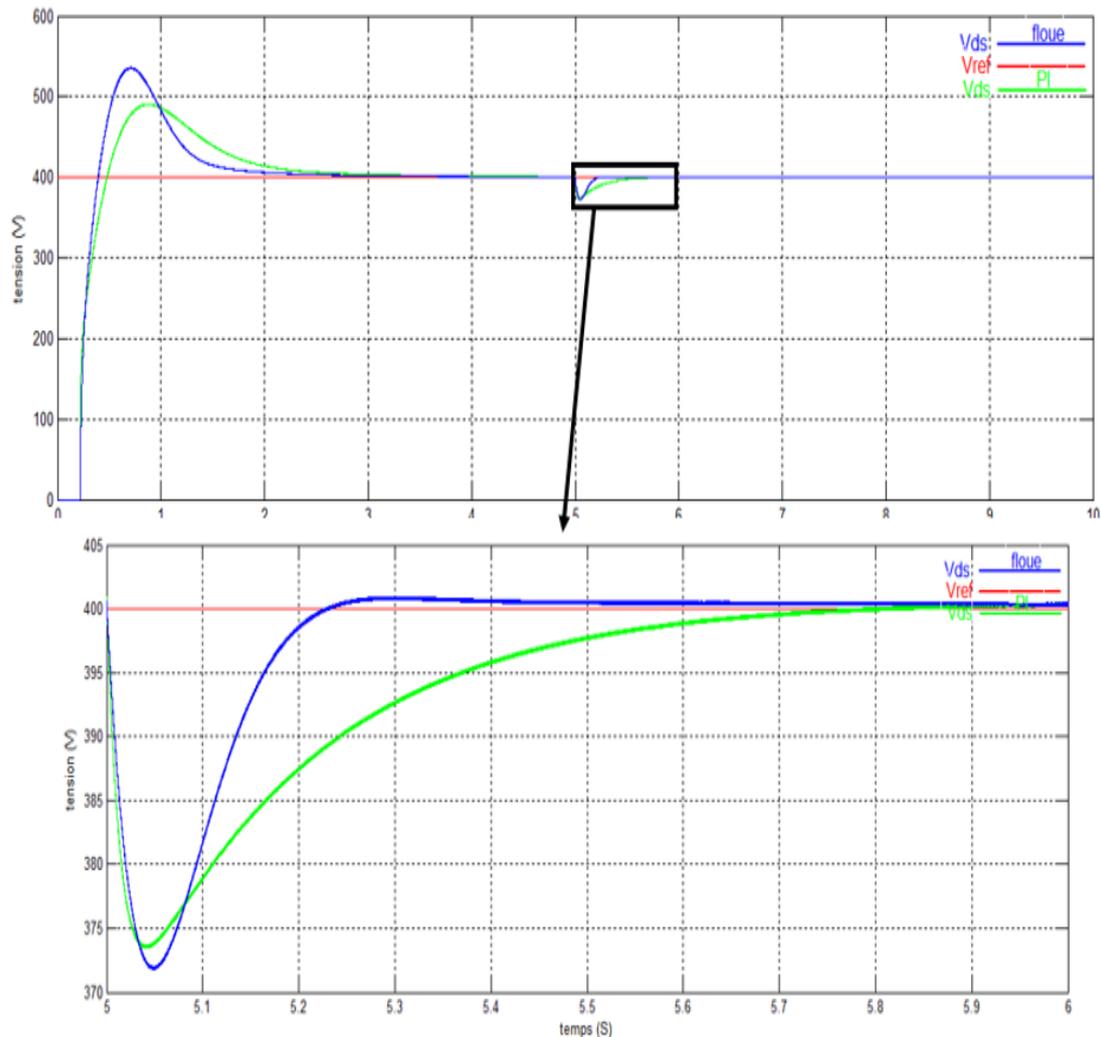


FIGURE 3.19 – Tension a la sortie du hacheur commandé par régulateur PI/Floue.

La figure ci-dessus illustre l'influence de l'augmentation de la charge soudaine sur le système.

On remarque une chute de tension de 16V pour le régulateur PI et 18 V pour le régulateur floue, néanmoins le temps de correction de cette chute ou le temps de réponse qu'a pris le régulateur PI est 3 fois plus lent que le régulateur flou ($0,25 \ll 0,7$ sec).

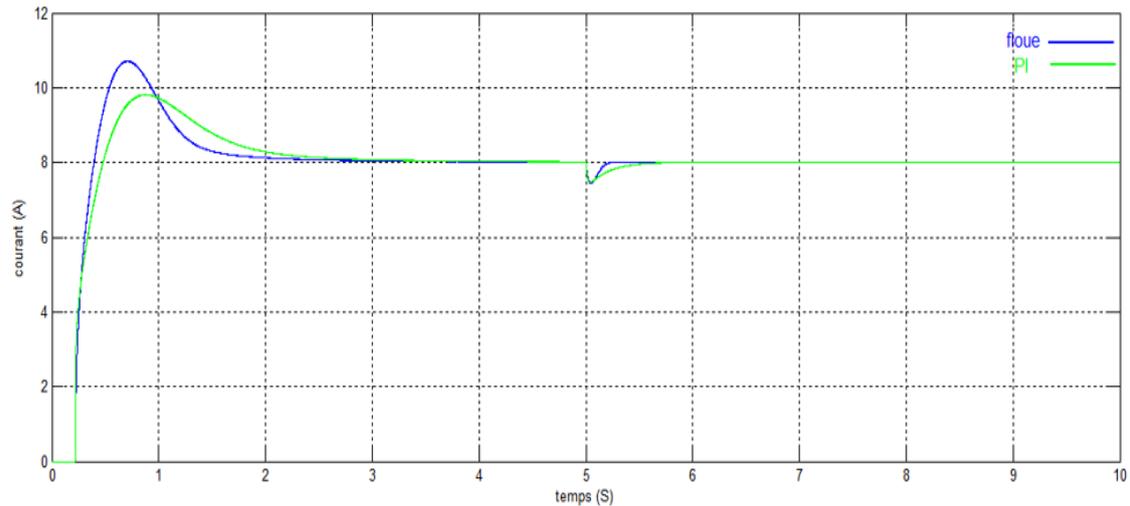


FIGURE 3.20 – Courant a la sortie du hacheur.

On constate que l'allure des courants de sortie est l'image des tensions pour les deux régulateurs utilisés, on observe que la chute de tension engendre une chute de courant

3.3 Simulation et résultats de la chaîne de conversion photovoltaïque

Pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement et de la température.

Pour tester le système de conversion photovoltaïque, nous avons fait deux tests : Le premier où nous avons utilisé un profil d'éclairement variable et une température constante égale à 25°C. Par la suite le deuxième teste, éclairement constant et température variable. Les caractéristiques électriques du module photovoltaïque sont dans l'annexe.

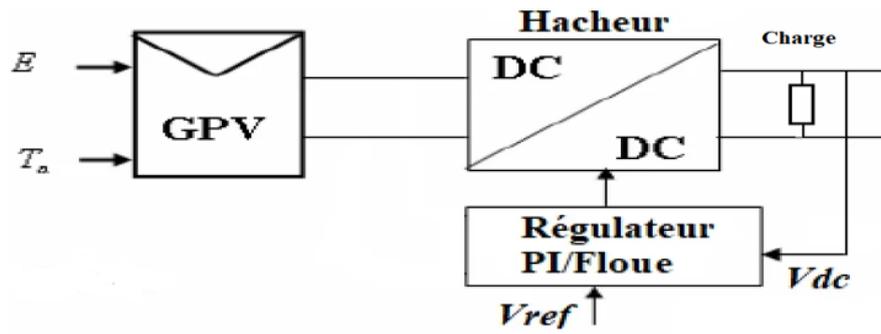


FIGURE 3.21 – Schéma synoptique du système PV.

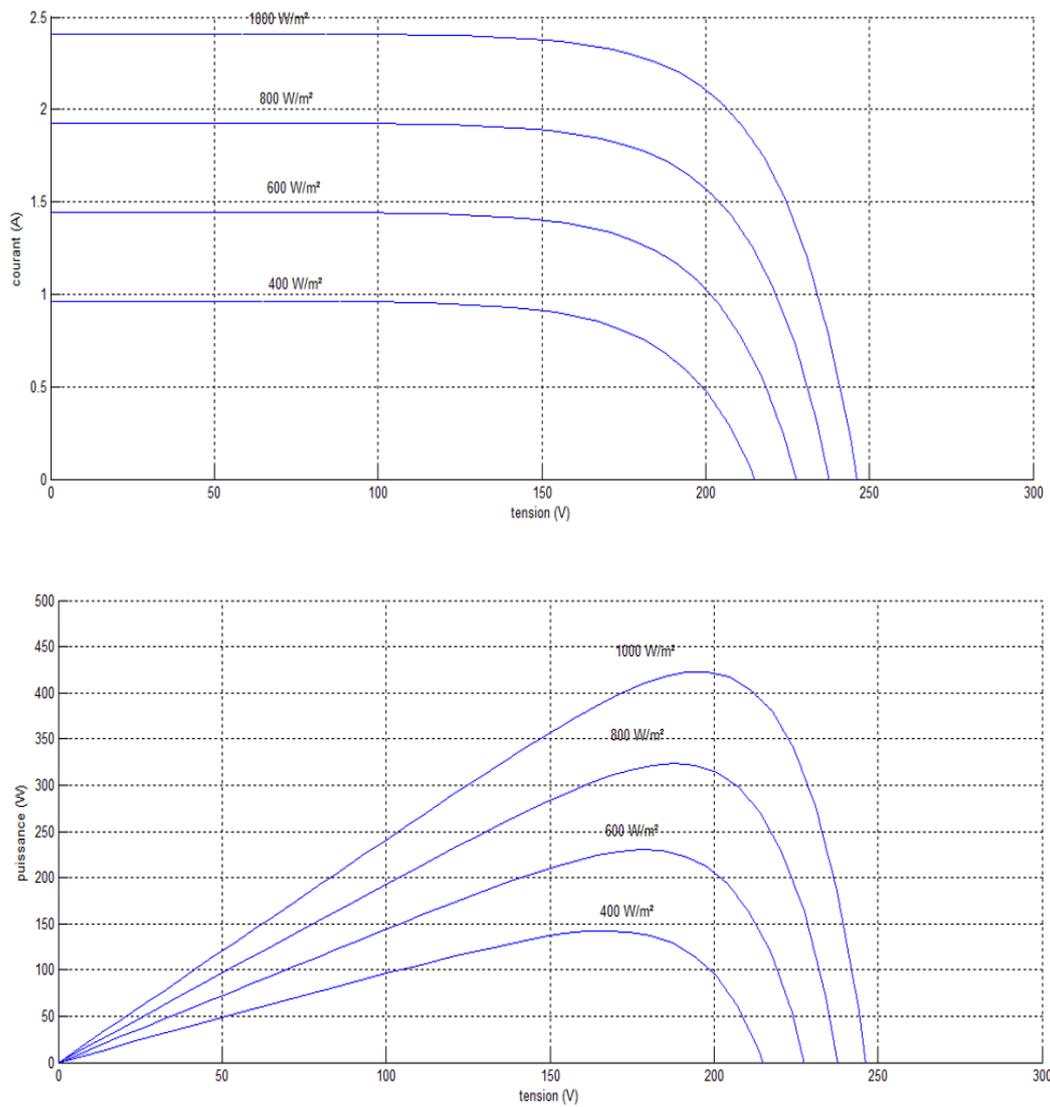


FIGURE 3.22 – La caractéristique I (V) du GPV (effet (a) éclairement (b) température).

