



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Centre Universitaire El-wancharissi de Tissemsilt



Institut de Sciences et de la Technologie
Département de Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en

Filière : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Installations Énergétiques et turbomachine**

Présentée par : **BICHA HAMZA**

GADOUM FETHI

Thème

Réseaux de Neurones Artificiels Pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'une éolienne à Vitesse Variable

Soutenu le,

Devant le Jury :

| | | | |
|----------------|--------------|--------|---------------|
| TRARI Tayeb | Président | M.A.A | CU-Tissemsilt |
| MEHARRAR Aoued | Encadreur | M.C.B. | CU-Tissemsilt |
| FERNINI Brahim | Examinatrice | M.C.A. | CU-Tissemsilt |

Année universitaire : 2019-2020

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 1 : Généralités sur les énergies renouvelables | |
| 1 Introduction..... | 3 |
| 2 Contexte énergétique mondial..... | 3 |
| 3 Les énergies renouvelables, ressources et exploitation..... | 4 |
| 3.1 L'énergie hydraulique..... | 4 |
| 3.2 L'énergie solaire | 5 |
| 3.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque | 5 |
| 3.2.2 L'énergie solaire thermique | 7 |
| 3.2.2.1 Centrale solaire thermodynamique..... | 7 |
| 3.2.2.2 Les fluides caloporteurs..... | 7 |
| 3.3. Les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques..... | 8 |
| 3.3.1 Les centrales à capteurs paraboliques..... | 8 |
| 3.3.2 Les centrales solaires cylindro-paraboliques..... | 9 |
| 3.3.3 Centrale solaire à tour | 9 |
| 3.4 L'énergie géothermie..... | 10 |
| 3.5 L'énergie de la biomasse..... | 11 |
| 3.6 L'énergie éolienne..... | 12 |
| 3.6.1 Types des éoliennes..... | 12 |
| 3.6.2 Eolienne axe vertical..... | 12 |
| 3.6.3 Éolienne à axe horizontal..... | 13 |
| 4 Systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables..... | 15 |
| 5 Structure des systèmes hybrides..... | 15 |
| 6 Conclusion..... | 16 |

Chapitre 2 : Modélisation et Simulation D'une Turbine Éolienne

| | |
|--|----|
| 1 Introduction..... | 18 |
| 2 Principe de fonctionnement des éoliennes à axe horizontal | 18 |
| 3 Constitution d'une éolienne a axe horizontal..... | 18 |
| 4 Modèle du vent..... | 19 |
| 5 Modèle de la turbine..... | 20 |
| 6 Equation dynamique de l'arbre..... | 22 |
| 7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne..... | 22 |

| | |
|---|----|
| 7.1 Asynchrones à cage (MAS)..... | 22 |
| 7.2 Machines asynchrones à double alimentation (<i>MADA</i>)..... | 23 |
| 7.3 Génératrices synchrones..... | 24 |
| 8 Schéma de simulation..... | 25 |
| 9 Résultats de la simulation..... | 25 |
| 10 Conclusion..... | 28 |

Chapitre 3 :

Réseaux de Neurones Artificiels Pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'une Eolienne

| | |
|---|-----------|
| 1 Introduction..... | 30 |
| 2 Architectures et méthodes de recherche du point maximum de puissance..... | 30 |
| 3 Contrôleur MPPT par Réseaux de neurones..... | 31 |
| 3. 1 Réseaux de neurones : définitions et propriétés..... | 31 |
| 3. 2 Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels..... | 31 |
| 3. 3 Modèle d'un Neurone..... | 31 |
| 3. 3. 1 Fonctions d'activations..... | 32 |
| 3. 4 Architecture des réseaux de neurones..... | 33 |
| 3. 4. 1 Les réseaux de neurones non bouclés..... | 33 |
| 3. 4. 2 Les réseaux de neurones bouclés..... | 34 |
| 3. 5 Apprentissage des réseaux de neurones..... | 35 |
| 3. 6 Type d'apprentissage..... | 35 |
| 3. 6. 1 Apprentissage supervisé..... | 35 |
| 3. 6. 2 Apprentissage non supervisé..... | 35 |
| 3. 7 Algorithme d'apprentissage..... | 35 |
| 3. 7. 1 Algorithme de rétro propagation..... | 35 |
| 3. 8 MPPT à base de réseaux de neurones artificiels..... | 36 |
| 4 Résultats de simulation..... | 38 |
| 5 Conclusion..... | 40 |
| Conclusion générale..... | 41 |
| Résumé..... | 45 |

Nomenclature

| | |
|-----------------|---|
| ρ | La masse volumique de l'air en (Kg/m ³). |
| A | La surface balayée par la turbine en (m ²). |
| v | La vitesse de vent (m/s). |
| C _p | Le coefficient aérodynamique de puissance. |
| Ω | Vitesse mécanique de la turbine en (rad/s). |
| R | Rayon de la turbine en (m). |
| j | Inertie de la turbine en (Kg.m ²). |
| f | Coefficient de frottement de la machine (N.m.s.rad ⁻¹). |
| C _m | Couple statique fournie par l'éolienne en (N.m). |
| C _{em} | Couple électromécanique de la machine (N.m). |

Abréviations

| | |
|------|------------------------------|
| MPPT | Maximum Power Point Tracking |
|------|------------------------------|

Introduction générale

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre et inépuisable. Cependant la caractéristique mécanique puissance en fonction de la vitesse de rotation d'une turbine éolienne est naturellement non linéaire et un contrôleur pour la recherche de point de puissance maximale (MPPT) et donc nécessaire, pour cela, plusieurs algorithmes de commande ont été développés, comme celui qui est basé sur la logique floue, réseaux de neurones, ou les deux (Neuro – Floues). Dans notre cas le dispositif MPPT proposé est basé sur la théorie des réseaux de neurones artificiels.

Le but de ce travail est d'étudier la modélisation et la simulation (en statique et en dynamique) d'une turbine éolienne et de développer un contrôleur MPPT à base des réseaux de neurones artificiels.

Pour la modélisation et la simulation de l'ensemble des éléments de la turbine éolienne ainsi que les réseaux de neurones, nous avons utilisé le logiciel MATLAB®-SIMULINK®.

Le travail a été structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les différents types d'énergies renouvelables et leurs principes de fonctionnement.

Le second chapitre concerne, la modélisation et la simulation d'une turbine éolienne à trois pâles et à attaque directe de vent.

Dans le troisième chapitre, et après un aperçu théorique sur les réseaux de neurones on étudie un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) à base des réseaux de neurones.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale et des perspectives pour de futurs travaux.

Chapitre 1

Généralités sur les énergies renouvelables

1 Introduction

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme [1]. On peut dire que c'est une énergie disponible, essentiellement gratuite et compatible avec un certain respect environnemental [2].

L'énergie renouvelable s'impose comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux [3], et elle existe sous différentes formes (éolienne, solaire, hydraulique, géothermique, biomasse,...etc.)

2 Contexte énergétique mondial

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...) [1]. Ces énergies de l'avenir représentent le tiers de la capacité mondiale de production d'électricité [4].

En 2019 la production mondiale d'électricité par des sources renouvelables a été de l'ordre de 2500 GW [4]. Dont 47 % a été produit à partir de de la filière hydraulique, 25 % par l'énergie éolienne 23 % par l'énergie solaire et seulement 5 % avec l'ensemble des autres énergies renouvelables (voir fig.1).

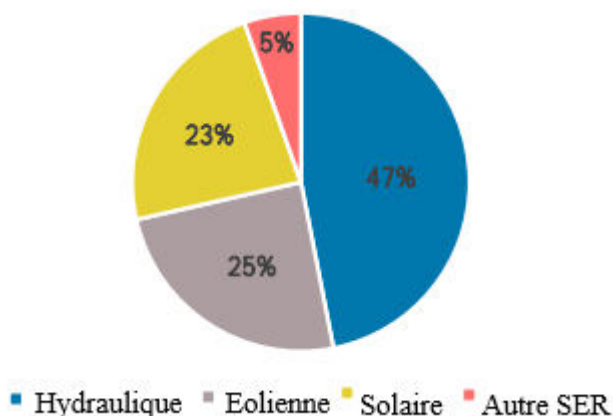


Fig.1- Répartition des sources d'énergie renouvelables dans le monde [4].

La capacité mondiale de l'énergie renouvelable a augmenté de 176 GW (+ 7.4 %) en 2019 (fig.1.2). La capacité d'énergie solaire a augmenté de 98 GW (+20%), suivi par l'énergie éolienne avec 59 GW (+ 10%). La capacité d'hydroélectricité a augmenté de 12 GW (+1%) et la bioénergie de 6 GW (+5%). La géothermie a augmenté d'un peu moins de 700 MW.

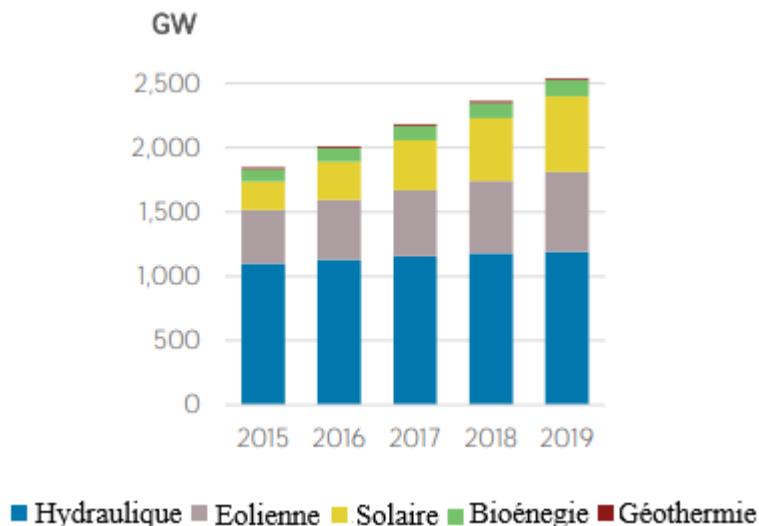


Fig. 2-Evolution mondiale de la capacité installée des énergies renouvelables [4].

3 Les énergies renouvelables, ressources et exploitation

Par rapport aux énergies fossiles (comme le pétrole et le gaz) les énergies renouvelables sont considérées comme des sources inépuisables, c'est-à-dire sa vitesse de formation est plus grande que sa vitesse d'utilisation [5] Les énergies renouvelables constituent donc une alternative aux énergies fossiles à plusieurs à raisons [6] :

- elles sont généralement moins perturbatrices de l'environnement, elles n'émettent pas de gaz à effet de serre et ne produisent pas de déchets ;
- elles autorisent une production décentralisée adaptée à la fois aux ressources et aux besoins locaux ;

Parmi les énergies renouvelables nous citons : L'hydraulique, le solaire thermique et photovoltaïque, l'éolien, la biomasse et la géothermie. Les principaux sources d'énergies renouvelables sont : les énergies éolienne, solaire, géothermique, hydraulique, ainsi que l'énergie issue de la biomasse.

3.1 L'énergie hydraulique

Dans une centrale électrique hydraulique, l'eau acquiert une énergie cinétique qui fait tourner une turbine. La turbine entraîne l'alternateur. Ce dernier convertit une partie de l'énergie mécanique de rotation de la turbine en énergie électrique [7], comme montre la (fig.3).

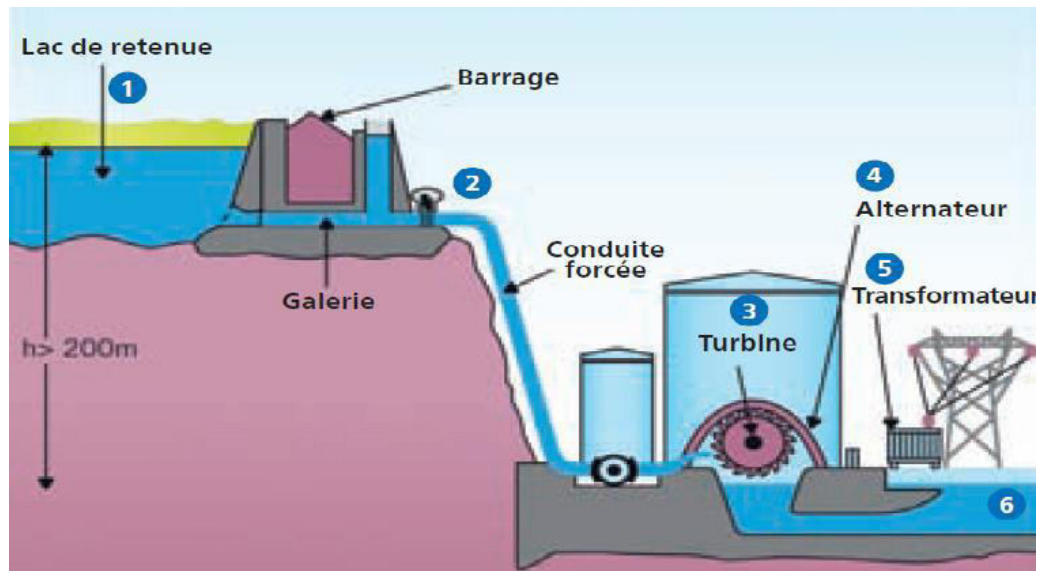


Fig.3-Centrale hydroélectrique [7].

3.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire une source d'énergie gratuite et non polluante.

Le soleil envoie sur Terre une puissance de 90.000 térawatts (TW), à comparer aux 14 TW consommés par la population mondiale, et va continuer à le faire pendant quelques milliards d'années. [1].

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques [8]

La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque

La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique

3.2.1L'énergie solaire photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par le sigle « PV », à été formé à partir des mots « photo » un mot grec signifiant lumière et « Volta » le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800 [9]

En général, une cellule photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur) dopée dans sa partie supérieure au bore (coté P) et dans sa partie inférieure au phosphore (coté N), comme montre la (fig.4).