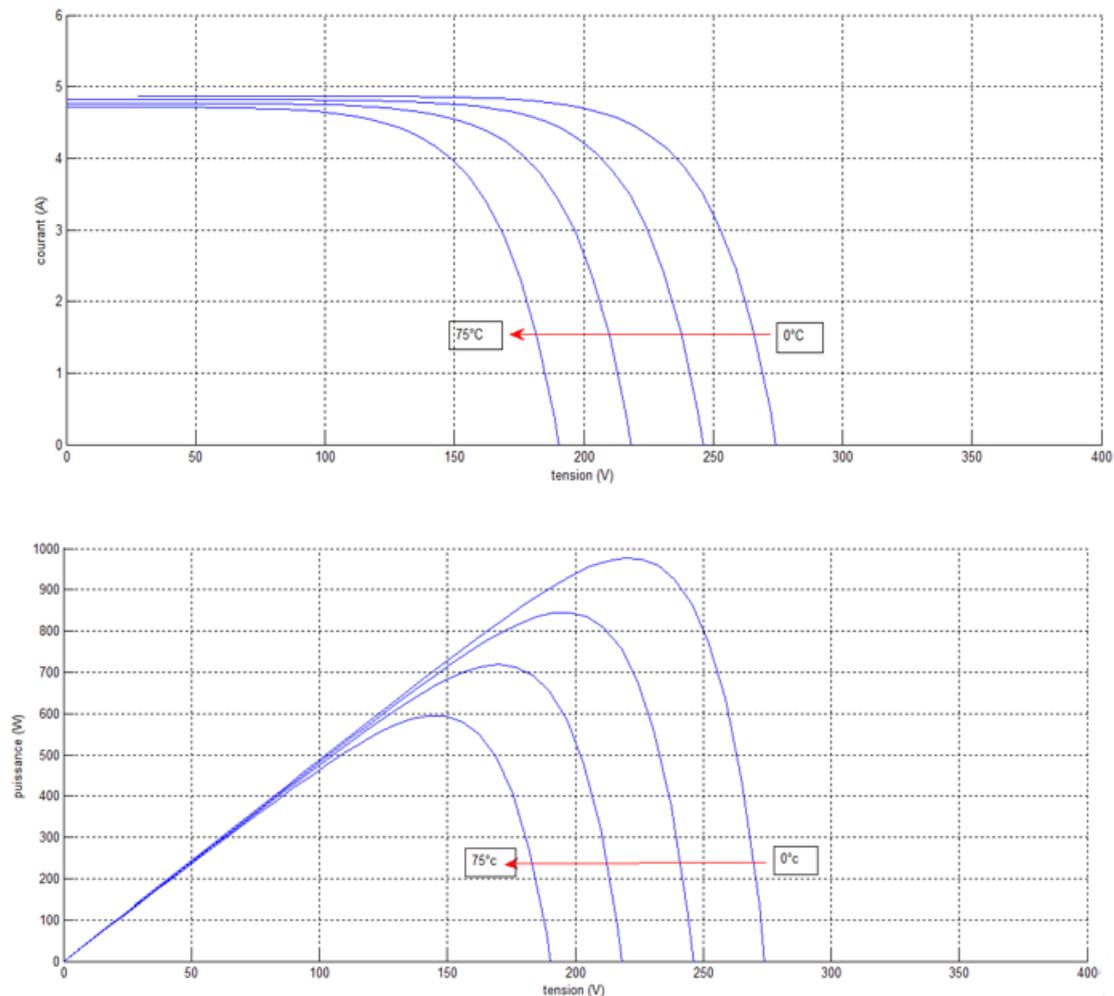


FIGURE 3.23 – La caractéristique $P(V)$ du GPV (effet (a)éclairement (b) température).

Avec l'augmentation de la température, le courant de court-circuit de la cellule augmente, alors que la tension en circuit ouvert diminue. L'effet de la température sur la puissance est évalué quantitativement en examinant les effets sur le courant et la tension séparément. Par exemple pour chaque °C d'augmentation de la température de fonctionnement au-dessus de la température de référence. Donc la température froide est en fait meilleure pour la cellule photovoltaïque, car elle génère plus de puissance.

Avec l'augmentation du flux lumineux (E), Le courant produit par la photopile (I_{ph}) s'accroît mais la tension (V) aux bornes de la jonction N-P varie légèrement.

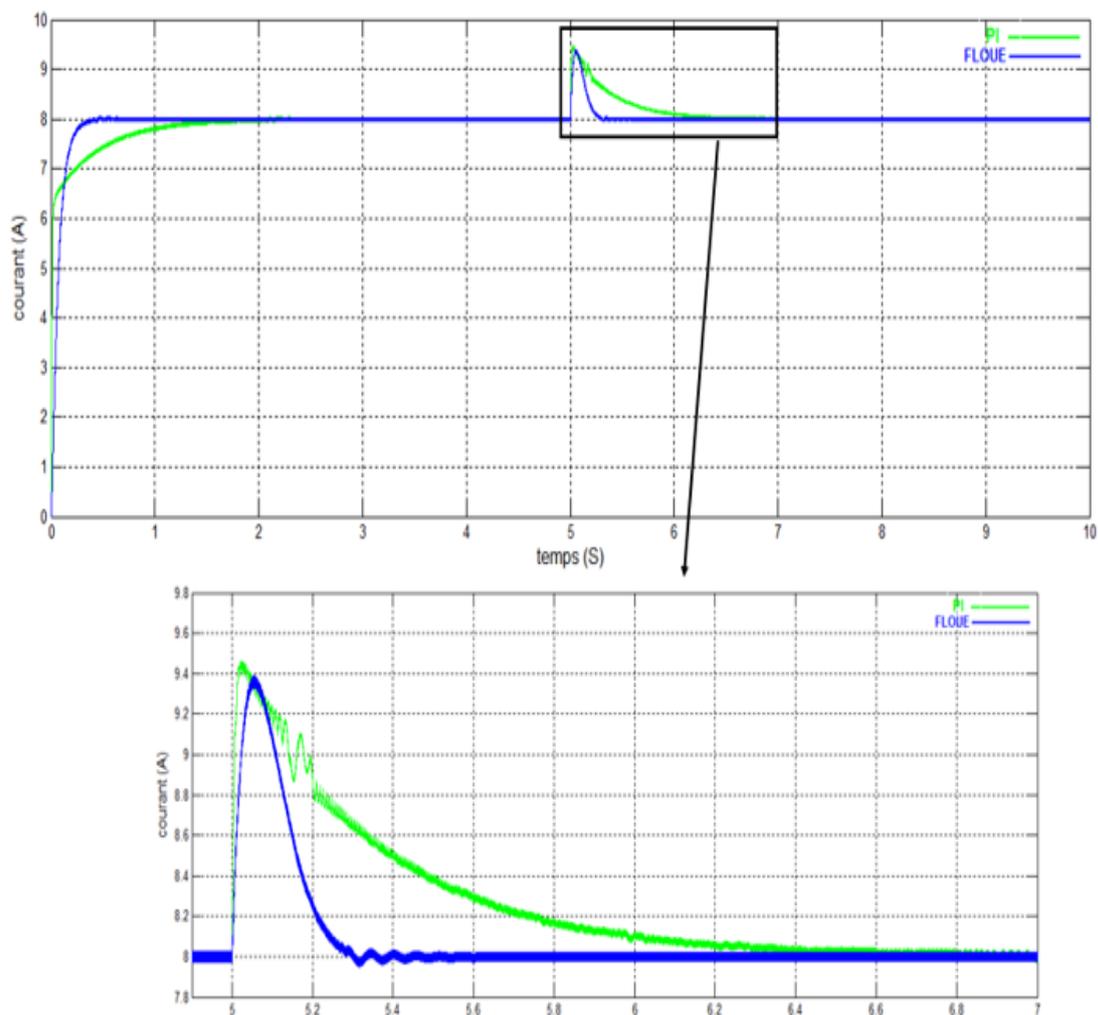
Donc :

- La puissance de la cellule (P_m) est proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent presque à la même tension.

3.3.1 Essai à éclairement variable

Dans cet essai nous avons utilisé une température constante de 25°C.

À partir du 0 à 5 sec on a exercé un éclairement de 600 w/m² puis on a augmenté la valeur à 800 w/m² pour le reste de la simulation.



La figure illustre l'influence de la variation de l'éclairement sur le courant.

On Remarque que le courant augmente avec un dépassement de 1.46 V pour le régulateur PI et de 1.4 V pour le régulateur Floue, Cependant nous notons un temps de réponse plus rapide pour le régulateur Floue (presque 3 fois plus rapide que la réponse PI).

3.3.2 Essai à Température variable

Pour cet essai on a appliqué un éclairage constant 800 w/m².

À partir du 0 à 5 sec on a effectué une température de 25 °C puis on l'a augmenté à 50°C de 5 à 10 sec.

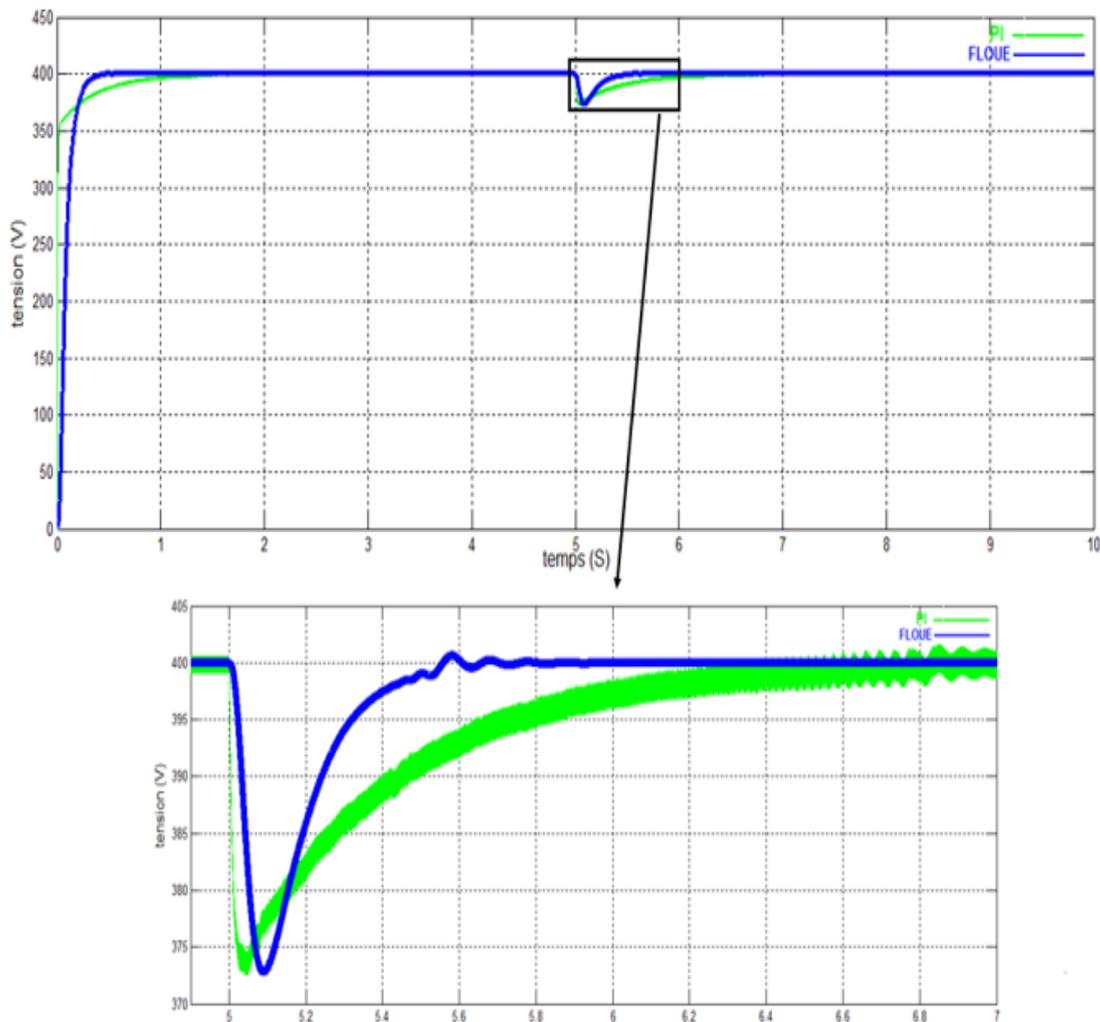


FIGURE 3.25 – Tension de la sortie.

La température varie selon la (**Figure 3.25**), on constate aussi la bonne régulation de la tension avec des chutes de tension de 27 V pour les deux régulateurs et un temps de réponse plus rapide pour le régulateur Floue.

3.4 Système de conversion d'énergie hybride

Le système hybride que l'on propose dans ce chapitre est constitué de deux sources d'énergies, photovoltaïque et éolienne. Cette étude porte sur la modélisation et la simulation du couplage des deux chaînes en parallèle.

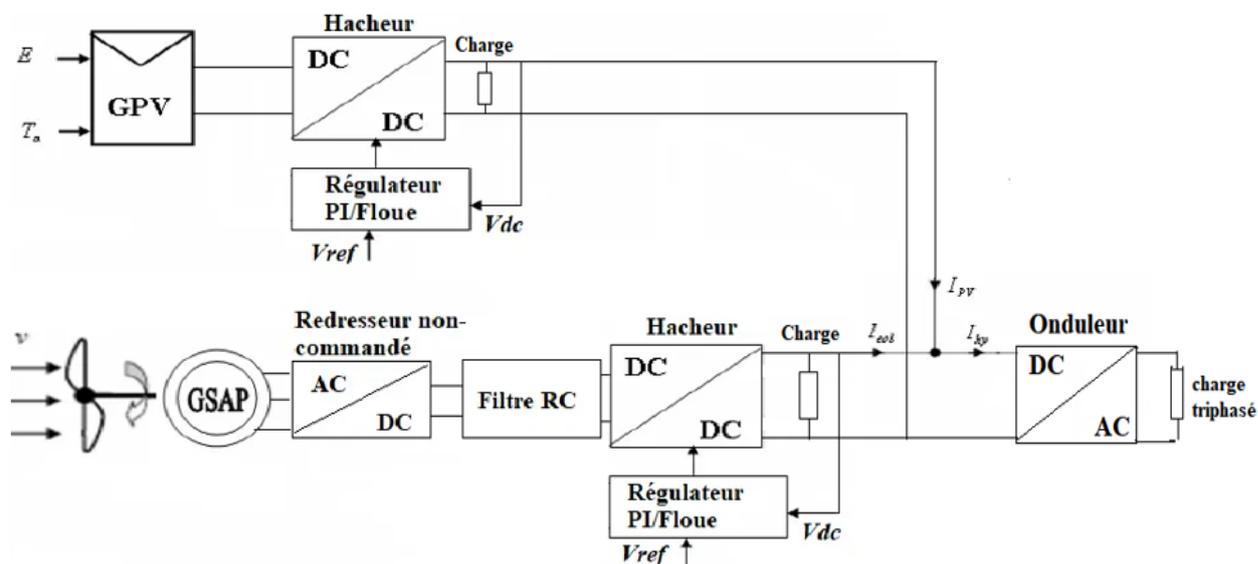


FIGURE 3.26 – Schéma de principe du système hybride.

3.4.1 Essai entré et charge constant

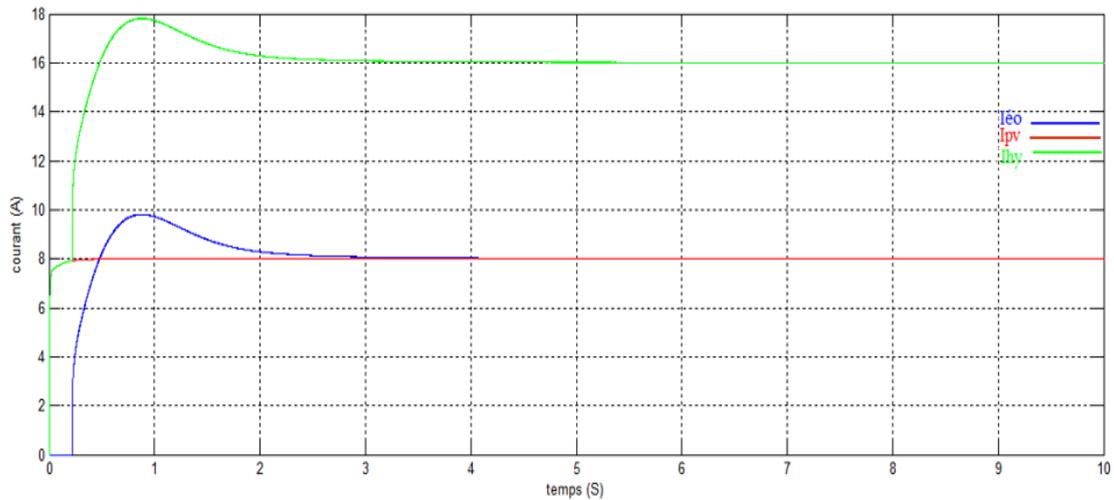


FIGURE 3.27 – Le courant du système hybride en fonction du temps.

Le courant du système hybride déterminé est égal à la somme des courants éolienne extraite de l'énergie du vent et le courant du générateur photovoltaïque extraite de l'énergie solaire.

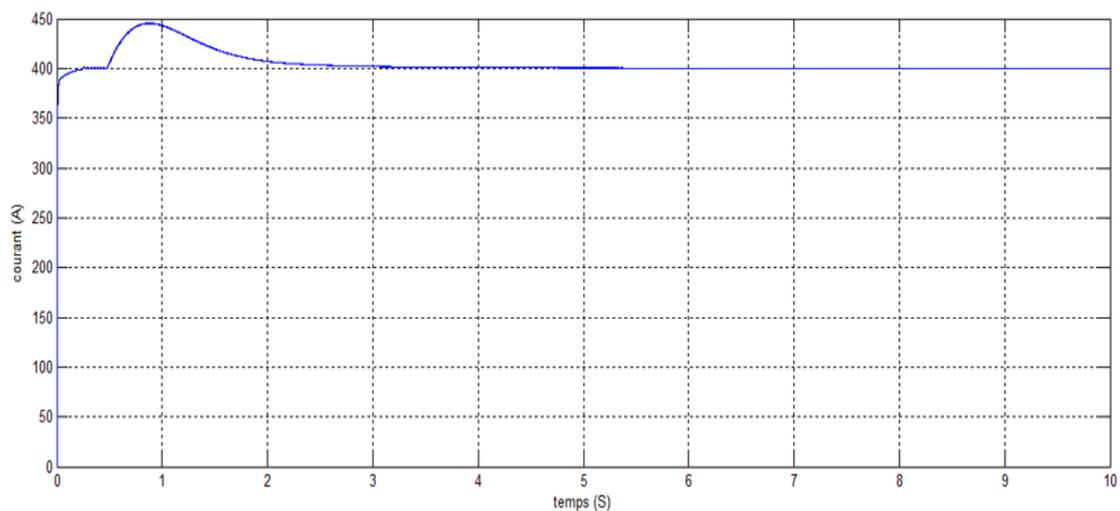


FIGURE 3.28 – La tension de système hybride.

La (Figure 3.28) montre les résultats de simulation de la tension du système hybride (éolien - photovoltaïque).

Nous observons que la tension reste à 400 V car les deux systèmes (éolien - photovoltaïque) étaient branchés en parallèle, On remarque qu'au début il y'a que le système photovoltaïque qui fonctionne, étant donné qu'à partir de 0.3 sec le système de conversion éolien déclenche, c'est de ce fait qu'on aperçoit un dépassement qui se corrige graduellement.