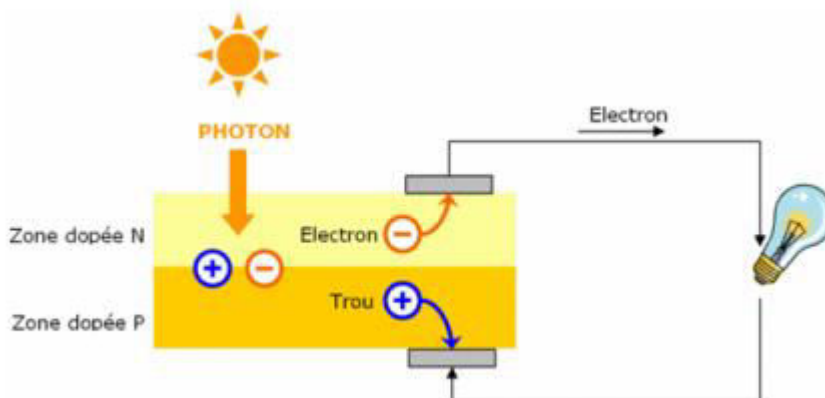


Fig.4 -Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [9].

Au voisinage de cette jonction P-N, un champ électrique maintient la séparation des charges électriques. Lorsqu'un photon vient frapper la cellule, il arrache des électrons par effet photoélectriques et crée un pair électron - trou. L'électron a suffisamment d'énergie pour franchir la jonction et il est collecté du côté N. Un courant électrique est créé [10].

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Le panneau photovoltaïque se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise (voir fig.5). Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec une orientation et un angle d'inclinaison spécifique. Le champ photovoltaïque est l'ensemble des panneaux montés en série et en parallèle pour atteindre une tension et un courant plus grands [9].

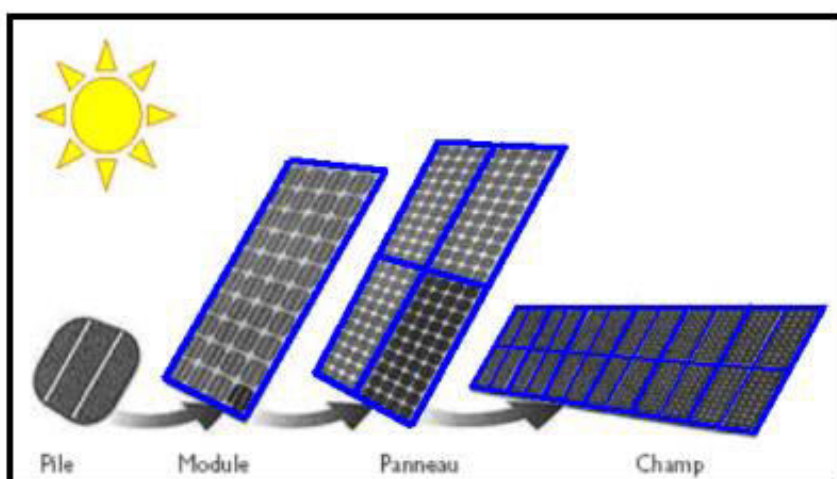


Fig.5 -La cellule au champ photovoltaïque [9].

3.2.2 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique est actuellement exploitée selon deux techniques :

Le solaire thermique sans concentration est utilisé en premier lieu afin de fournir de l'eau chaude sanitaire (voir fig.6) Cela reste un procédé de petite échelle.

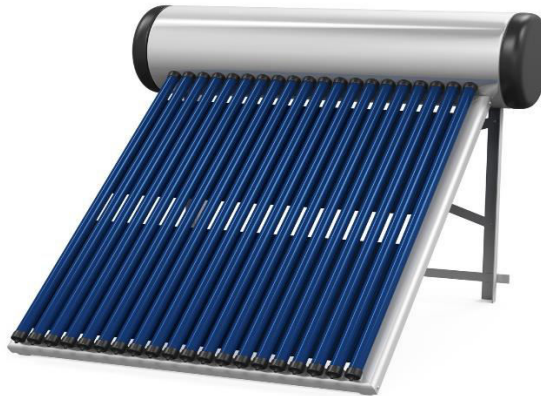


Fig.6- Le chauffe-eau solaire [11].

La solaire thermodynamique à concentration représente une filière prometteuse pour la production d'électricité. Cette filière a l'avantage de pouvoir stocker de façon efficace la chaleur produite et ainsi de produire de l'électricité de façon quasi-continue [12].

3.2.2.1 Centrale solaire thermodynamique

Une centrale solaire thermodynamique à concentration (ou centrale solaire thermique) est une centrale qui concentre les rayons du soleil à l'aide des miroirs afin de chauffer un fluide caloporteur à des niveaux de température suffisants. L'énergie thermique produite est d'abord convertie en énergie mécanique, puis en énergie électrique grâce à un alternateur.

3.2.2.2 Les fluides caloporteurs

Le fluide caloporteur est un paramètre très important au fonctionnement d'une centrale solaire thermodynamique à concentration. Le choix du fluide caloporteur détermine la température maximale admissible, impose la technologie et les matériaux du récepteur et conditionne la possibilité du stockage

On distingue comme fluides [13] :

- Les huiles qui présentent un bon coefficient d'échange sont les fluides les plus utilisés dans les centrales cylindro-paraboliques.

- Les sels fondus, mélanges binaires ou ternaires à base de nitrates de sodium et de potassium qui possèdent une densité élevée sont de très bons fluides de stockage.

- Les fluides organiques (butane, propane, etc.) qui ont une température d'évaporation basse sont utilisés comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.

- L'eau liquide fluide de transfert idéal, offre un excellent coefficient d'échange et possède une forte capacité thermique est utilisée directement comme fluide thermodynamique dans un cycle de Rankine.

- Les gaz (hydrogène ou l'hélium) sont utilisés comme fluides thermodynamiques et entrainer les moteurs Stirling associés aux collecteurs paraboliques.

- L'air est utilisé classiquement comme fluide de travail dans une turbine à gaz.

L'air peut aussi être utilisé comme caloporteur seulement.

3.3. Les différentes technologies des centrales solaires thermodynamiques

Il existe trois types de centrales solaires :

3.3.1 Les centrales à capteurs paraboliques

Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur Stirling au foyer de la parabole (voir fig.7). Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C.

Chaque capteur est considéré comme une mini-centrale, qui produit de l'électricité de manière autonome. L'association de plusieurs collecteurs paraboliques permet d'augmenter la puissance finale [14]

De toutes les technologies solaires, les capteurs paraboliques ont démontré les meilleurs rendements solaire-électricité (29.4%) [15]

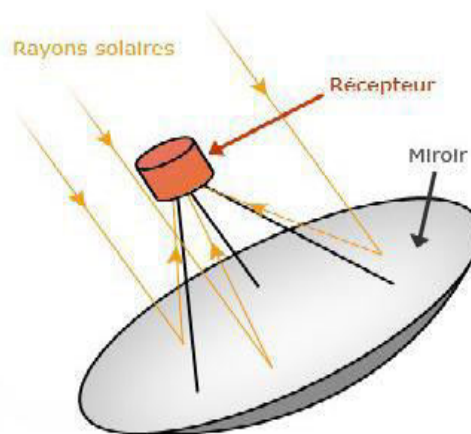


Fig.7 - capteur solaire parabolique [14].

3.3.2 Les centrales solaires cylindro-paraboliques

Un collecteur cylindro-parabolique est un capteur solaire à foyer linéaire, fondamentalement composé d'un concentrateur en forme de cuvette parabolique qui reflète le rayonnement solaire direct sur un tube récepteur situé dans la ligne focale de la parabole (voir fig.8). L'ouverture du capteur reflète le rayonnement solaire sur une surface plus petite du tube du récepteur, chauffant le fluide qui y circule.

Le rayonnement solaire est ainsi transformé en énergie thermique sous forme de chaleur qui peut atteindre la chaleur latente du fluide. Cette énergie thermique peut alors être employée pour alimenter des processus industriels en énergie thermique indispensable (par exemple, l'industrie alimentaire, industrie pétrochimique, etc.) ou par des cycles de Rankine pour produire l'électricité avec une turbine à vapeur dans une centrale thermique solaire.

Les capteurs cylindro-paraboliques peuvent fournir aujourd'hui l'énergie thermique utile jusqu'à 398°C. La limitation principale de la température maximale est imposée par l'huile thermique actuellement utilisée comme fluide de fonctionnement, parce qu'elle se dégrade rapidement au-dessus de 398°C. Cependant, la recherche en nouveaux fluides promet les températures plus élevées près de 500°C au moyen terme. [16]

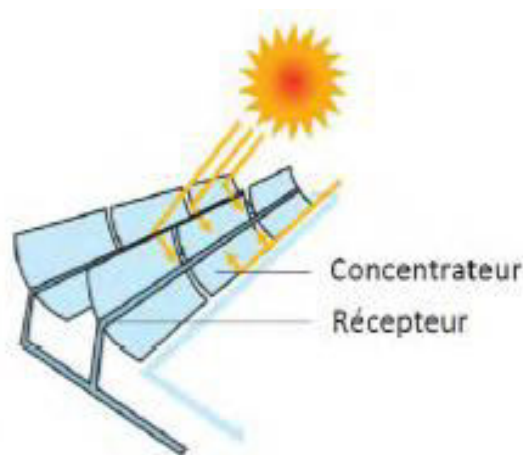


Fig.8 -Centrale à collecteurs cylindro-paraboliques [17].

3.3.3 Centrale solaire à tour

Un système central à tour se compose des miroirs appelés héliostats, qui sont espacés pour éviter l'interférence mécanique ou optique entre eux pendant qu'ils pivotent pour refléter la lumière du soleil directe sur un récepteur placé au sommet d'une tour. Le récepteur est conçu pour arrêter effectivement la lumière du soleil entrante concentrée et l'absorber comme chaleur à une température élevée. Cette énergie est reçue par un fluide caloporteur et stockée en tant qu'énergie thermique, employée pour conduire un générateur électrique, ou utilisée en tant que chaleur de processus [16].

La tour solaire a l'avantage que toute la conversion de l'énergie solaire a lieu dans une région fixe simple, c.-à-d., le récepteur (le four). Ceci permet au récepteur d'être fixé, en grande partie évitant le besoin de réseaux de transport d'énergie, et permet un investissement plus rentable conçu pour améliorer l'efficacité et la sophistication du processus de conversion d'énergie. Elles ont été construites le plus souvent comme de grands systèmes simples pour actionner un cycle à vapeur. Un inconvénient universel est que la position fixe du récepteur signifie que les héliostats ne se dirigent pas généralement directement au soleil, de sorte que la quantité de rayonnement solaire rassemblée par unité de superficie de miroir soit réduite en comparaison avec un concentrateur plat (l'effet de cosinus) [16]

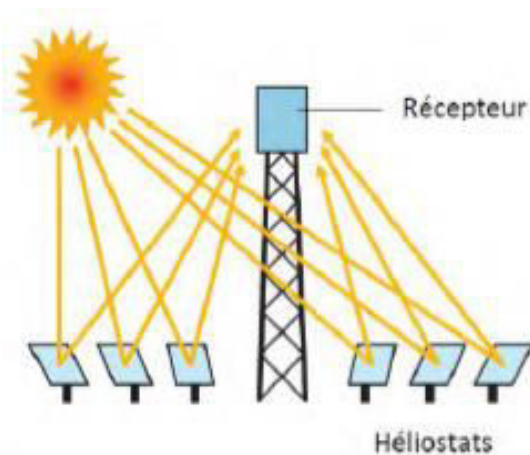


Fig.9- central solaire à tour [17].

3.4 L'énergie géothermie

Le terme géothermie provient du grec <Géo> et <thermos>, signifiant respectivement : la terre et la chaleur. La géothermie peut se définir comme étant la technique qui consiste à puiser dans le sous-sol ou dans les roches, les calories qui y sont contenues, afin de les rendre disponibles en surface pour des applications de chauffage ou de production d'électricité par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques ; c'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant, il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens où un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer [16].

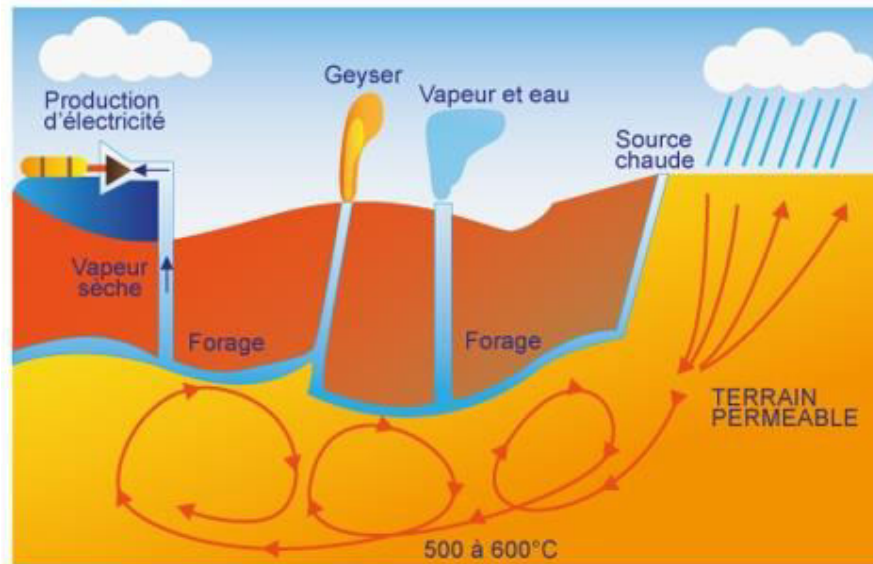


Fig.10 -énergie géothermie[18]

3.5 L'énergie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, la biomasse regroupe ainsi l'ensemble des matières organiques, d'origine végétale ou animale pouvant devenir source d'énergie par combustion directe, après méthanisation ou après de nouvelles transformations chimiques. La biomasse, employée pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants, comprend trois familles principales [1] :

Biogaz

Biocarburants

Biocombustibles (bois, paille, ...)