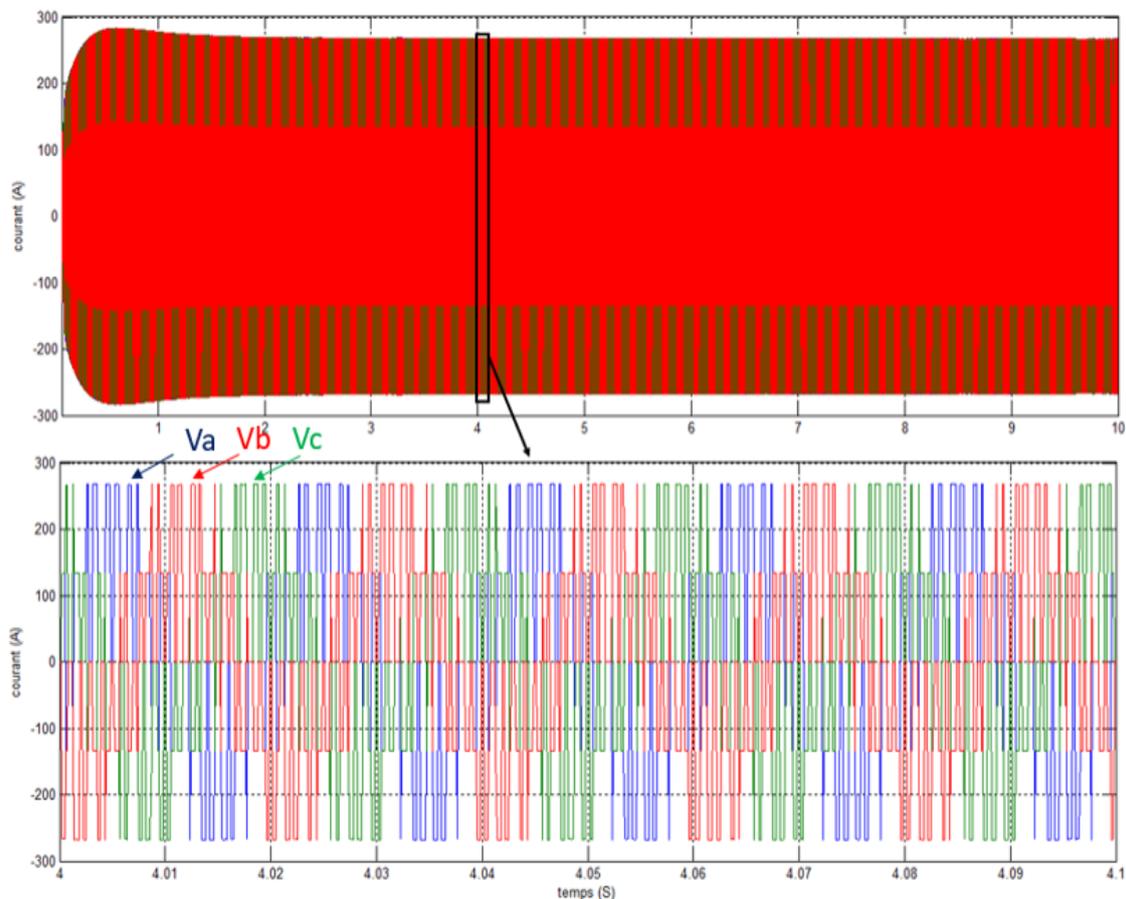


FIGURE 3.29 – Tension de l'onduleur.

La (Figure 3.29) montre le principe de la commande MLI et l'allure des tensions de l'onduleur. Pour une tension de référence égale à 400V, on note une valeur maximale de 267V qui est égale à une valeur efficace de 190V.

$$V_{eff} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} \quad (3.3)$$

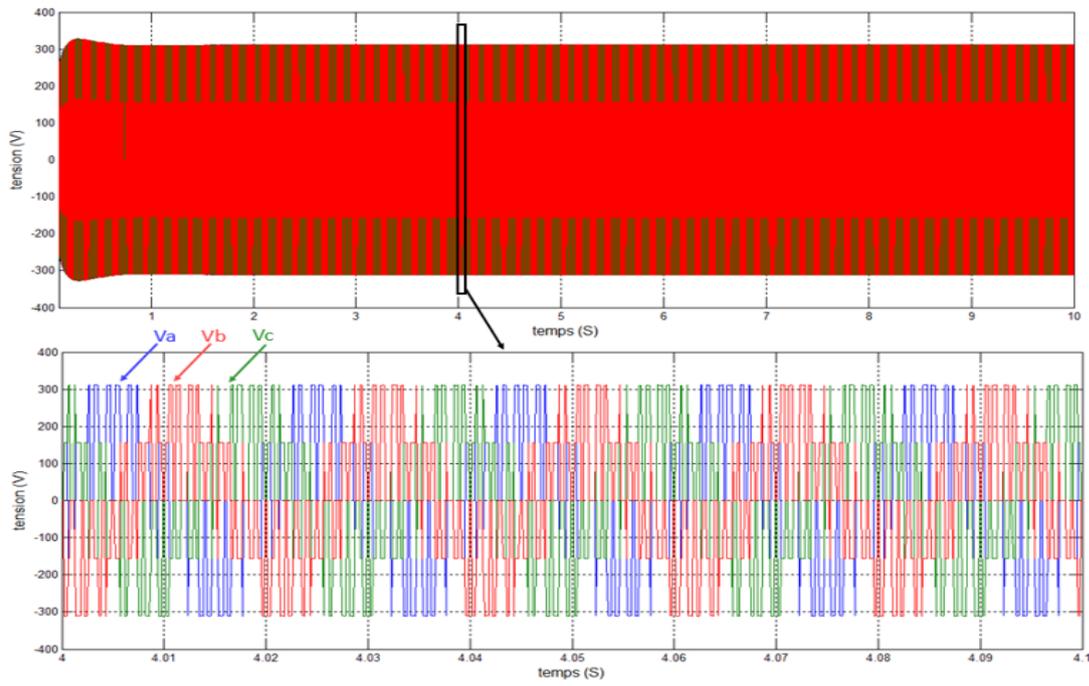


FIGURE 3.30 – Tension à la sortie de l'onduleur.

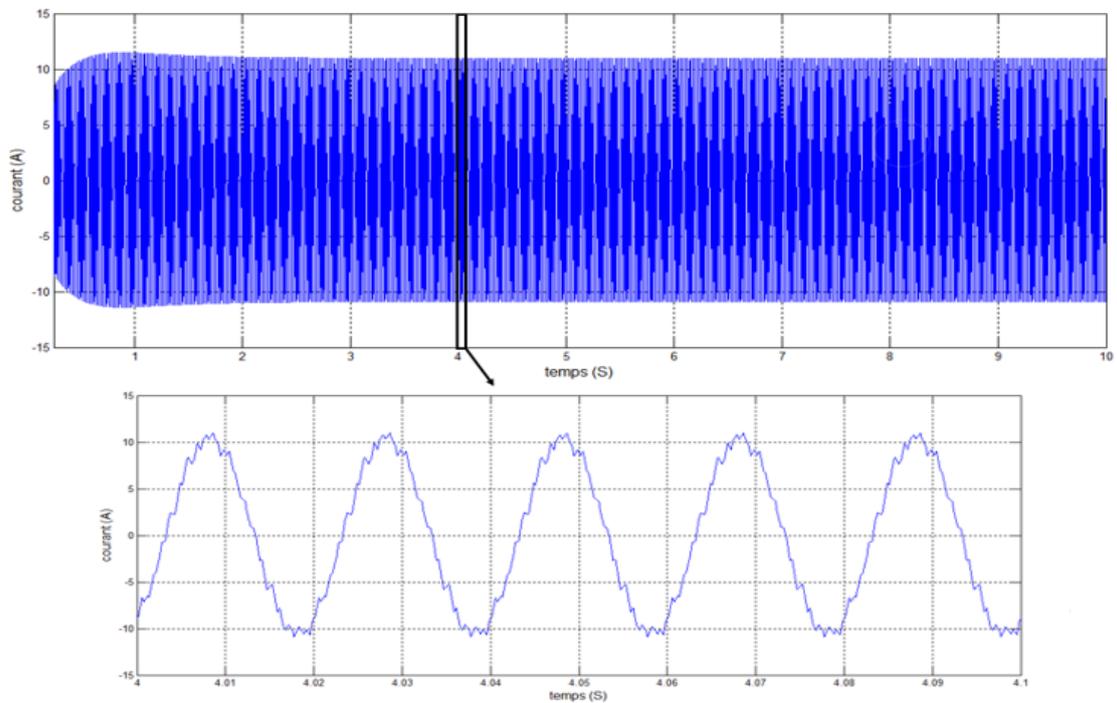


FIGURE 3.31 – Courant en sortie de l'onduleur d'une phase.

Nous voulons une tension de sortie égale à 220 V pour alimenter notre charge, c'est pour cela qu'on a utilisé une tension de référence de 466 V afin d'obtenir une valeur maximale égale à 311 V voir (**Figure 3.30**) qui nous donne une valeur efficace de 220 V, ainsi la (**Figure 3.31**) illustre l'allure d'une phase du courant pour cette référence, nous observons une valeur maximale de courant égale à 10.7 A ce qui signifie une valeur moyenne de 7.6 A.

3.4.2 Essai à entrées variables

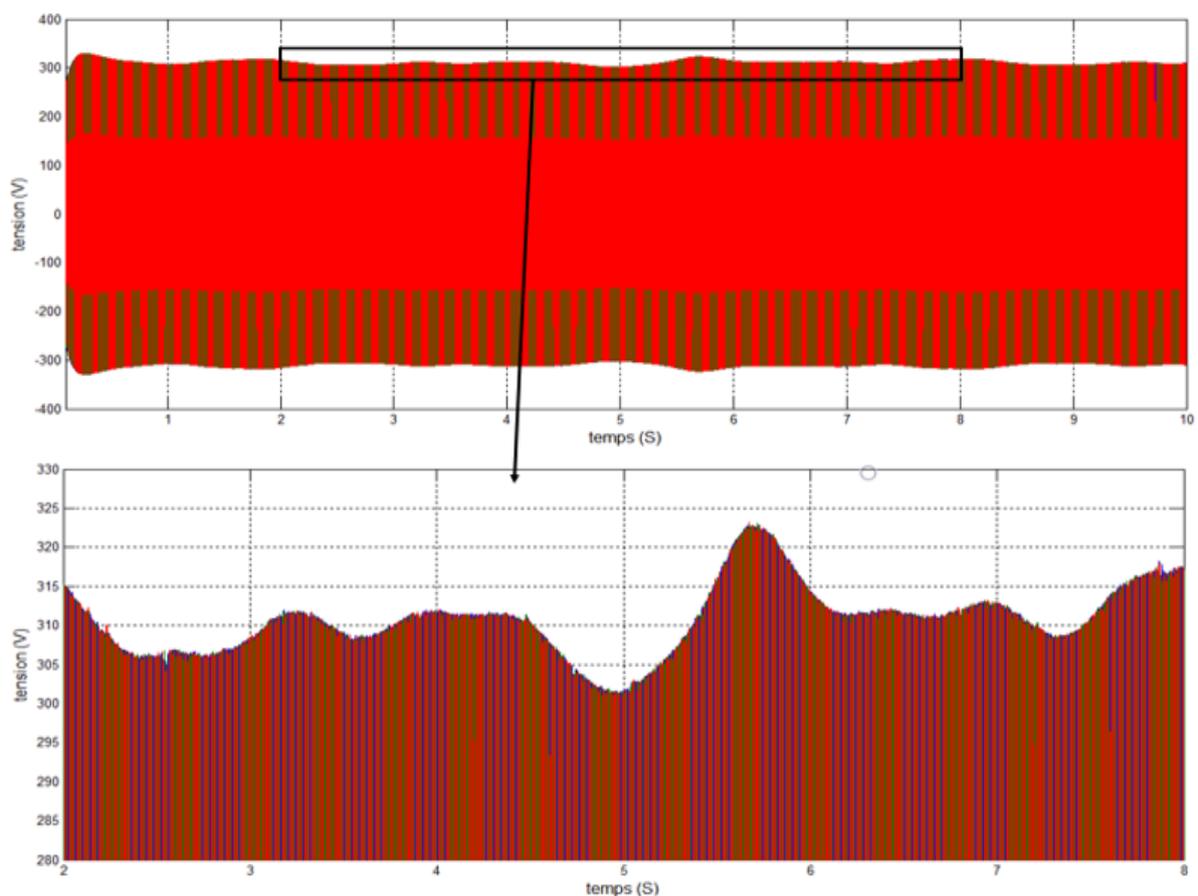


FIGURE 3.32 – Tension au bord de l'onduleur avec commande PI.