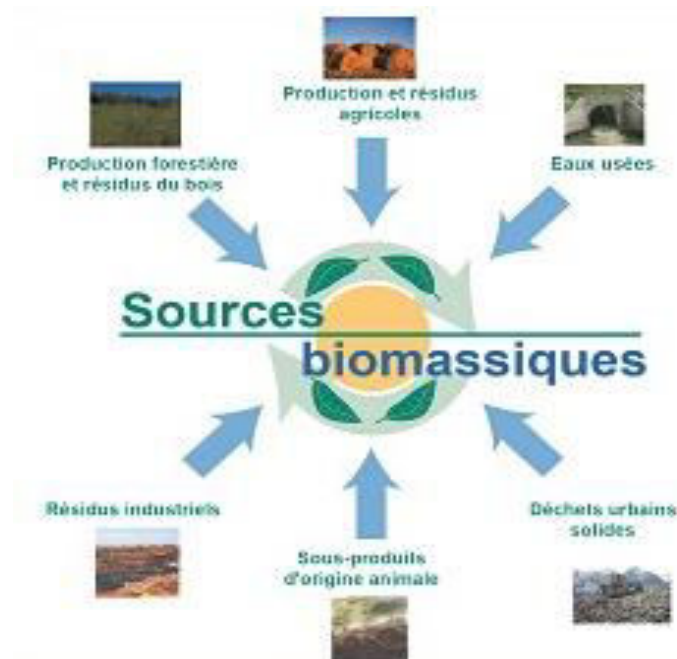


Fig.11-énergie biomasse [19].

3.6 L'énergie Energie éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [20].

3.6.1 Types des éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal.

3.6.2 Eolienne axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus (voir fig.12) conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius(voir fig.13) inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924) [21].

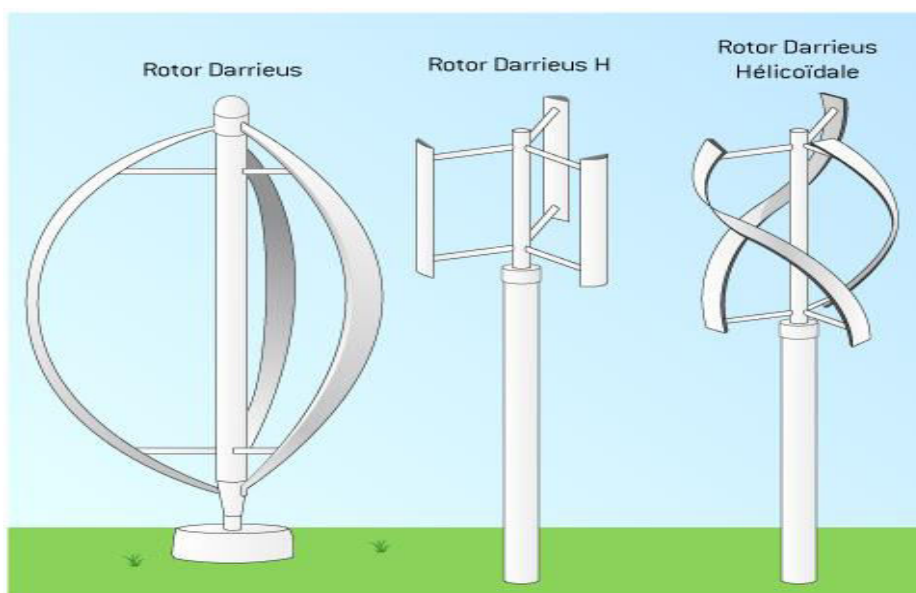


Fig.12-Eolienne à axe vertical de type Darrieus [22].



Fig.13-Eolienne à axe vertical de type Savonius [23].

3.6.3 Éolienne à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal (voir fig.14) sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.



Fig.14-Éolienne à axe horizontal.

Les éoliennes à axe horizontal sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3 (voir fig.15), le rotor tripal (à 3 ailes) est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien (voir fig.16).

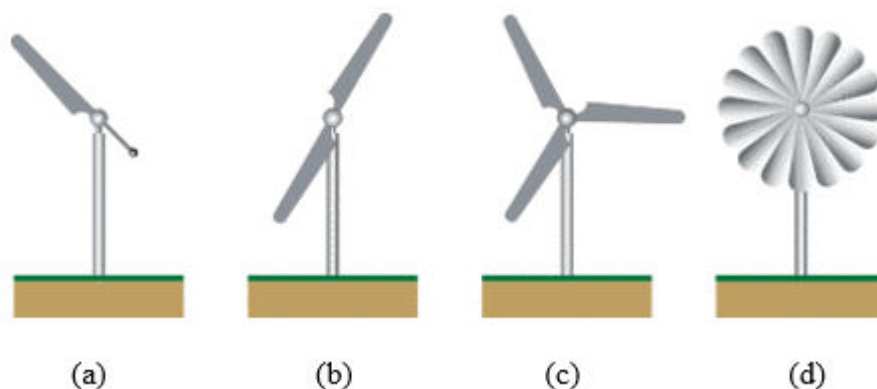


Fig.15-Éolienne à axe horizontal à : (a) Une pale, (b) Deux pales, (c) Tripales, (d) Multiple [24]

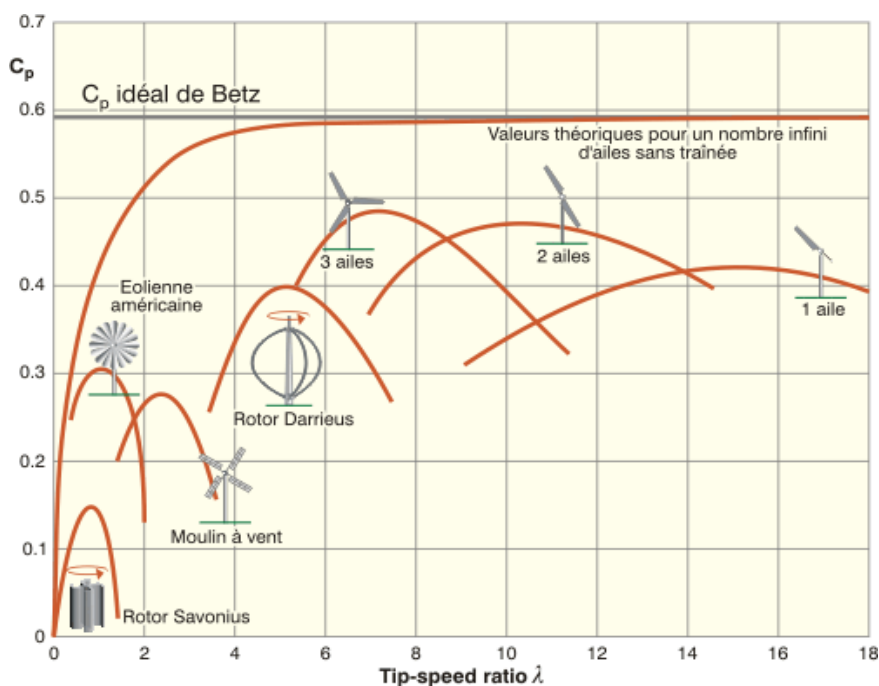


Fig.16-Évolution typique du rendement aérodynamique C_p en fonction du tip-speed ratio et du modèle d'éolienne[25]

Les éoliennes à axe horizontale sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent [21].

4 Systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables

Un système hybride de production électrique est conçu pour répondre aux exigences de la charge pour assurer la continuité de service.

Un système hybride est généralement constitué de deux ou plusieurs sources d'énergies, connectées, soit à un bus continue (DC), soit à un bus alternatif (AC).

L'utilisation des convertisseurs DC/DC, DC/AC et AC/DC, donne la possibilité de connecter plusieurs sources entre elles ; qu'elles soient de même type : pile à combustible- pile à combustible, éolienne - éolienne, photovoltaïque – photovoltaïque... ou de différents types : pile – éolienne [26], photovoltaïque – éolienne [27], [28] pile – photovoltaïque [29]...

Dans un système de production électrique hybride, les batteries et les super condensateurs sont généralement utilisés pour le stockage d'énergie, mais il existe d'autres systèmes tels que le stockage inertiel (volant d'inertie) [30] et le stockage d'hydrogène.

Dans les systèmes utilisant un bus DC, l'utilisation des batteries ou des super condensateurs (SC) permet d'amortir les fluctuations du flux de charge à très court terme et à long terme. La régulation est réalisée de manière autonome.

5 Structure des systèmes hybrides

Les structures des systèmes hybrides sont classés en deux catégories [31] : couplage DC (voir fig.17) et couplage AC(voir fig.18).

Dans le couplage DC (courant continu), toutes les sources sont connectées à un bus continu.

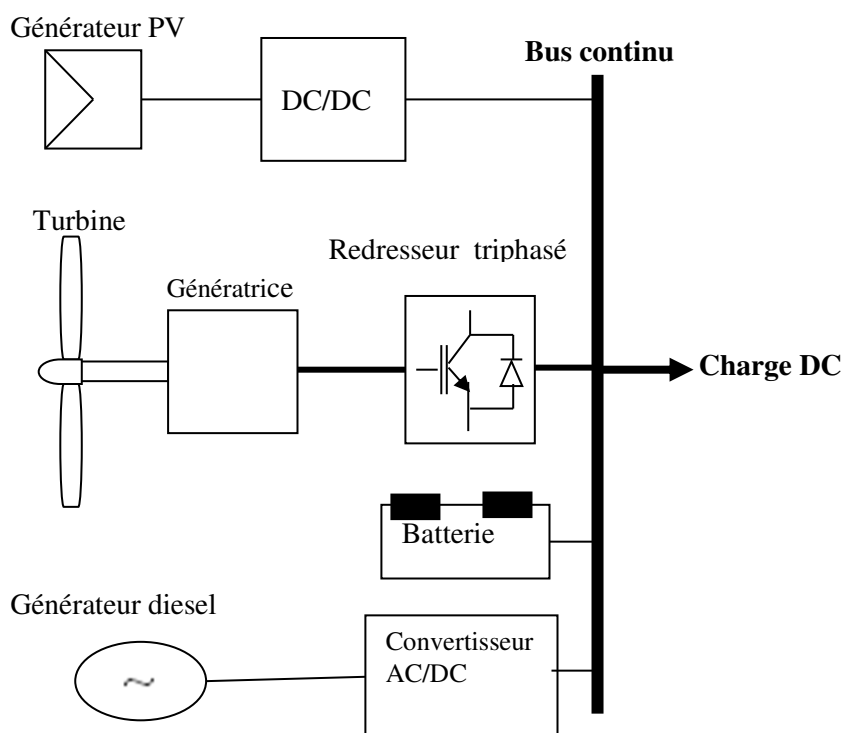


Fig.17-Exemple d'un système hybride de puissance avec un bus continu DC.

Dans le couplage AC (Courant alternatif), toutes les sources sont connectées à un bus AC avant la connexion à la charge. Dans ce cas la tension et la fréquence doivent être contrôlées.

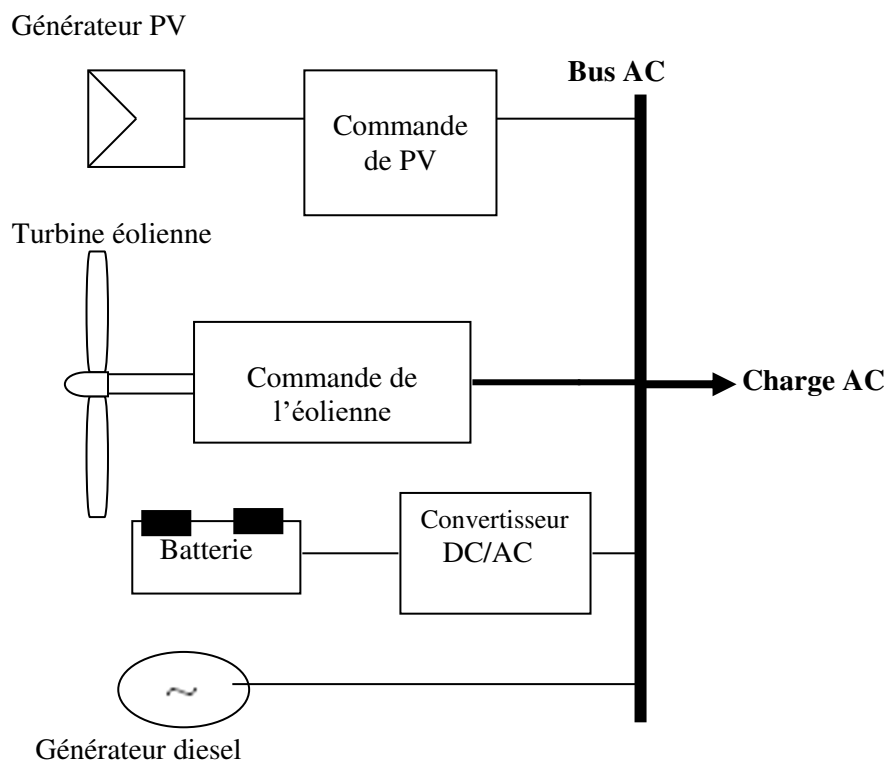


Fig.18:-Exemple d'un système hybride de puissance avec un bus alternatif AC.

6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes présentés les différents types d'énergies renouvelables et leur principe de fonctionnement d'une manière générale ainsi que les différentes structures.

Et on conclut que les énergies renouvelables nous proposent de nombreuses façons de la production de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs avantages et des inconvénients.

Chapitre 2

Modélisation et Simulation D'une Turbine Éolienne

1 Introduction

La technologie des éoliennes (ou capteurs de vent) a connu un développement important.

Dans ce chapitre nous allons modéliser une turbine éolienne à vitesse variable. Cette modélisation permet de trouver la variation instantanée de la puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse de vent. Pour la modélisation et la simulation de l'éolienne, nous avons utilisé le logiciel MATLAB®-SIMULINK®.