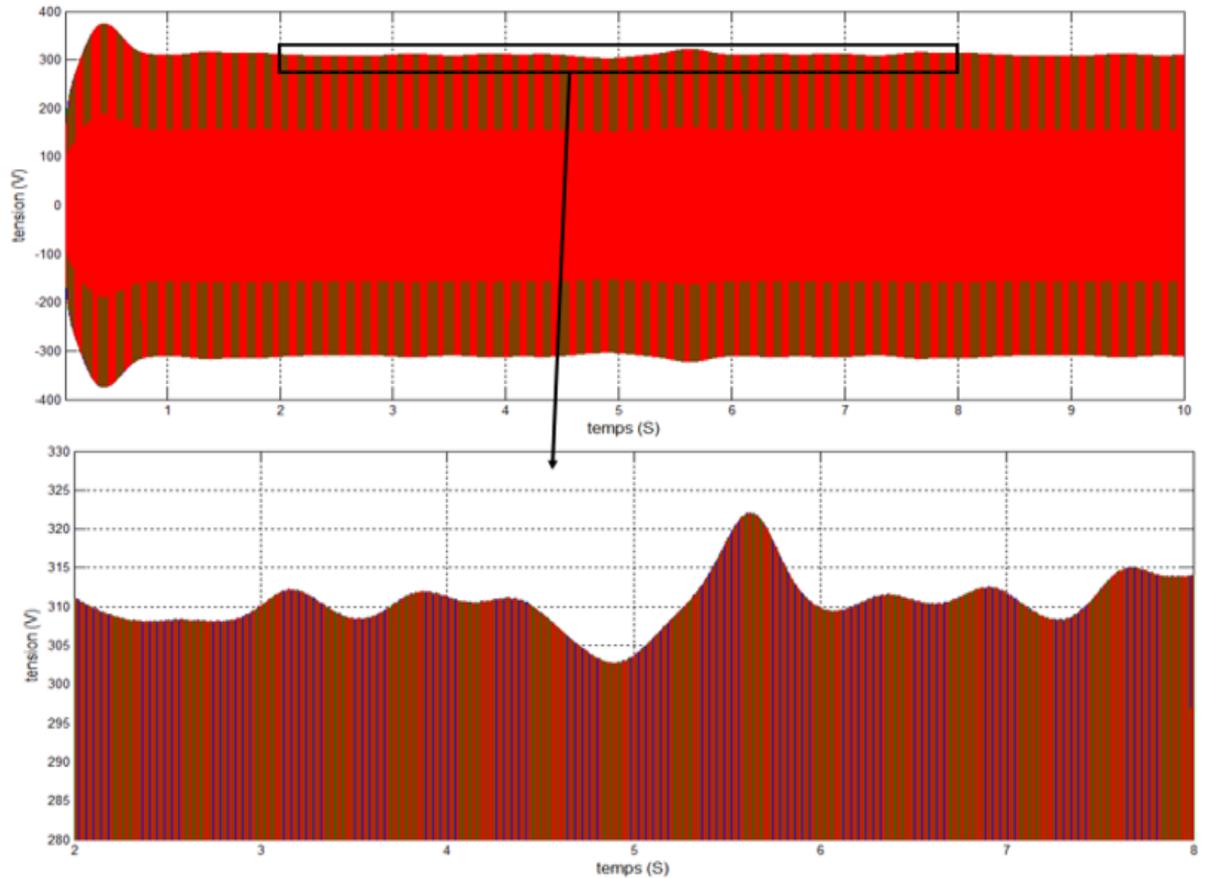


FIGURE 3.33 – Tension au bord de l'onduleur avec commande Floue.

La (**Figure 3.32**) représente la tension de sortie de l'onduleur en fonction du temps et illustre l'influence de la vitesse du profil du vent (entrée) sur la tension de sortie de l'onduleur avec l'utilisation du régulateur PI, on remarque une fluctuation de 5 jusqu'à 10V au cours de cet essai. La (**Figure 3.33**) montre les résultats ou tension de sortie avec commande Floue de sept classes pour le même test, nous obtenons une tension moins fluctuante et plus lisse qu'avec le correcteur PI mais pas dans la mesure où cela fait une grande différence.

3.4.3 Essai à charge variable

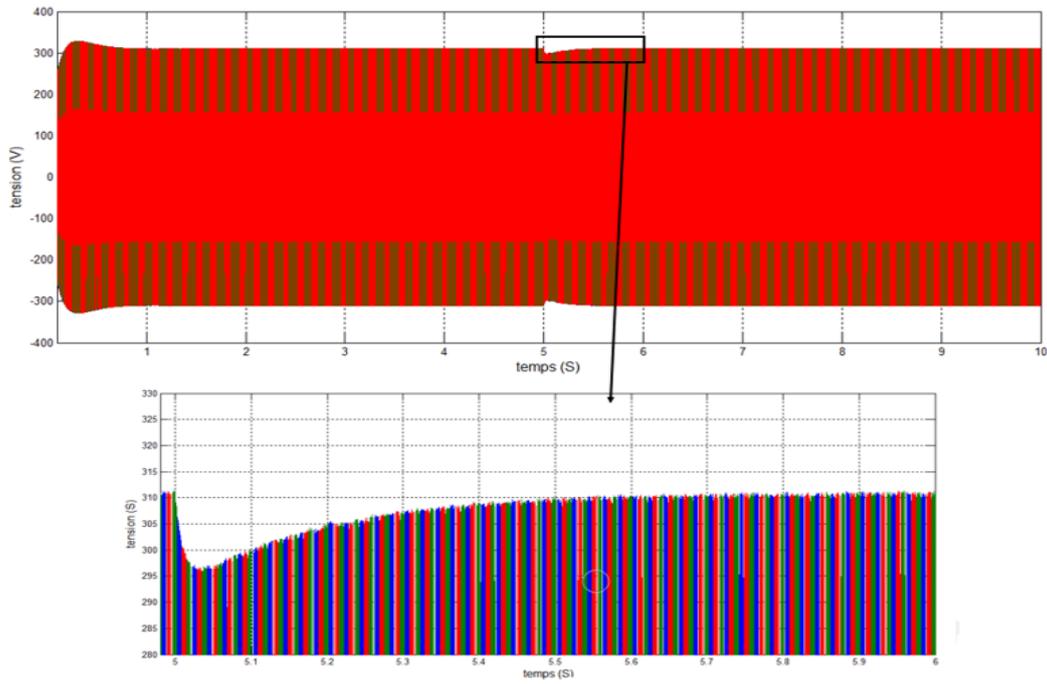


FIGURE 3.34 – Tension à la sortie de l'onduleur avec commande PI.

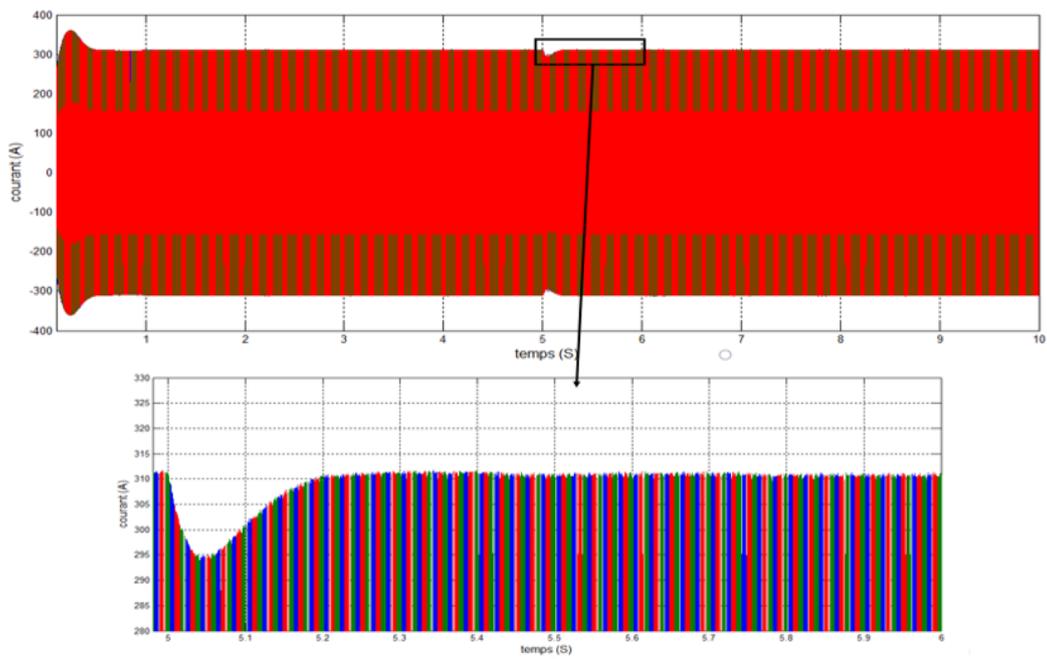


FIGURE 3.35 – Tension à la sortie de l'onduleur avec commande floue.