2 Principe de fonctionnement des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent pour propulser un arbre en rotation. Cela se fait en convertissant l'énergie cinétique en énergie mécanique, puis en se transformant l'énergie électrique au moyen d'un générateur électromagnétique intégré au rotor. Où Ils sont envoyés au réseau de distribution, stockés dans des batteries ou utilisés directement [32]

3 Constitution d'une éolienne a axe horizontal

Une éolienne à axe horizontal (voir fig.19) se compose essentiellement d'une nacelle, d'un mat et des pales :

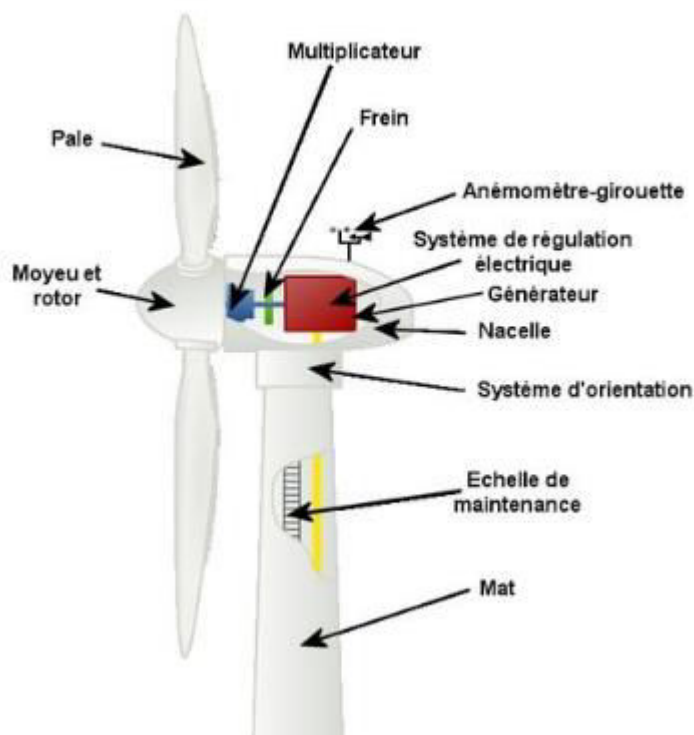


Fig. 19–Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal [33].

Les pales : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor

- Le moyeu: il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

- La nacelle: Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique.

- Le générateur électrique : il assure la production électrique. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

- Le mât : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales

- Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent.

- Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

- Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

- Le système de régulation électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

4 Modèle du vent

Le vent est un paramètre très important pour le système de production à éolienne, car l'énergie électrique produite par une turbine éolienne est directement dépendante de la variation du vent.

Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées Principalement par les différences de température entre deux zones [32].

En ce qui concerne l'Algérie, la vitesse de vent varie d'un endroit à un autre dont le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement la région d'Adrar comme montre la figure suivante [25].

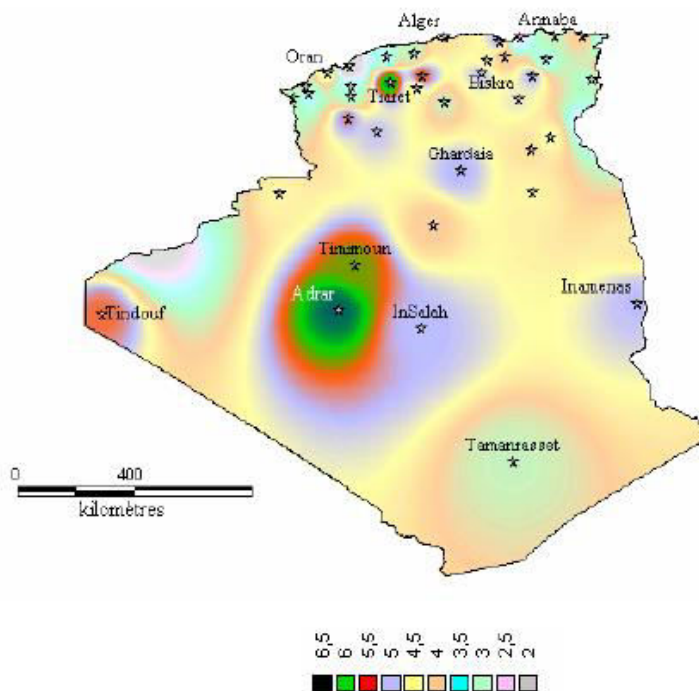


Fig. 20–Atlas de la vitesse moyenne du vent de l’Algérie (en m/s) estimée à 10 m du sol [32].

Dans un site de production éolienne, la vitesse de vent mesurée, peut être ainsi utilisée, soit pour développer le modèle mathématique de vent, soit comme une donnée statistique pour un modèle de prédiction.

Dans ce travail, la vitesse du vent sera modélisée, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [31] :

$$v(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047 \cdot t) + 2 \sin(0.2665 \cdot t) + \sin(1.2930 \cdot t) + 0.2 \sin(3.6645 \cdot t) \quad (1)$$

5 Modèle de la turbine

La turbine éolienne transforme l’énergie cinétique de vent en énergie mécanique, dont la puissance disponible sur les pales de l’éolienne est la quantité de cette énergie par secondes, elle peut donc s’écrire [34]:

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

Où:

ρ : La masse volumique de l'air en (Kg/m^3).

A : La surface balayée par la turbine en (m^2).

v : La vitesse de vent (m/s).

Tenant compte de l'aérodynamique des pales, la puissance mécanique réellement récupérée par la turbine éolienne peut s'écrire [35] :

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

Avec :

C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance.

Le coefficient de puissance C_p est un paramètre sans dimension permet d'exprimer l'efficacité de la voilure dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ce coefficient dépend de la vitesse de vent, du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation, Il est généralement donné en fonction d'une vitesse réduite λ défini par [36]:

$$\lambda = \frac{\Omega R}{v} \quad (4)$$

Où

Ω : Vitesse mécanique de la turbine en (rad/s).

R: Rayon de la turbine en (m).

v : vitesse de vent (m/s).

La figure 21, représente la courbe de coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse réduite λ , cette courbe a un maximum théorique de l'ordre de 0.59 qui est appelé limite de Betz et qui correspond à la puissance maximale que l'on peut extraire du vent.

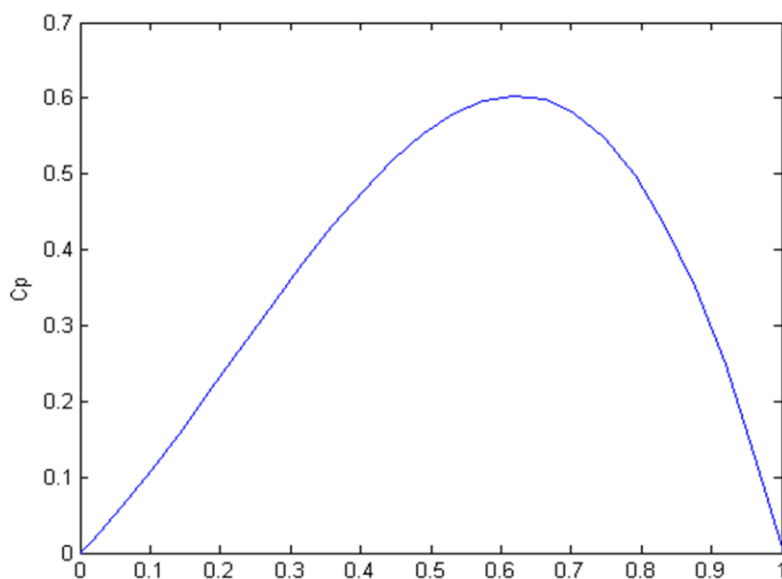


Fig. 21–Coefficient de puissance C_p .

6 Equation dynamique de l'arbre

L'équation dynamique de l'ensemble turbine plus la génératrice est donnée par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f\Omega \quad (5)$$

Avec :

J : Inertie de la turbine en (Kg.m²).

f : Coefficient de frottement de la machine (N.m.s.rad⁻¹).

C_m : Couple statique fournie par l'éolienne en (N.m).

C_{em} : Couple électromécanique de la machine (N.m).

Ω : vitesse angulaire.

La fonction de transfert mécanique équivalente au processus est donnée par l'expression [37]:

$$C_m(s) - C_{em}(s) = J \cdot S \cdot \Omega + f \cdot \Omega \quad (6)$$

Avec la constante de temps mécanique :

$$T_m = \frac{J}{f} \quad (7)$$

7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Plusieurs types de générateurs électriques sont utilisés dans les aérogénérateurs à vitesse fixe ou variable.

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 décrites dans tous qui est suit [38]

7.1 Asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones (voir fig.22) sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses.

Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une

solution parfois utilisée (voir fig.23), mais là encore le rendement est loin d'être optimal surtout la plage de vent.

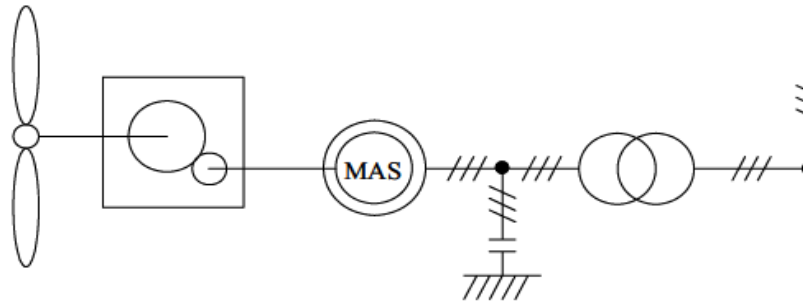


Fig. 22–Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe) [38].

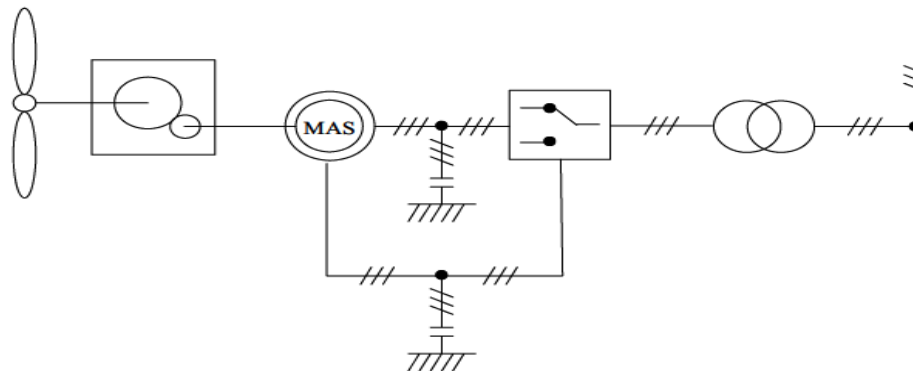


Fig. 23–Système éolien basée sur la machine asynchrone de type Dahlander à deux vitesses de rotation [38].

Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (voir fig.24). La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique.

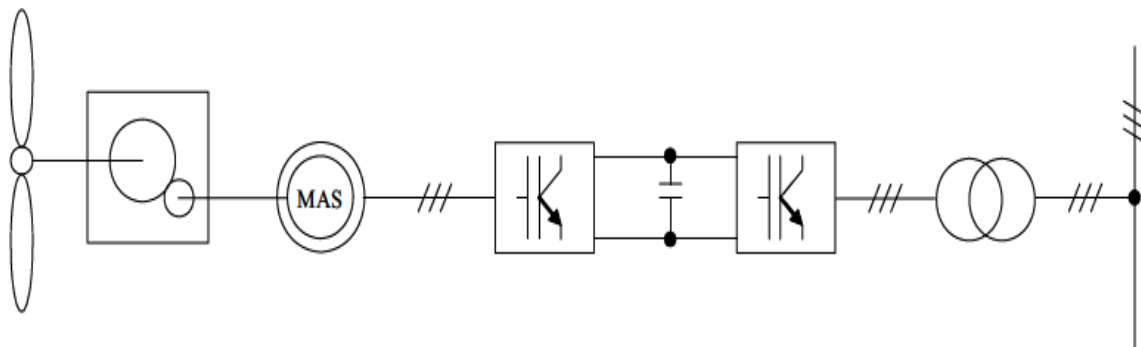


Fig. 24–Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable [38].

7.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) :

Dans cette structure le stator de la génératrice est directement couplé au réseau (voir fig.25). le plus souvent par un transformateur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement. La chaîne rotor permet ainsi à l'ensemble de fonctionner à

vitesse variable sur une plage de vitesse qui dépend du type et du dimensionnement de la chaîne rotor. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines.

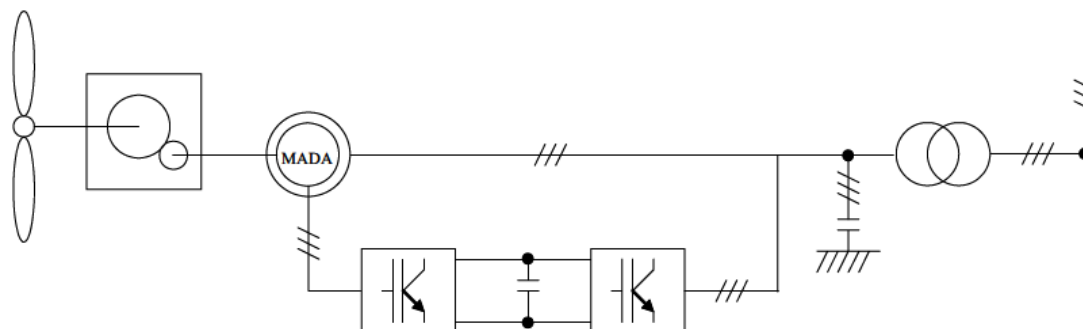


Fig. 25–Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation – régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation [38].

7.3 Génératrices synchrones

Les machines asynchrones 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 à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes.

. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants (voir fig.26). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).

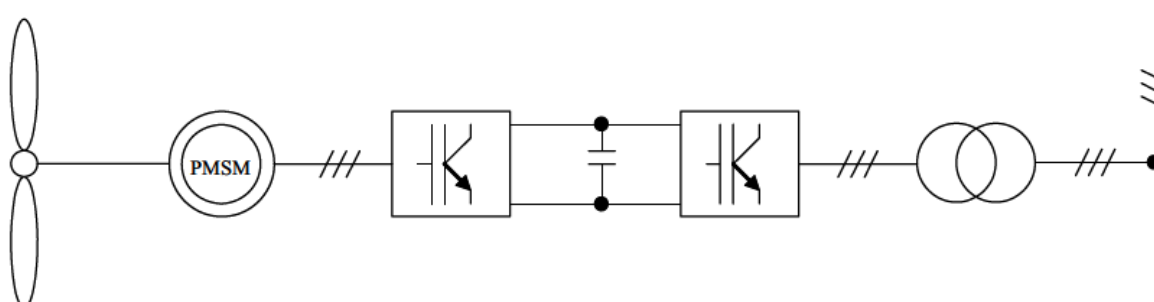


Fig. 26–Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [38].

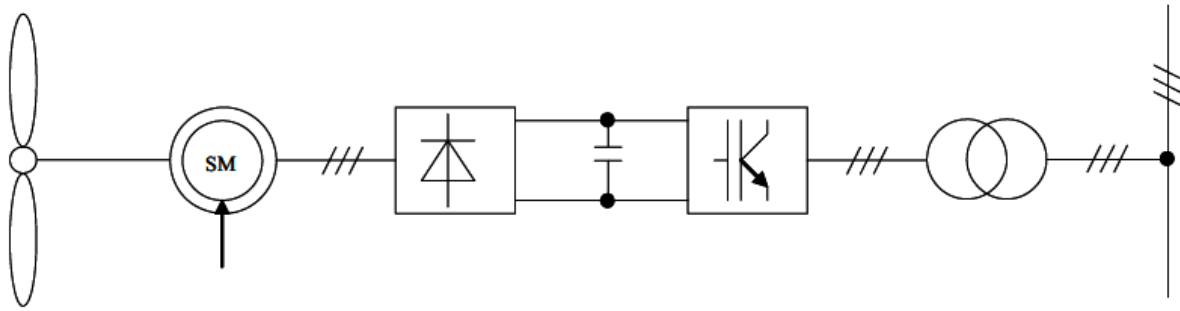


Fig. 27–Système basée sur la machine synchrone et redresseur à diodes [38].

Une autre solution (voir fig.27) est le redressement à diodes placé directement derrière la génératrice. L'optimisation de la gestion énergétique n'est alors possible que si l'excitation est réglable.

8 Schéma de simulation

Le schéma bloc de la turbine éolienne étudiée dans ce travail est donné par la figure 28, dont les valeurs des paramètres de simulation sont données dans le tableau 1.

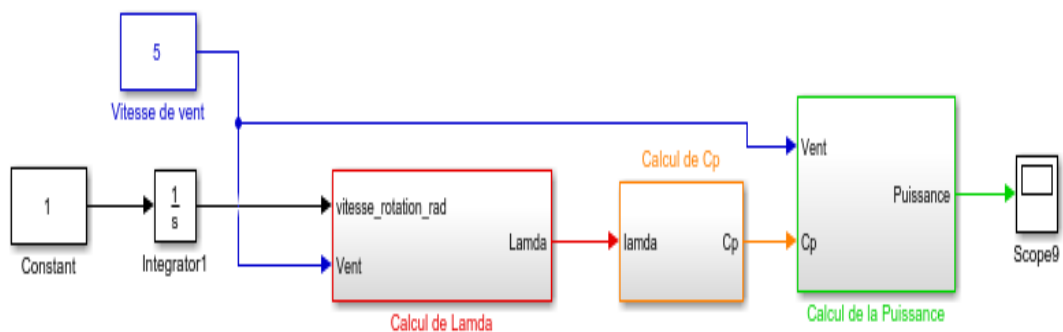


Fig. 28–Schéma bloc de la turbine éolienne.

**Tableau 1 –Paramètres de l'éolienne
utilisée (Type AC 750) [38]**

| Paramètre | Valeur |
|------------------------------|---------------------|
| Puissance crête | 750 W |
| Vitesse de vent nominale | 9.5 m/s |
| Vitesse de vent de démarrage | 3 m/s |
| Nombre de pales | 3 |
| Surface active | 3.76 m ² |

9 Résultats de la simulation

Dans ce travail, l'éolienne utilisée est de type horizontale à trois pales, dont la caractéristique puissance mécanique (Pt) récupérée par la turbine en fonction de la vitesse de rotation Ω , pour différentes valeurs de vent est représentée dans la figure suivante :

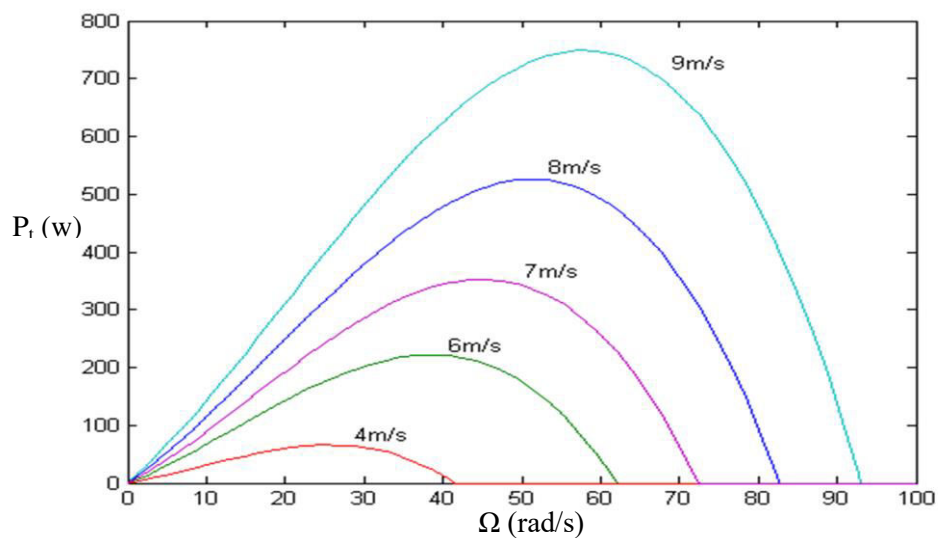


Fig. 29–La caractéristique puissance/vitesse de rotation de turbine éolienne étudiée.

Pour une variation rapide de la vitesse de vent figure 30, les figures 31 et 32 représentent respectivement la variation de la vitesse de rotation et la variation de la puissance mécanique de l'éolienne.

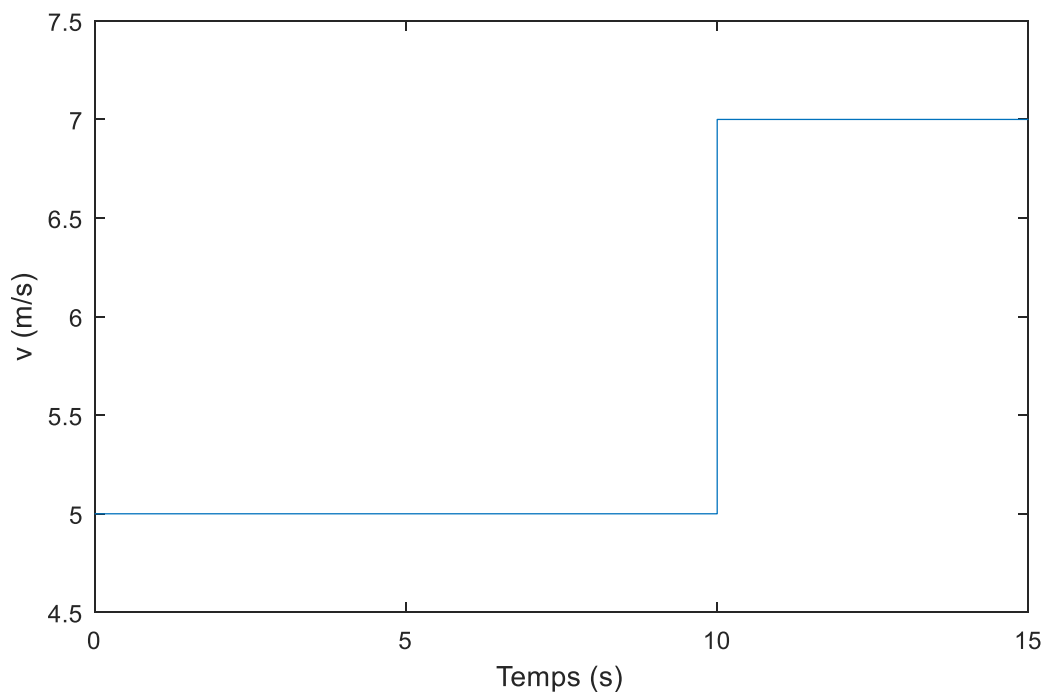


Fig. 30–La vitesse de vent.

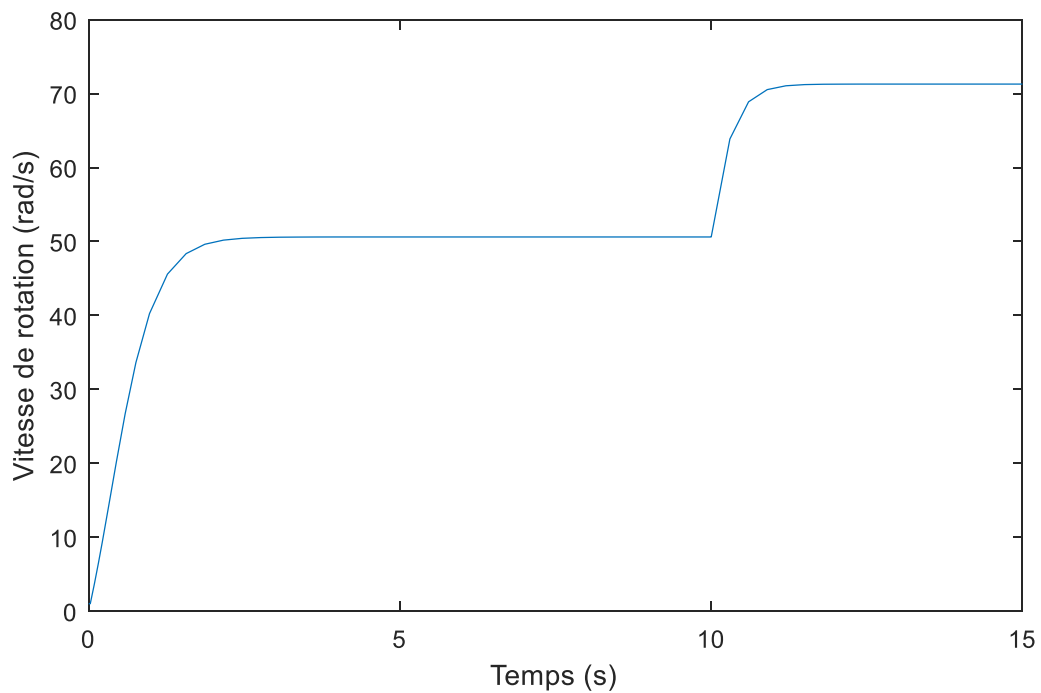


Fig. 31–Vitesse de rotation de la turbine éolienne.

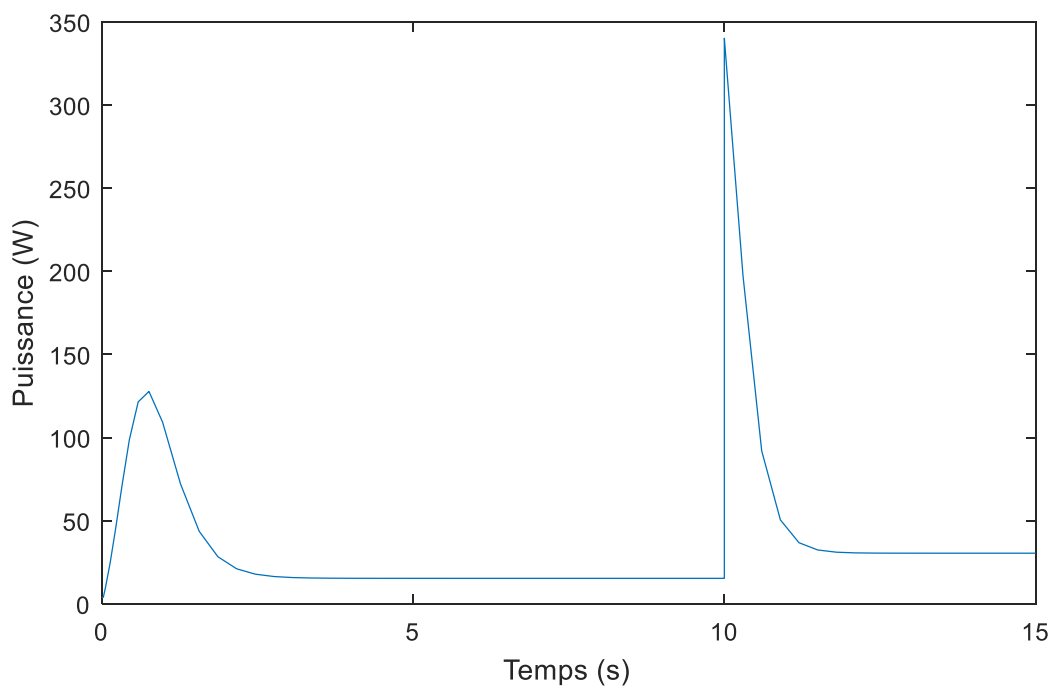


Fig. 32–Puissance mécanique de la turbine éolienne.

Les figures précédentes montrent clairement qu'à une vitesse de vent donnée (voir fig.30) l'éolienne tourne à une vitesse de rotation maximale (voir fig.31) ce qui correspond à une puissance mécanique minimale (voir fig.32). Pour régler ce problème un contrôleur pour la recherche de la puissance optimal est donc nécessaire.