Dans cet essai on augmente la valeur de la charge de 50 à 75 ohm après 5 sec, on observe sur la (**Figure 3.34**) une chute de tension de 14 V au moment de changement de la charge, cette chute de tension est corrigé par le régulateur PI en 0.5 secondes environ. D'après la (**Figure 3.35**) qui montre le même essai mais avec l'utilisation d'un régulateur floue de sept classes, On remarque une chute de tension de 15.5 V mais le temps de correction de cette chute est beaucoup plus rapide d'environ 0.2 sec.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation du système éolien à axe horizontal et solaire photovoltaïque en plus de la simulation du système hybride éolien-solaire avec une commande basée sur un régulateur PI puis un régulateur logique Floue, les différentes simulations ont été réalisées sous l'environnement MATLAB SIMULINK. A partir des résultats de simulation acquis, on peut noter que le régulateur flou a pratiquement des performances meilleures que celles du régulateur PI.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude, la modélisation et la simulation du système hybride éolien-photovoltaïque et la commande intelligent par l'utilisation de deux différentes techniques de régulation : un régulateur PI et un régulateur logique floue.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les deux énergies renouvelables choisi dans cette thématique, le solaire photovoltaïque et le système éolien à axe horizontal et à la fin une description générale de quelques systèmes hybrides.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre la modélisation mathématique détaillée des différents éléments constituant une chaîne de conversion hybride solaire photovoltaïque et éolien à axe horizontal. Pour la commande intelligente, deux commandes ont été détaillées. La première est basée sur un régulateur PI et l'autre basée sur un régulateur logique flou.

Le troisième chapitre est dédié à la simulation des différents éléments de la chaîne de conversion hybride, on a effectué un choix d'une chaîne de conversion éolienne (turbine, génératrice synchrone à aimants permanents, redresseur, hacheur back-boost) et un modèle qui comporte un nombre bien défini de cellules photovoltaïques plus un hacheur back-boost , en utilisant deux stratégies de commande par un régulateur PI et une commande (régulateur) logique floue ce qui nous a permis de voir l'efficacité de chaque commande utilisée.

A travers les résultats obtenus, le contrôle par logique floue est clairement supérieur à la commande par régulateur PI car il offre une convergence beaucoup plus rapide malgré les dépassements qui se produisent éventuellement. Toutes les simulations ont été réalisées sous l'environnement MATLAB SIMULINK.

Notamment, le système étudié peut encore être amélioré avec plusieurs manières, par exemple en ajoutant plus de fonctions d'appartenance au contrôleur par logique floue ou même l'utilisation d'une autre stratégie de commande intelligente plus avancée tel que le régulateur par réseaux de neurones.

Comme perspective, nous espérons que notre travail de simulation et de dimensionnement soit complété par des testes expérimentaux et cela afin de connaître les performances réelles de notre système hybride et que la modélisation que nous avons effectuée soit enrichie.

Bibliographie

Bibliographie :

[1] : ARCEA/GASN. (2009). ENERGIE SOLAIRE [En ligne]. Disponible sur : [https://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/fiches ARCEA/GASN 37.pdf](https://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/fiches_ARCEA/GASN_37.pdf) , Consulté le 25/07/2021].

[2] : Markat, T., Castañer, L. (2006). Photovoltaics : fundamentals and applications. Preface Guide to Usage of the Handbook by Professional Group.

[3] : Petibon, S., (2009). Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.

[4] : Labouret, A., cumunel P et Braun, J-P. (2001). Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque . Dunod, Paris, France.

[5] : Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. Progress in energy and combustion science, 30(3), 231-295.

[6] : Desideri, U., Asdrubali, F. (Eds.). (2018). Handbook of energy efficiency in buildings : a life cycle approach. Butterworth-Heinemann.

[7] : Bourdoucen, H., Jervase, J. A., Al-Badi, A., Gastli, A., et Malik, A. (2000). Photovoltaic cells and systems : current state and future trends. Sultan Qaboos University Journal for Science [SQUJS], 5, 185-207.

[8] : Patel, M. R. (2005). Wind and solar power systems : design, analysis, and operation. CRC press.

[9] : Sahli, A. (2012). Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau. Thèse de magistère, Université de Sétif.

[10] : Reynaud, J. F. (2011). Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques .Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier.

[11] : Lasnier, F., Ang, T.G (1980). Photovoltaic Engineering Handbook. IOP Publishing Ltd. (1980), ISBN 0-85274-311-4.

[12] : Mambrini, T. (2014). Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Météorologie. Université Paris Sud - Paris XI. Français. ffNNT : 2014PA112380ff.

[13] : Dogaheh, Z. R., Puig, V. (2019). Tilt angle optimization of photovoltaic panels. In 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT) (pp. 1847-1852). IEEE.

[14] : Basher, M. (2018). The Impact of Solar Photovoltaic Cell Tilt Angle on Its Performance. 4. 44-50.

[15] : Ibrahim, H., Ilinca, A et Perron, L. (2008). Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés, Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre.

[16] : Bhikabhai, Y. (2005). Hybrid power systems and their potential in the Pacific islands. SOPAC Miscellaneous, Report, 406.

[17] : Sudradjat, A., Kantosa, E. (2015). Photovoltaic-Diesel Hybrid System How to Adapt to Real Site Conditions ?. KnE Energy, 1-4.

[18] : Sawle, Y., Gupta, S. C., et Kumar Bohre, A. (2016). PV-wind hybrid system : A review with case study. Cogent Engineering, 3(1), 1189305.

[19] : Zoheir, T. (2014). Contribution à l'Étude d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation sans Balais en vue de son Application dans le Domaine de l'Energie Eolienne. Thèse de Doctorat. Université De Batna.

[20] : BELAKEHAL, L. (2010). Conception et Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables. Thèse de doctorat, université de Constantine.

[21] : Pankow, Y. (2004). Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque. National School Superior of Art and Trades, Lille.

- [22] : Green, M.A. (1981). Solar cell fill factors : General graph and empirical expressions. *Solid-State Electronics*. vol. 24, pp. 788 - 789, 1981.
- [23] : Soltane, B. (2017). Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables. Thèse de doctorat, université de Constantine.
- [24] : Bressan, M. (2014). Estimation de production des installations PV pour différentes inclinaisons basée sur un modèle d'ensoleillement. *La Revue 3 E. I, Société de l'électricité, de l'électronique et des technologies de l'information et de la communication*, 3EI 2014-77, <https://www.see.asso.fr/en/node/11096>. fhal-01077761f.
- [25] : Laouar, B. (2017). Les systèmes hybrides solaires photovoltaïques conventionnels avec stockage [En ligne]. Disponible sur : <https://era.dz/era/wp-content/uploads/2017/10/SK-TM-Les-syst%a8mes-hybrides-solaire-photovolta%afque-conventionnel-avec-stockage.pdf> [Consulté le 28/08/2021].
- [26] : Shanghai StartCreation Group. (2012). Wind Solar Hybrid Power Generation Systems [En ligne]. Disponible sur : <http://www.shstarcreation.com/52/i-727.html> [Consulté le 28/08/2021].
- [27] : Pastor, M. (2006). Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. Thèse de doctorat. Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [28] : Electronics and you. (2021). Solar Photovoltaic Panel System [En ligne]. Disponible sur : <https://www.electronicandyou.com/solar-photovoltaic-panel-system.html> [Consulté le 25/08/2021].
- [29] : Iuteligne. (2014). Principe d'une cellule photovoltaïque [En ligne]. Disponible sur : <http://public.iutenligne.net/etudes-et-realizations/sivert/panneaux-photovoltaiques/2-principe-dune-cellule-photovoltaique.html> [Consulté le 10/08/2021].
- [30] : Poitiers, F. (2003). Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au Réseau. Thèse de Doctorat. Université de Nantes.
- [31] : Bekhada, H. (2018). Commande robuste d'un aérogénérateur à base de machine asynchrone à double alimentation pilotée par un convertisseur matriciel. Thèse de Doctorat. Université du Québec à Trois-Rivières.
- [32] : Billel, F. (2015). Etude d'un système Hybride (photovoltaïque-éolien). Mémoire de master. Université badji mokhtar annaba.

[33] : Latreche Mohammed, T. (2012). Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien. Mémoire de Magister. Université Ferhat Abbas de Sétif.

[34] : Yacine, H. (2013). Commande D'une Generatrice Pour Energie Eolienne. Mémoire de magister. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.

[35] : Ameziane, S. (2009). Implantation expérimentale de l'MPPT pour un système de génération hybride solaire-éolien. Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université de Batna, Algérie.

[36] : Mirecki, A. (2005). Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance. Thèse Doctorat. de l'institut national polytechnique de Toulouse.

[37] : Rapin, M., Jean-MARC, N. (2010-2014). L'énergie éolienne, du petit éolien a l'éolien offshore. 2^{eme} edition. Ouvrage publié avec le concours de l'ADEME Dunod.Paris.ISBN 978-2-10-059714-7.

[38] : SADAoui Elias, M., Mustapha, M. (2012). Gestion d'énergie dans un système hybride (Photovoltaïque - Eolien). Mémoire de Master. université a. mira de Béjaia.

[39] : Lamine, T., Youghourta, Y. (2018). Gestion de puissance d'un système hybride (Photovoltaïque-Eolien). Mémoire de Master. Université a. mira de Béjaia.

[40] : Youcef, B. (2014). Contribution à l'Etude et à la Commande Robuste d'un Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation. Thèse Doctorat. Université Mohamed Khider Biskra.

[41] : Houria, T., Narimane, T. (2017). Comparaison entre les techniques d'extraction de puissance MPPT appliquées à une éolienne hybride. Mémoire Master. Université Kasdi Merbah, Ouargla.

[42] : Meriem, B. (2018). Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double aimantation. Mémoire de master. Université badji mokhtar Annaba.

[43] : Soltane, B. (2010). Conception Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables. These de Doctorat. Universite De Constantine.

[44] : Messaoud, M. (2014). Etude comparative des architectures et Strategies de controle d'un aerogenerateur synchrone a aimants permanents. Thèse de Doctorat. Université De Batna.

[45] : Miloud, A., Lyes, A. (2013). Etude et maximisation d'un système éolien. Mémoire de master. Université Béjaia.