10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation d'une turbine éolienne à vitesse variable.

Les résultats de simulation montrent clairement que La caractéristique de la puissance mécanique d'une éolienne est naturellement non linéaire et nécessite impérativement d'adopter une stratégie de recherche du point maximal de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Chapitre 3

Réseaux de Neurones Artificiels Pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'une Eolienne

1 Introduction

La caractéristique de la puissance mécanique d'une éolienne est naturellement non linéaire et nécessite impérativement d'adopter une stratégie de recherche du point maximal de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking). Dans notre cas le dispositif MPPT proposé est basé sur la théorie des réseaux neurones artificiel.

Dans ce chapitre nous présenterons les réseaux de neurones d'un point de vue général, ensuite nous traiterons en détails la modélisation et la commande MPPT par réseaux de neurones artificiels d'une turbine éolienne à vitesse variable

2 Architectures et méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance mécanique d'une éolienne est naturellement non linéaire (voir fig.29), car la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent, et L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique.

Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique $C_p(\lambda)$.

Pour s'approcher de ce but une commande spécifique doit être utilisée. Pour cela, il y a deux approches possibles :

a- Dans le cas où on connaît la caractéristique mécanique (puissance /vitesse de rotation), il suffit donc de suivre la courbe de puissance optimale (voir fig.33) comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales. Ce mode de pilotage est décrit dans la littérature [39].

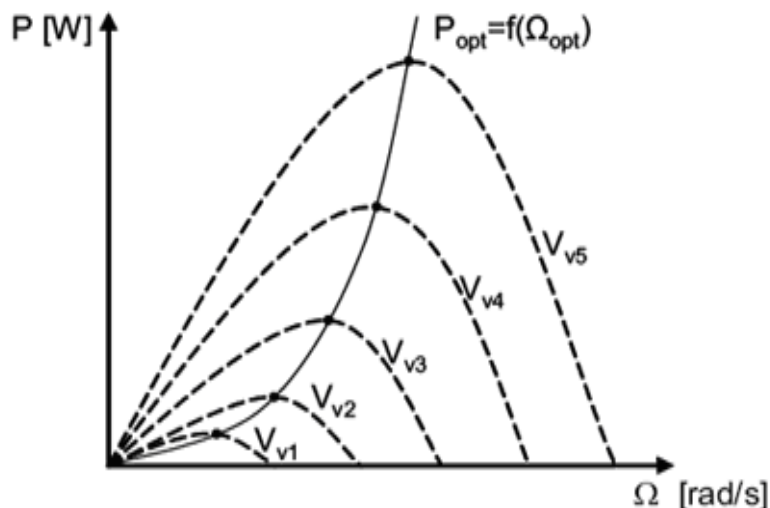


Fig. 33–La caractéristique puissance mécanique en fonction de la vitesse d'une éolienne [38].

b- Dans le cas où la caractéristique mécanique de la turbine n'est pas connue. Un algorithme de recherche du point maximal de puissance MPPT (Maximum Power Point Tracking) est donc nécessaire, pour cela, plusieurs algorithmes de commande ont été développés, comme celui qui est basé sur la logique floue [40], réseaux de neurones [41], ou les deux (Neuro – Floues) [42].

3 Contrôleur MPPT par Réseaux de neurones

3.1 Réseaux de neurones : définitions et propriétés

Un réseau de neurones peut être considéré comme un modèle mathématique de traitement réparti, composé de plusieurs éléments (processeurs) de calcul non linéaire (neurones), opérant en parallèle dont chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit [43].

3.2 Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés [44] :

- Traitement d'images : reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de forme, cryptage, classification, etc.
- Traitement du signal : filtrage, classification, identification de source, traitement de la parole...etc.
- Contrôle : commande de processus, diagnostic, contrôle qualité, asservissement des robots, systèmes de guidage automatique des automobiles et des avions...etc.
- Défense : guidage des missiles, suivi de cible, reconnaissance du visage, radar, sonar,
- Lidar (Détection et télémétrie de la lumière), compression de données, suppression du bruit...etc.
- Optimisation : planification, allocation de ressource, gestion et finances, etc.
- Simulation : simulation du vol, simulation de boîte noire, prévision météorologique, recopie de modèle...etc.

3.3 Modèle d'un Neurone Artificiel

La fig.34 montre la structure d'un neurone artificiel [44].

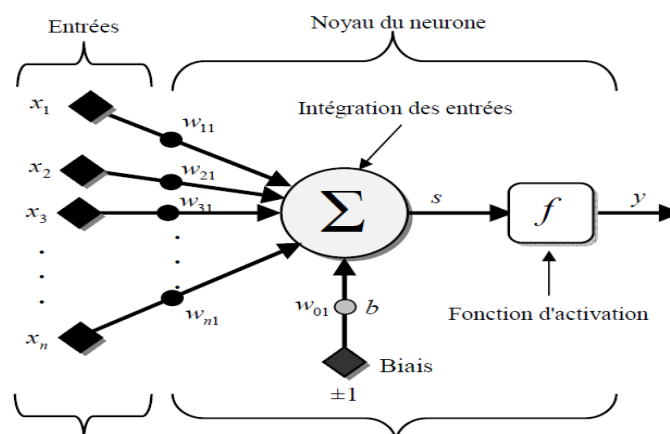


Fig. 34–Modèle d'un neurone artificiel [44].

Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones en amont. A chacune de ses entrées est associé un poids W représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones en aval. A chaque connexion est associé un poids.

Le neurone réalise alors trois opérations sur ses entrées :

- Pondération : multiplication de chaque entrée par un paramètre appelé poids de connexion,
- Sommation : une sommation des entrées pondérées est effectuée
- Activation : passage de cette somme dans une fonction, appelée fonction d'activation.

La valeur calculée est la sortie S du neurone qui est transmise aux neurones suivants :

$$S = \sum X_i \cdot W_{ij} \quad (8)$$

$$y = f(s) \quad (9)$$

Avec :

x_i : est l'entrée i ,

W_{ij} : est la valeur du poids synaptique reliant l'entrée i au neurone j ,

Σ : est la somme pondérée des entrées x_i ,

$f(s)$: est la fonction d'activation,

s : est la sortie du neurone

3. 3. 1 Fonctions d'activations

Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone, les plus courantes et les plus citées dans la littérature sont énumérées dans la figure ci-dessous [37] :










| Nom de la fonction | Relation entrée/sortie | Icône | Nom MATALB |
|-----------------------------|--|--|------------|
| Seuil | $y=0$ si $s < 0$ $y=1$ si $s \geq 0$ |  | hardlim |
| Seuil symétrique | $y=-1$ si $s < 0$ $y=1$ si $s \geq 0$ |  | hardlims |
| Linéaire | $y=s$ |  | purelin |
| Linéaire saturée | $y=0$ si $s \leq 0$ $y=s$ si $0 \leq s \leq 1$ $y=1$ si $s \geq 1$ |  | satlin |
| Linéaire saturée symétrique | $y=-1$ si $s < -1$ $y=s$ si $-1 \leq s \leq 1$ $y=1$ si $s > 1$ |  | satlins |
| Linéaire positive | $y=0$ si $s \leq 0$ $y=s$ si $s \geq 0$ |  | poslin |
| Sigmoïde | $y = \frac{1}{1 + \exp^{-s}}$ |  | logsig |
| Tangente hyperbolique | $y = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$ |  | tansig |
| Compétitive | $y=1$ si s maximum $y=0$ autrement |  | compet |

Fig. 35–Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA [44].

3. 4 Architecture des réseaux de neurones

Par définition l'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux au sein d'un même réseau. Cette architecture est généralement dépend de la tâche à apprendre.

On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones [43-44]:

- Les réseaux de neurones non bouclés (statiques ou acycliques)
- Les réseaux de neurones bouclés (dynamiques ou récurrents)

3. 4. 1 Les réseaux de neurones non bouclés

Dans un réseau de neurones non bouclé l'information circule des entrées vers les sorties sans retour en arrière comme montre la figure suivante :

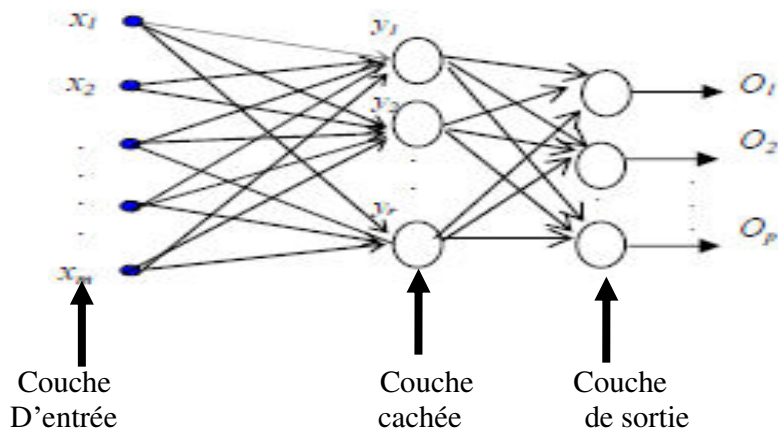


Fig. 36–Schéma d'un réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches).

3. 4. 2 Les réseaux de neurones bouclés

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un retard : un réseau de neurones bouclé est donc un système dynamique, régi par des équations différentielles ; comme l'immense majorité des applications sont réalisées par des programmes d'ordinateurs, on se place dans le cadre des systèmes à temps discret, où les équations différentielles sont remplacées par des équations aux différences. Il s'agit donc de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network or recurrent network)

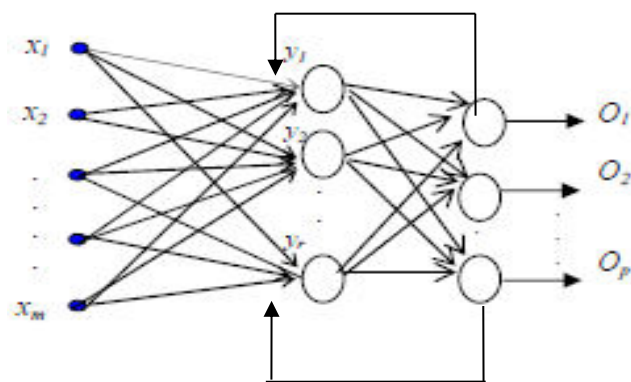


Fig. 37–Schéma de réseau de neurones bouclé.

3. 5 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est une phase du développement d'un réseau de neurones durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention du comportement désiré.

Dans la majorité des algorithmes actuels, les variables modifiées pendant l'apprentissage sont les poids des connexions. Dont l'optique d'accorder la réponse du réseau aux exemples et à l'expérience dont les poids sont initialisés avec des valeurs aléatoires. Puis des exemples expérimentaux représentatifs du fonctionnement du procédé dans un domaine donné, sont présentés au réseau de neurones

3. 6 Type d'apprentissage

Il existe de nombreux types de règles d'apprentissage, les deux les plus importants et les plus utilisés sont : les règles d'apprentissage supervisé et non supervisé.

3. 6. 1 Apprentissage supervisé

Dans ce type, une information précise sur la sortie désirée est disponible. Le réseau apprend par présentation de pair d'entrée/sortie. Durant l'apprentissage, les valeurs de sorties désirées sont comparées à celles produites par le réseau. L'erreur résultante est utilisée pour l'ajustement des poids des connexions [45].

3. 6. 2 Apprentissage non supervisé

L'apprentissage non supervisé consiste à ajuster les poids à partir d'un seul ensemble d'apprentissage formé uniquement de données. Aucun résultat désiré n'est fourni au réseau également dit compétitif et (ou) coopératif. L'avantage de ce type d'apprentissage réside dans sa grande capacité d'adaptation reconnue comme une auto organisation, « self-organizing ». L'apprentissage non supervisé est surtout utilisé pour le traitement du signal et l'analyse factorielle [43].

3. 7 Algorithme d'apprentissage

L'algorithme d'apprentissage est la méthode mathématique qui va modifier les poids de connexions afin de converger vers une solution qui permettra au réseau d'accomplir la tâche désirée.

Plusieurs algorithmes itératifs peuvent être mis en œuvre, parmi lesquels on note :

Algorithme de rétro propagation

3. 7. 1 Algorithme de rétro propagation

La rétro propagation a pour but de changer les poids de chaque connexion. Ce processus d'apprentissage peut être répété plusieurs fois jusqu'à ce que on obtenir des bon résultats.

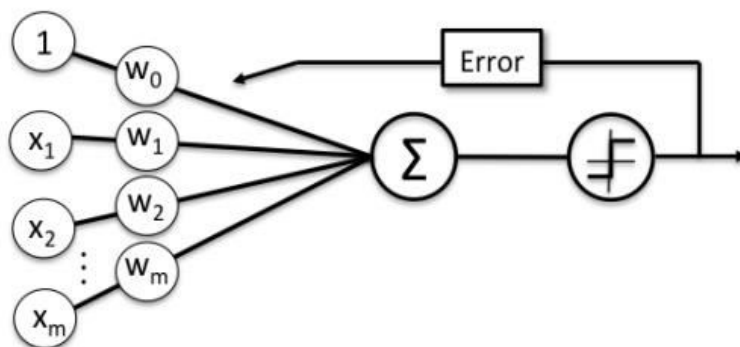


Fig. 38–Représentation du fonctionnement de l’algorithme de rétro propagation [46]

3. 8 MPPT à base de réseaux de neurones artificiels

Dans ce travail, le réseau de neurones développé (voir fig.39) utilise la vitesse v , la puissance P et la vitesse de rotation Ω comme des variables d’entrées, et le rapport $\frac{\Omega_{\min}}{\Omega_{\max}}$

Comme une variable de sortie dont Ω_{\min} et Ω_{\max} dans respectivement.

La vitesse de rotation mesurée et la vitesse de rotation maximale.