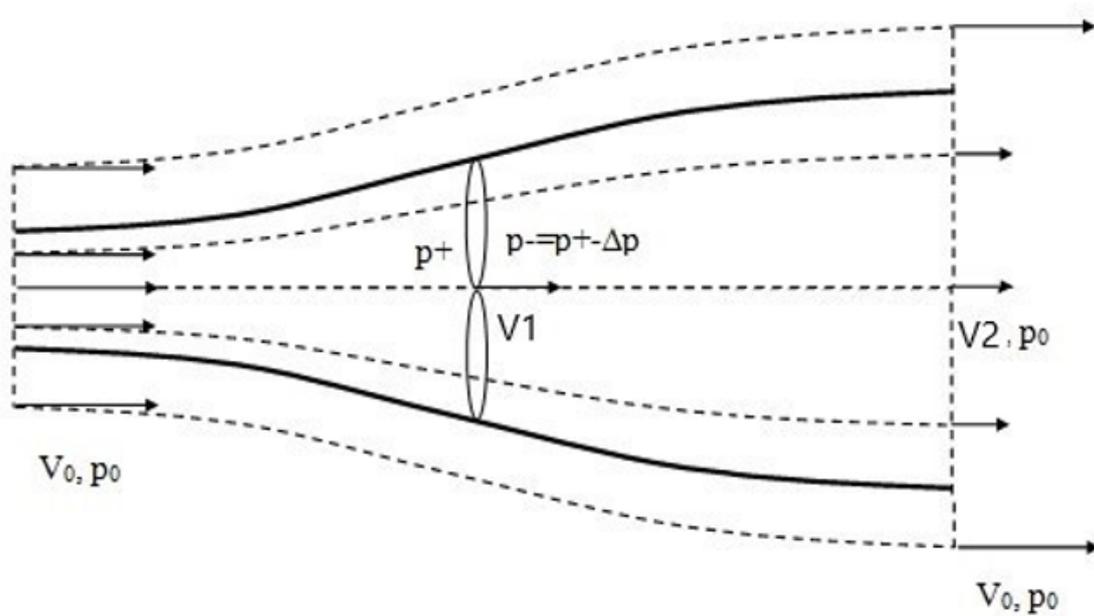
[46] : Noureddine, B. (2014). Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents. Mémoire de Magister en Electrotechnique. Université de Ferhat ABBAS Sétif.

[47] Ferrier, C. (2007). Changement climatique, institutions et marchés. Université de Genève.

[48] Pallemarts, M. (2004). Le cadre international et européen des politiques de lutte contre les changements climatiques. Courrier hebdomadaire du CRISP, (33), 5-61.

Annexe

.1 Formule de betz



V_0 , V et V_1 les vitesses, respectivement à l'amont, dans la turbine et à l'aval.
 p_0 , p_+ et p_- les pressions respectivement à l'amont, devant le rotor et derrière le rotor.

$$V_0 > V_1 > V_2$$

En appliquant la théorie de Froude (et les hypothèses associées), on obtient :

- Pour la puissance absorbée par le rotor : $P = m(V_0 - V_2)$, $m = \rho S V_1^2$

$\rho S V_1^2$ ($kg.m^{-3}$) masse volumique de l'air.

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \cdot \rho S V_1 (V_0^2 - V_2^2)$$

En remplaçant P et ΔE_c par leurs expressions trouvées précédemment, on obtient l'expression de la vitesse moyenne :

$V_1 = \frac{V_0 + V_2}{2}$ L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval $\frac{dP}{dV}$. Fournit une seule racine ayant un sens physique : $V_2 = V_0/3$ correspondant au maximum de puissance. On a :

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho S_1 V_0^3}$$

Cela conduit à la limite de Betz, qui fut le premier à développer une théorie globale Éolienne à axe horizontal.

$$C_{P_{MAX}} = \frac{16}{17} = 0.593$$

Qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne.

.2 Caractéristiques et paramètres des éléments considérés du système

Paramètres du module photovoltaïque	
Courant du court circuit	$I_{sc}=2.47A$
Tension du circuit ouvert	$V_{oc}=22.4 A$
Courant du point de puissance maximale	$I_m= 2.2A$
Tension du point de puissance maximale	$V_m=17.45$
La résistance série / cellule	$R_s=0.7\Omega$
Le nombre de cellules solaires en série	$N_s=22$
Le nombre de cellules solaires en parallèle	$N_p=4$
La puissance crête à crête	$38W$

Paramètres de l'éolienne – Turbine Savonius	
Rayon de la voilure	$R=1.5m$
Hauteur de la voilure	$H=2m$
Surface active	$S=2m^2$
Vitesse réduite optimale	$l=0.7$
Inertie de la voilure	$16kg.m^2$
Coefficient de puissance optimal	$Cp=0.35$
Masse volumique de l'air	$1.2 kg.m^{-3}$
Angle de calage	3°

Paramètres de la GSAP	
Tension nominale	$Vn=220V$
Puissance nominale	$Pn=1KW$
Courant nominale	$In=4.9A$
Nombre de paires de pôles	$2p=4$
Résistance des enroulements	$Rrs=1.36 \Omega$
Inductance synchrone	$Ls=0.0125H$
Flux efficace	$\Phi_{eff}=0.15Wb$

Parameters du bus continue	
La tension	$400V$
Capacité	$500 mF$

Parameters de la charge	
Résistance de la charge	50 Ω , 75 Ω

Paramètre de l'onduleur de tension	
Fréquence de commutation	$f_c=10KHZ$
Fréquence de référence	$f=50HZ$
Rapport de modulation	$m=0.7$

.3 Logique floue

$\Delta e/e$	NB	NM	NS	EZ	PS	PM	PB
NB	NB	NM	NM	NS	EZ	EZ	EZ
NM	NB	NM	NM	NS	EZ	EZ	EZ
NS	NB	NS	NS	EZ	EZ	EZ	PS
EZ	NM	NS	NS	EZ	PS	PS	PM
PS	NP	EZ	EZ	EZ	PS	PS	PB
PM	EZ	EZ	EZ	PP	PM	PM	PB
PB	EZ	EZ	EZ	PP	PM	PM	PB

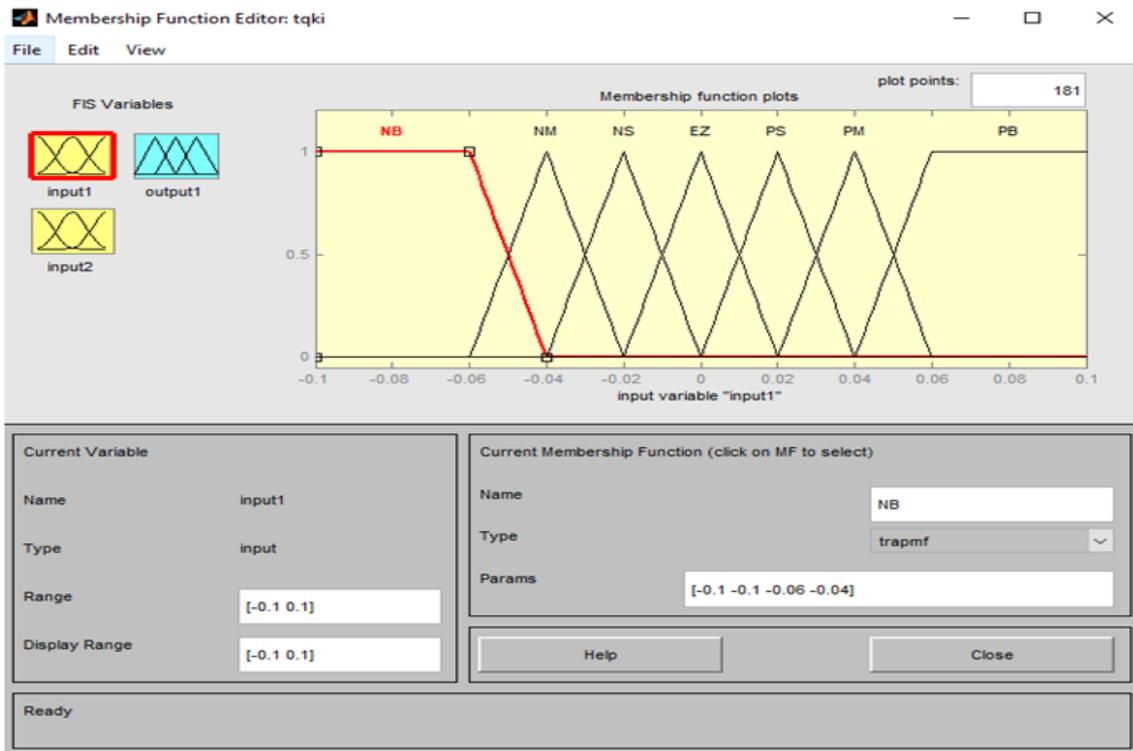


Figure C.1 : Bloc floue utilisé dans la simulation

.4 Schémas sous MATLAB

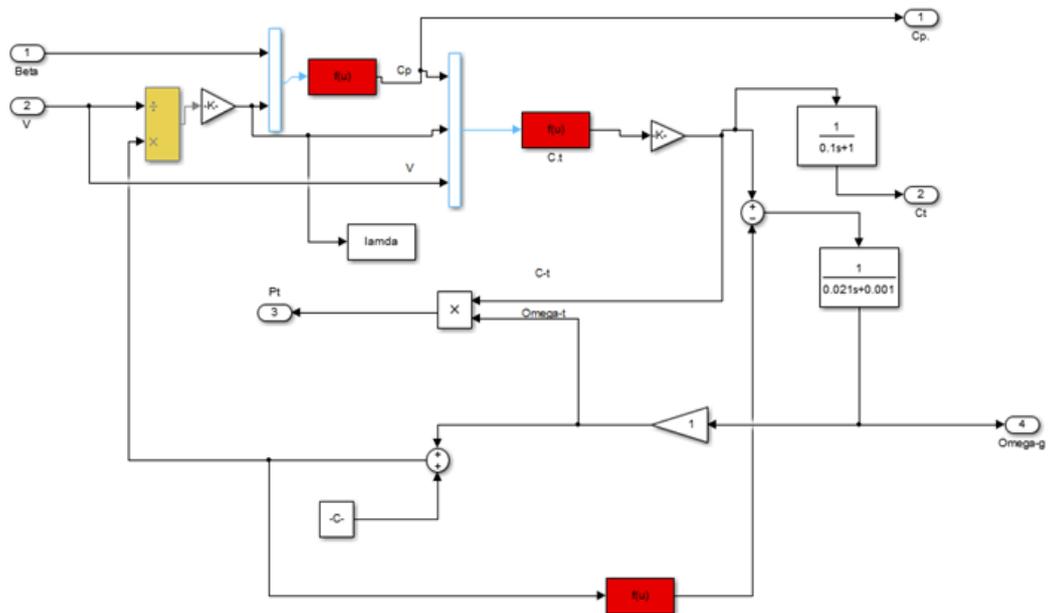


Figure D.1 : simulation de la turbine sous MATLAB.

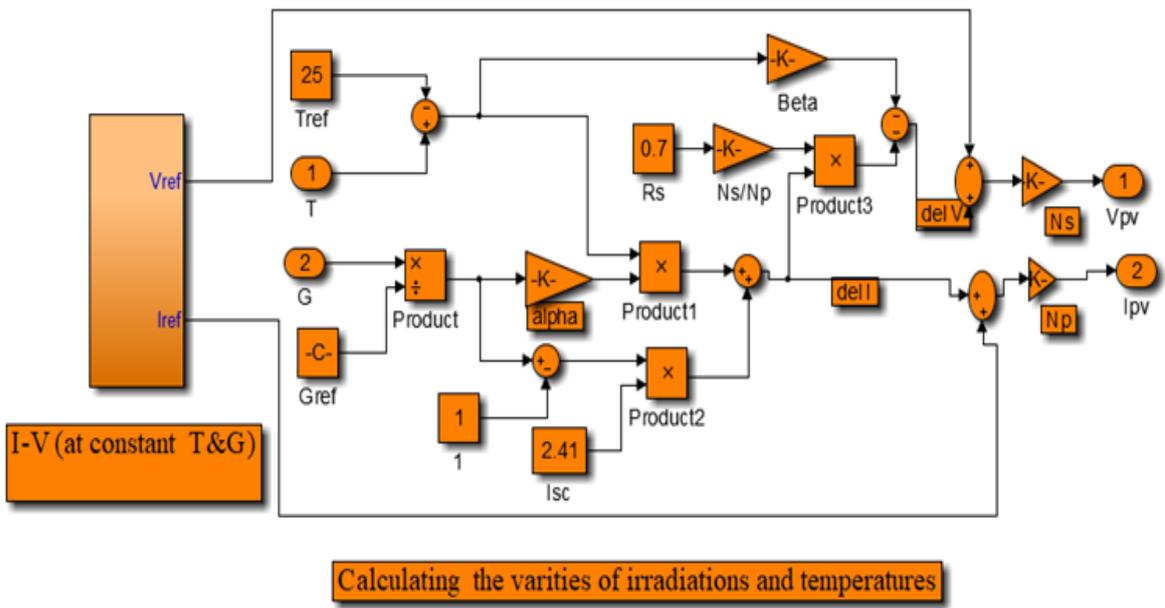


Figure D.2 : simulation du panneau solaire.

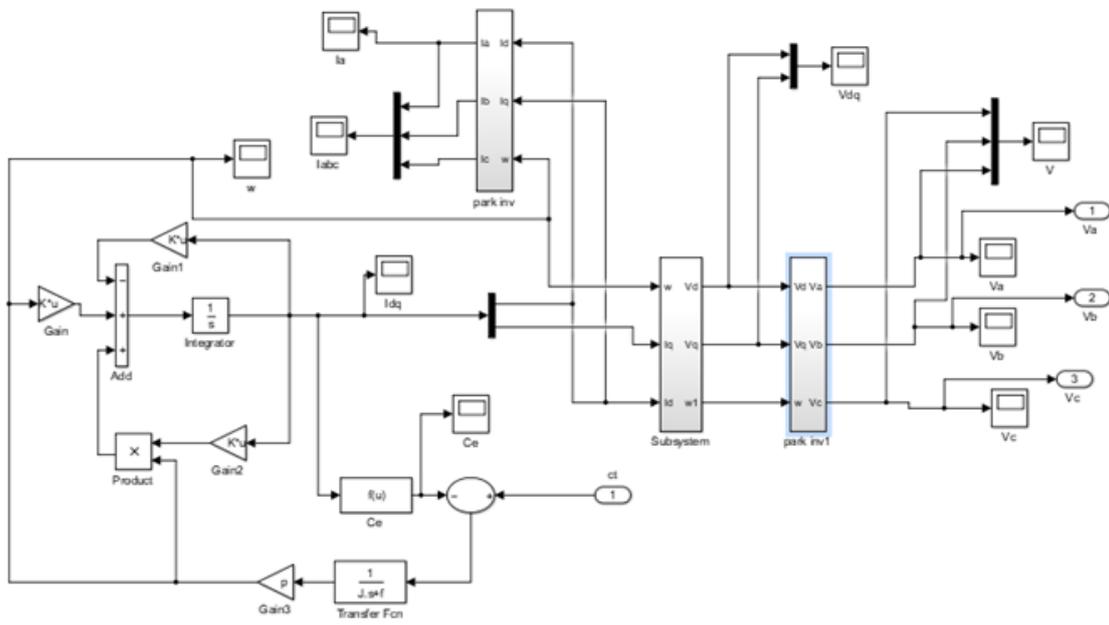


Figure D.3 : MSAP sous MATLAB

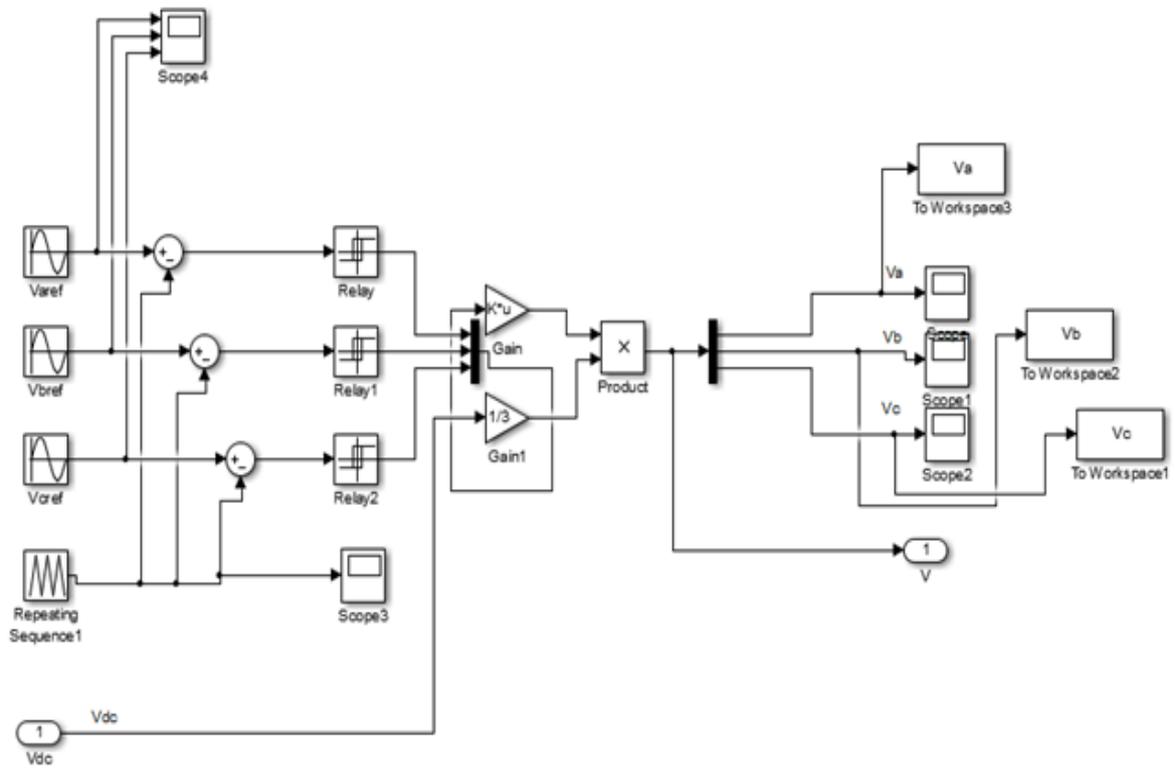


Figure D.4 : modèle de l'onduleur sous MATLAB.

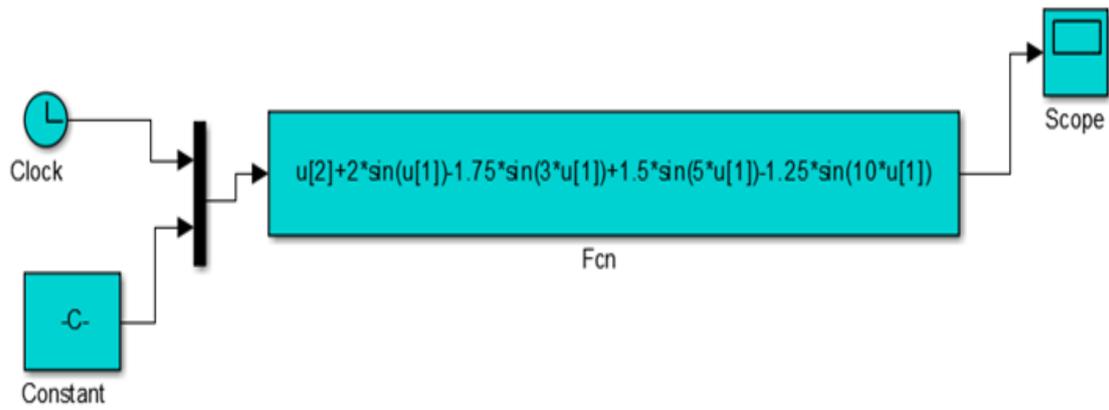


Figure D.5 : modèle du vent utilisé sous MATLAB.

Résumé

Ce mémoire a pour objectif l'étude et simulation d'un système d'énergie hybride à deux sources d'énergies renouvelables (solaire et éolienne) commandé par deux techniques de régulation : un régulateur conventionnel PI et la commande intelligente par logique floue, en plus d'une étude comparative entre ces deux commandes. Nous avons exposé et analysé les divers performances de ce système hybride ; vitesse de réponse, robustesse et stabilité, en s'appuyant sur plusieurs essais expérimentaux pour chaque commande (PI et logique floue). Ce travail est exécuté par le biais de MATLAB Simulink.

- Les Mots Clés : Energies renouvelables, énergie solaire, énergie éolienne, panneaux photovoltaïques, éolienne a axe horizontale, hybride, régulateur PI, commande par logique floue.

ملخص

■ تهدف هذه الرسالة إلى دراسة ومحاكاة نظام طاقة هجين بمصدرين للطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) يتم التحكم فيهما بتقنيتين تنظيميتين : منظم PI تقليدي والتحكم الذكي بالمنطق الضبابي ، بالإضافة إلى دراسة مقارنة بينهما. لقد كشفنا وحللنا الأداء المختلف لهذا النظام الهجين ؛ سرعة الاستجابة والمتانة والثبات بناءً على عدة اختبارات تجريبية لكل من (PI والمنطق الضبابي). يتم تنفيذ هذا العمل من خلال *MATLAB Simulink* .

- كلمات مفتاحية : الطاقات المتجددة ، الطاقة الشمسية ، طاقة الرياح ، الألواح الكهروضوئية ، توربينات الرياح ذات المحور الأفقي ، الهجين،منظم PI ، التحكم المنطقي الضبابي . .

Abstract

This thesis aims to study and simulate a hybrid energy system with two renewable energy sources (solar and wind) controlled by two regulation techniques : a conventional PI regulator and intelligent control by fuzzy logic, in addition to a comparative study between these two orders. We have exposed and analyzed the various performances of this hybrid system ; speed of response, robustness and stability, based on several experimental tests for each command (PI and fuzzy logic). This work is performed through MATLAB Simulink.

- keywords : Renewable energies, solar energy, wind energy, photovoltaic panels, horizontal axis wind turbine, hybrid, PI regulator, fuzzy logic control. . . .