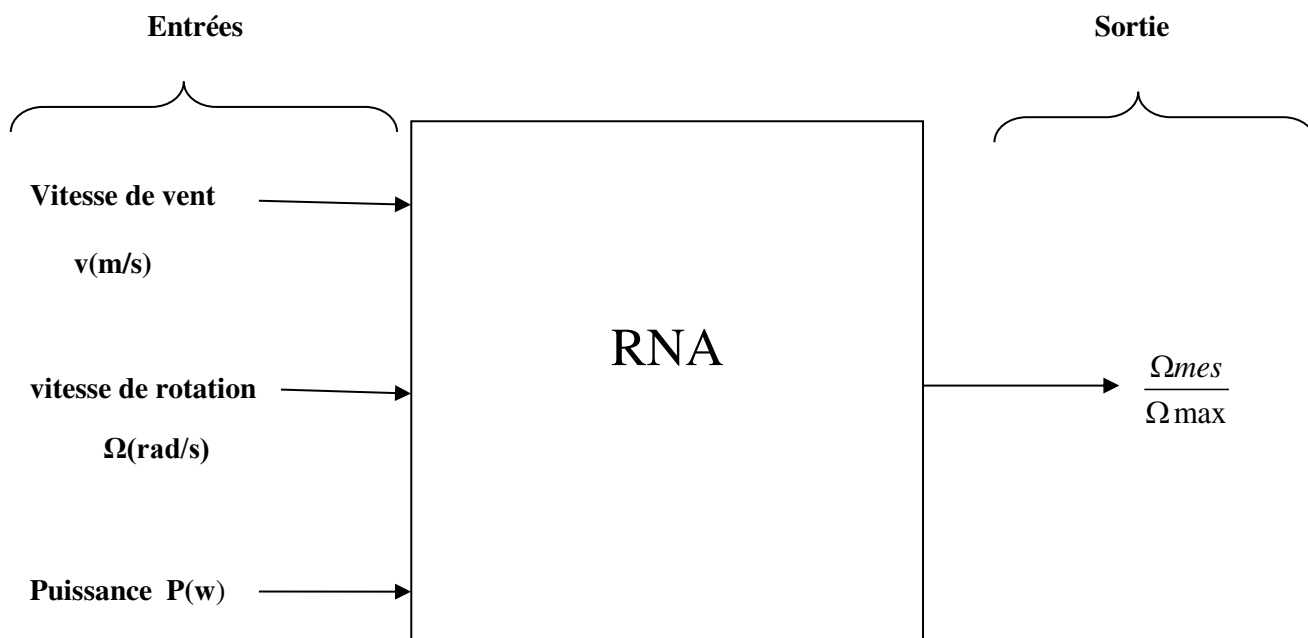


Fig. 39–Modèle de réseau de neurones développé.

A partir de la valeur $\frac{\Omega_{op}}{\Omega_{max}} = 0.6$ on peut calculer la vitesse de rotation optimale, en utilisant simplement

L'équation suivante [47].

$$\frac{\Omega_{op}}{\Omega_{max}} = 0.6 \quad (10)$$

Sur logiciel MATLAB, on peut facilement créer un réseau de neurone (voir fig11), en utilisant seulement le programme suivant, dont les texte situe après le signe pour cent (%) sont des commentaires.

```
p = [v Ω Pt]; % les vecteurs d'entrées
t = [Ω_mes/Ω_max]; % le vecteur de sortie
net = newff([-0.06 0.06;-0.01 0.2;-1 3],[15 1],{'tansig','purelin'},'traingdx'); % ici on crée le réseau de neurone.
Dont L'intervalle des données des poids utilisées est indiqué par
[-0.06 0.06;-0.01 0.2;-1 3]. C'est un réseau qui utilise la règle d'apprentissage par rétro-propagation. On
dispose deux couches. Une couche cachée avec 15 neurones qui ont une fonction de transfert tansig et une
couche de sortie avec un neurone qui a une fonction de transfert purelin
a = sim(net,p); %ici on simule de nouveau la sortie de réseau jusqu'à on obtient le résultat désiré
net.trainParam.epochs = 1000; % ici on entraîne le réseau en utilisant 500 itérations
net.trainParam.show = 5; % Époques entre les affichages
net.trainParam.goal = 1e-10; % l'erreur désiré d'obtenir entre les entrées et la sorties
net = train(net,p,t); % apprentissage de réseau de neurone
a = sim(net,p); %ici on simule de nouveau la sortie de réseau jusqu'à on obtient le résultat désiré
gensim(net,1); %créé un système Simulink contenant un bloc qui simule un réseau de neurones.
```

La figure 40 suivante représente le réseau utilisé :

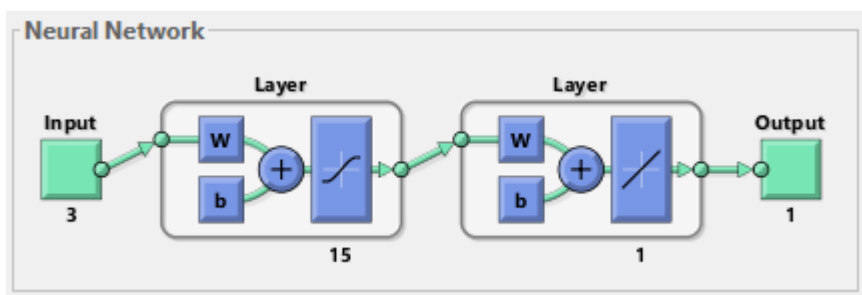


Fig. 40–L'architecture du réseau de neurone proposé.

4 Résultats de simulation :

La variation de l'erreur quadratique moyenne entre les sorties du RNA et leur données d'entrées en fonction du nombre d'itérations (epochs) est représentée par la figure 40 dont l'erreur finale obtenue est de $6.6403 \cdot 10^{-7}$.

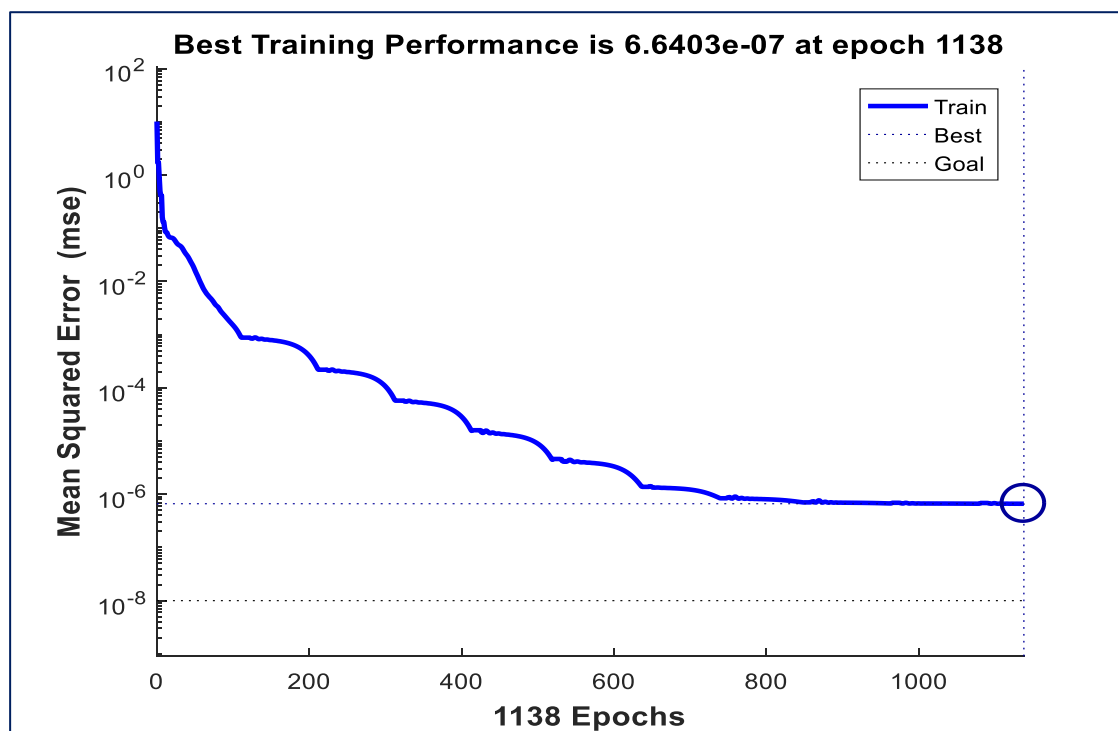


Fig. 41–Evolution de l'erreur quadratique moyenne lors de l'apprentissage.

Pour une variation rapide de la vitesse de vent figure 42, La figure 43, donne la courbe de la vitesse de rotation de l'éolienne optimisée par le dispositif MPPT à base de réseaux de neurones comparée à la courbe de la vitesse de rotation optimale trouvé sur la caractéristique puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'éolienne. Tandis que la variation de la puissance mécanique de l'éolienne avec l'utilisation d'un contrôleur MPPT est donnée par la figure 44.

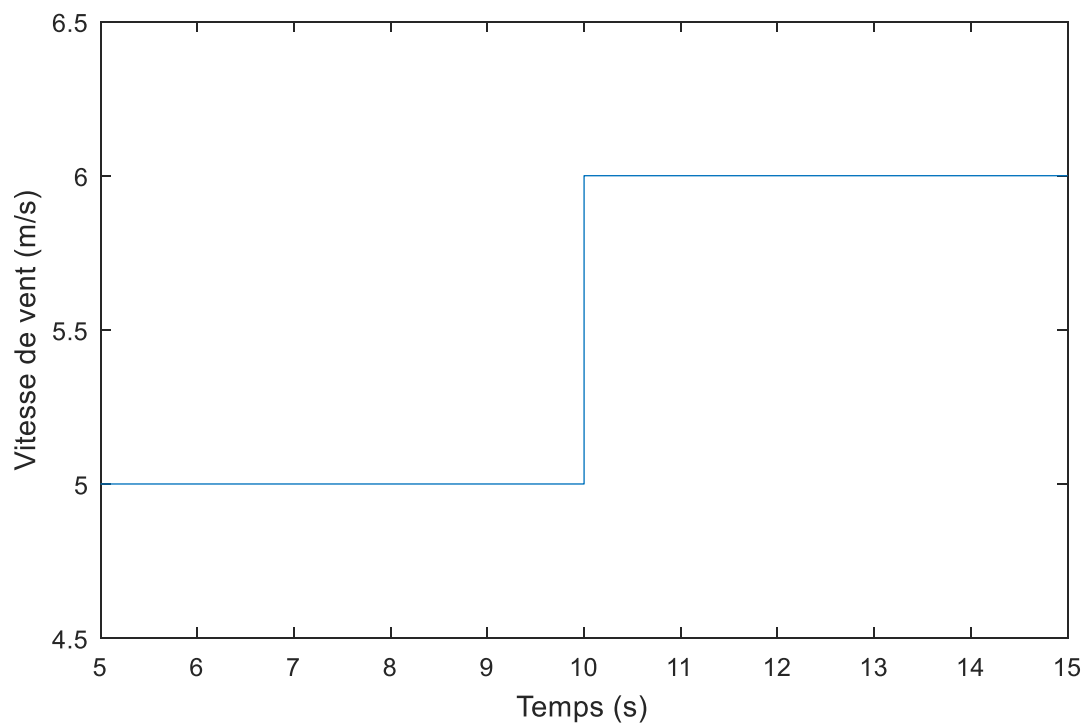


Fig. 42–La vitesse de vent

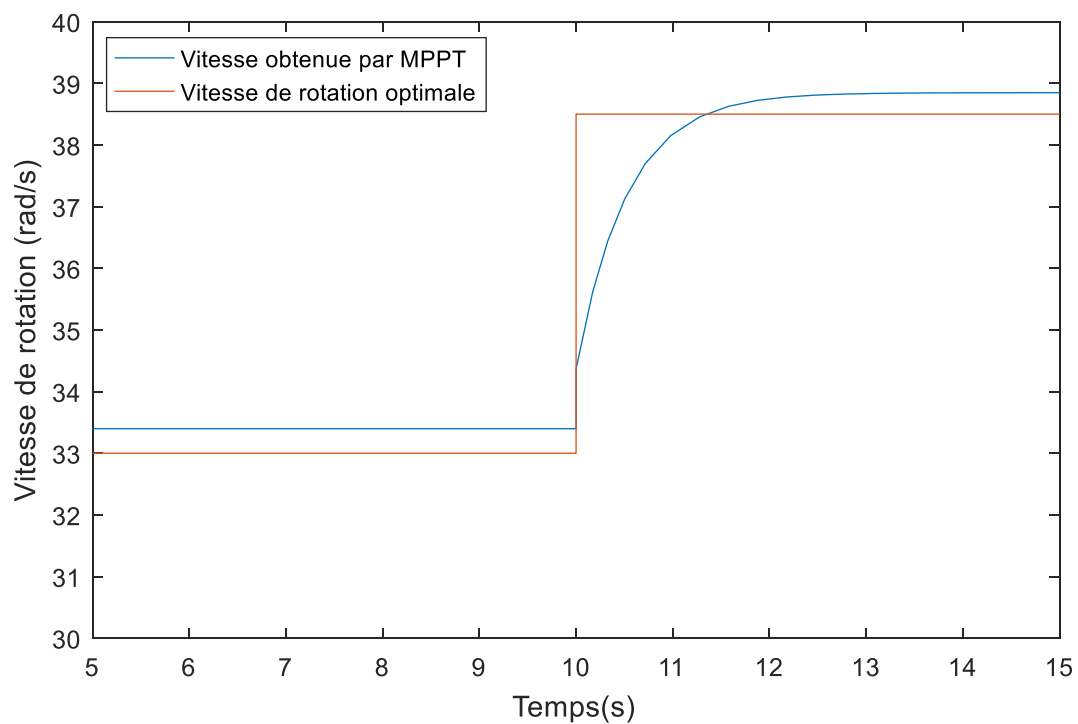


Fig. 43–Vitesse de rotation issue de la MPPT et vitesse optimale

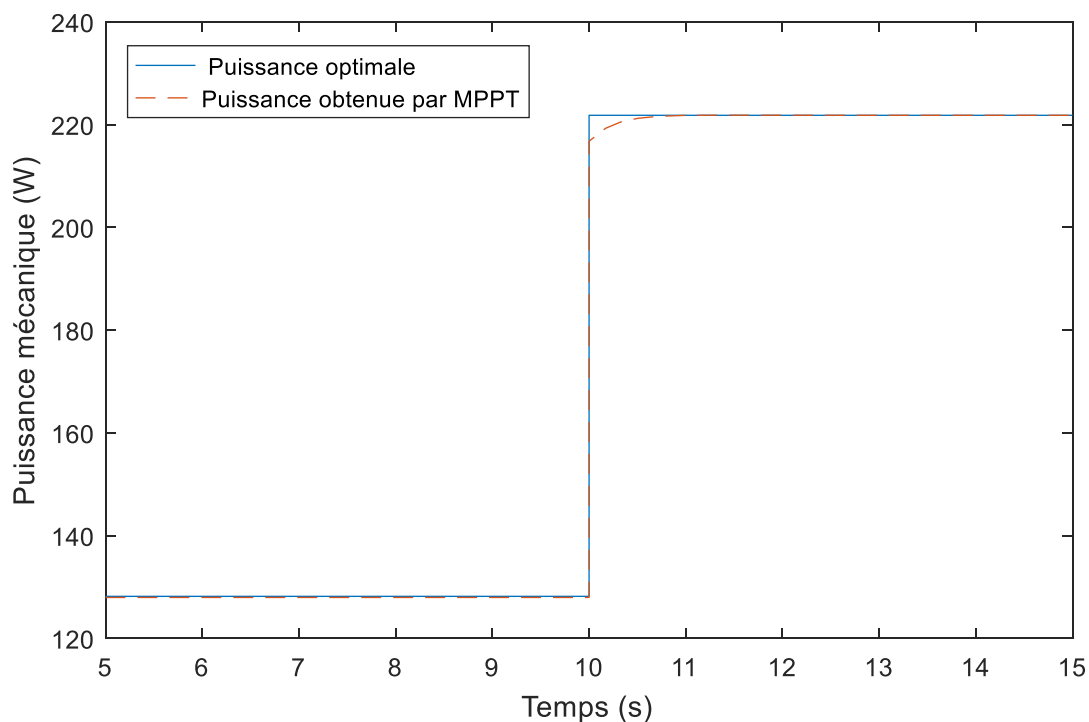


Fig. 44–Puissance optimale et maximisée par la MPPT.
(Réponse à un échelon de la vitesse du vent)

D'après les figures précédentes, les résultats de simulation obtenus montrent la robustesse du régulateur neuronal développé

5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la théorie des réseaux de neurones artificiels et la modélisation et la commande MPPT par réseaux de neurones artificiels d'une turbine éolienne à vitesse variable.

Les résultats obtenus montrant le bon comportement, l'efficacité et la robustesse du contrôleur proposé

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à l'étude de la modélisation et la simulation d'une turbine éolienne associée à un contrôleur de puissance (MPPT) à base des réseaux de neurones artificiels.

Dans le premier chapitre, une étude bibliographique sur les différents types d'énergies renouvelables est présentée.

Puis nous avons présenté, dans le deuxième chapitre, la modélisation et la simulation d'une turbine éolienne

Dans le troisième chapitre nous avons développé un contrôleur (MPPT) basé sur les réseaux de neurones, ce contrôleur est capable de prédire la vitesse de rotation optimale à partir de la vitesse de vent, la puissance et la vitesse de rotation de la turbine. L'avantage de cette méthode est qu'elle est efficace même dans le cas où la caractéristique (Puissance/Vitesse de rotation) de la turbine éolienne n'est pas connue. Les résultats obtenus montrant l'efficacité et la robustesse du contrôleur proposé.

Comme perspectives de ce travail nous avons pour but :

- D'améliorer le contrôleur MPPT étudié.
- d'introduire le contrôleur MPPT développée dans une carte d'arduino uno ou mega et utiliser dans une turbine éolienne réel

Bibliographie

- [1] Sadi Mohammed El Amine., 26/06/2014. L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV'', mémoire de Master (LMD) ,Université de Tahar Moulay Saïda ;
- [2] Ferrah Billel., 2015 .Etude d'un système Hybride (photovoltaïque –éolien), mémoire de Master, Université Badji Mokhtar Annaba ;
- [3] Khelfat Lotfi., juin 2017. Etude et simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone doublement alimentée, mémoire de master, Université Badji Mokhtar Annaba ;
- [4] Arthouros Zervos., 2019.RENE WABLES 2019, National Technical University of Athens (NTUA) ;
- [5] Atmania Hanane., 15 Janvier 2015. La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie, cas de la photovoltaïque, mémoire de Magister, Université d'Oran -2- Mohamed Ben Ahmed ;
- [6] Zidane Nourredine., 02/12 / 2014. Étude et Dimensionnement des Systèmes de Production d'Energies Renouvelables, mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas -Setif 1 ;
- [7] Ghenissa Hocine., 02 Juin 2014. Etude comparative de l'alimentation en électricité d'un site isole par voie classique et système photovoltaïque cas de Wilaya de Biskra Labrech-Tolga , mémoire de master, Université Mohamed Khider Biskra ;
- [8] Abdelhamid Lilia., 26/04/2012. Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens - évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement, mémoire magister, Université de Batna ;
- [9] Dr. Belaid Lalouni Sofia., 2015. Cours Energie Solaire Photovoltaïque, mémoire de Maître de Conférences Classe B, Université A.MIRA de Bejaia ;
- [10] Haloui Hafsia., 2017. Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à base de cellules solaires en couches minces. Thèse de doctorat, université d'Oum El Bouaghi ;
- [11] Le chauffe-eau solaire : solution efficace et innovante. <https://www.quelleenergie.fr/magazine/energie-solaire/chauffe-eau-solaire-solution-efficace-innovante-57261/>. 10/10/2020 ;
- [12] Olivier Farges., 2014. Conception optimale de centrales solaires à concentration : application aux centrales à tour et aux installations beam down , Ecole des Mines d'Albi-Carmaux ;
- [13] Kadraoui Hicham., 2011. etude comparative et rendement énergétique des différents degrés de concentration des convertisseurs thermodynamique de l'énergie solaire, memoire de magister, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables Ecole Doctorale « Energies Renouvelables » ;
- [14] Khadraoui Zakaria., 2017. Etude d'une centrale solaire thermique, mémoire master, université Badji Mokhtar Annaba ;
- [15] Quoilin Sylvai., mai 2017. Les Centrales Solaires à Concentration, cours, Université de Liège ;
- [16] Malki Mohssine., 26/06/2013. Etude d'une centrale thermodynamique solaire, mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid ;
- [17] Solaire thermique à concentration.
http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Solaire_thermique_à_concentration. 10/10/2020 ;

- [18] La géothermie, source naturelle d'énergie. <https://sites.google.com/site/energielageothermie/bilan>. 10/10/2020 ;
- [19] Ressources de la biomasse. <https://www.rncan.gc.ca/energie/sources-denergie-et-reseau-de-distribution/energies-renouvelables/systemes-de-bioenergie/ressources-de-la-biomasse/7390>. 10/10/2020 ;
- [20] Latreche Mohammed Tahar., 24 /06 /2012. Commande Floue de la Machine Synchrone Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien, mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif ;
- [21] Tarak Ghennam., 29/09/2011. Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation, thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lille ;
- [22] Eolienne verticale. <https://www.pinterest.com.mx/pin/629026272925114326/>. 10/10/2020 ;
- [23] Eolienne verticale pour particulier – Ooreka. <https://www.pinterest.fr/pin/836051118298496864/>. 10/10/2020 ;
- [24] Eolienne. <https://energieplus-lesite.be/techniques/eolien6/eoliennes/>. 10/10/2020 ;
- [25] Rendement des éoliennes. <https://energieplus-lesite.be/theories/eolien8/rendement-des-eoliennes/>. 10/10/2020 ;
- [26] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S., 20 October 2006. Dynamic modelling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system. Journal of Power Sources Volume 161, Issue 1, pp.707-722;
- [27] F. Giraud, ZM. Salameh., March 2001 . Steady-state performance of a grid-connected rooftop hybrid wind photovoltaic power system with battery storage. IEEE Transactions on Energy Conversion Volume 16 , Issue 1, pp. 1-7;
- [28] HX. Yang, L. Burnett, J. Lu., September 2003. Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong. Renew Energy Volume 28, Issue 11, pp. 1813-1824 ;
- [29] TF. El-Shater, M. Eskander, M. El-Hagry., July 29–August 2, 2001 . Hybrid pv/fuel cell system design and simulation. In: 36th intersociety energy conversion engineering conference, Savannah, Georgia;
- [30] C. Saudemont, L. Leclercq, B. Robyns, G. Cimuca, M.M. Radulescu., December 2004. Développement d'un Émulateur Temps Réel d'un Système de Génération Eolienne Associé à un Stockage Inertiel d'Énergie. Revue de l'Electricité et de l'Electronique – REE, No. 11, ISSN 1265-6534, pp. 49-59, France ;
- [31] Aoued Meharrar., 2012. Modélisation, Optimisation et Contrôle des Systèmes Hybrides : Eolienne/Pile à combustible, mémoire de doctorat, USTO ;
- [32] Hassini née belghitri houda., 2010. Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolienne-photovoltaïque, mémoire de magister. Université abou-bakrbelkaid de Tlemcen ;
- [33] L'énergie éolienne. <https://www.domsweb.org/ecolo/eolien.php>. 10/10/2020
- [34] G-O. Cimuca., 2005.Système inertiel de stockage d'énergie associe a des générateurs éoliens, Thèse de doctorat. L'École Normale Supérieur d'Arts et Métiers. Centre de lille ;
- [35] O. Gergqud, B. Multon, H. Benahmed., 14-15 November 2001. Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance, Electrotechnique du Futur 2001 – Nancy , France. pp.17-22 ;

- [36] B.Sareni, A.Abdelli, X.Roboam, D.H. Tran.,2009 .Model simplification and optimization of a passive wind turbine generator, *Renewable Energy*, Vol.34, pp. 2640-2650;
- [37] A. Mirecki., 5 avril 2005 .Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse de doctorat. L 'Institut National Polytechnique de Toulouse ;
- [38] Adam MIRECKI., 5 avril 2005. Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse ;
- [39] A.mireck.,5 avril 2005.Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance , Thèse de doctorat. D'institut national polytechnique de Toulouse ;
- [40] Mr. Benyahia hamidi Riadh , Mr. Ben besekri Abdelkarim., 2018/2019. Commande d'une Eolienne basée sur les modèles Flou de Takagi-Sugeno, mémoire de master. Université Djilali Bounaama Khemis Miliana ;
- [41] Said Azzouz.,06/11/2019. Amélioration de La commande d'un Système Eolien à Base d'une Machine Mada Utilisant les Techniques Intelligentes,Thèse de doctorat.Université Mohamed Boudiaf - M'sila ;
- [42] Mr. FERGANE Salem., 2012/2013.Commande MPPT d'un Aérogénérateur basée sur des observateurs neuro-flou,thèse de master.Université Abderrahmane Mira Bejaia ;
- [43] Mohamed Yessin AMMAR., 17 juillet 2007.Mise en œuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu, Thèse de doctorat. L'institut national polytechnique de Toulouse ;
- [44] djeriryoucef.,05 /11/2015.Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle, thèse de doctorat. université djillalili abes de sidi-bel-abbesFaculté de Technologie ;
- [45] Mina kalakh., mars 2013. Modélisation avec les réseaux de neurones d'un canal UWB dans un environnement minier souterrain, mémoire d'ingénieur. Université du québec en abitibi-témiscamingue
- [46] flávio barreiro lindo., 2 juillet 2018. Interprétation d'images basée sur la technologie des réseaux de neurones, Travail de Bachelor réalisé en vue de l'obtention du Bachelor HES. Haute École de Gestion de Genève (HEG-GE) ;
- [47] Aoued Meharrar, Mustapha Hatti., 2017.Wind Maximum Power Point Prediction and Tracking Using Artificial Neural Network and Maximum Rotation Speed Method, *International Conference in Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems*;

Résumé

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et la simulation d'une éolienne à axe horizontale et à vitesse variable, avant d'aborder à cette modélisation une étude bibliographique sur les différents types d'énergies renouvelables et leurs principes de fonctionnement ont été présentés.

Ensuite, un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking) basé sur les réseaux de neurones artificiels a été développé afin d'optimiser le fonctionnement de la chaîne de conversion éolienne à vitesse variable.

Les résultats obtenus montrant l'efficacité et la robustesse du contrôleur MPPT proposé.

Mots clefs : Modélisation, éolienne, MPPT, Réseaux de neurones artificiels.

ملخص

يتعلق العمل المقدم في هذه المذكرة بنمذجة ومحاكاة توربين رياح ذو محور أفقي وسرعة متغيرة، قبل التطرق لهذه النمذجة قمنا ببحث حول مختلف أنواع الطاقات المتجددة مع ذكر مبدا عملها.

بعد ذلك قمنا بتطوير وحدة تحكم MPPT (الحد الأقصى لتتبع نقاط الطاقة) باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية وذلك من أجل تحسين عمل سلسلة تحويل طاقة الرياح.

النتائج المتحصل عليها تظهر كفاءة ومثانة وحدة تحكم MPPT المقترحة.

الكلمات المفتاحية: النمذجة ، توربينات الرياح ، MPPT ، الشبكات العصبية الاصطناعية.

Abstract

The work presented in this thesis relates to the modeling and simulation of horizontal axis and variable speed wind turbines, before approaching this modeling by a bibliographical study on the different types of renewable energies and their operating principles.

Then, an MPPT (Maximum Power Point Tracking) controller was developed based on artificial neural networks in order to improve the functioning of the chain of transmission of wind energy at variable speed.

The results obtained show the efficiency and durability of the proposed MPPT controller.

Keywords: Modeling, wind turbine, MPPT, Artificial neural networks.

