

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : D'ELECTRONIQUE
N° : 2019/ ESEM /



DOMAINE : Sciences et Technologies
FILIERE : Électronique
OPTION : Electronique du Système Embarqué

Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Par: BEN AMOR Rodouane

et

BEN BACHIR Ahmed Lamine

Intitulé

**Systeme De Prédiction De Vitesse
Du Vent Base Sur Les Réseaux
Neurones Profonds**

Soutenu devant le jury composé de:

M^{er}. BRIK Youcef

M^{er}. Mezaache Hatem

M^{er}. DJERIOUI Mohamed

Université de M'SILA

Université de M'SILA

Université de M'SILA

Président

Rapporteur

Examineur

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

*En premier lieu, nous remercions **ALLAH** de nous avoir aidé et donné la force et la volonté pour achever ce modeste travail.*

*Par la suite, nous remercions notre encadrant Monsieur **Mezaache Hatem**, son précieux conseil et son aide durant toute la période de travail. Il s'est beaucoup investi pour que ce travail soit un succès espéré.*

*Nous remercions également Monsieur **Brik Youcef**, qui nous a présenté un coup de main pour compléter ce mémoire.*

Nos sincères remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger ce travail.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'Electronique qui ont contribué à notre formation.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicace

Je Dédie ce travail

A

*Les deux êtres les plus chères au monde
les bougies qui m'ont toujours guidé vers le bon chemin :
Ma mère, la lumière de ma vie, qui a tout fait pour
ma réussite et mon bonheur.*

*Mon père, à lui, je dois offrir tout le respect et
l'amour pour son soutien et sa tendresse.*

A mes chers frères et sœurs.

A Toute la famille.

A tous mes enseignants.

A Tous mes amis.

BENAMOR Rodouane

Dédicace

Je Dédie ce travail

A

*Les deux êtres les plus chères au monde
les bougies qui m'ont toujours guidé vers le bon chemin :
Ma mère, la lumière de ma vie, qui a tout fait pour
ma réussite et mon bonheur.*

*Mon père, à lui, je dois offrir tout le respect et
l'amour pour son soutien et sa tendresse.*

A mes chers frères et sœurs.

A Toute la famille.

A tous mes enseignants.

A Tous mes amis.

BENBACHIRE Ahmed elamine

Table des matières

Liste des figures	v
Liste des tableaux :.....	vi
Liste des abréviations :.....	vii
Introduction générale :.....	1

CHAPITRE I

Généralités Sur Les Systèmes Eoliens

I.1. Introduction :.....	4
I.2 Historique de l'éolien :.....	4
I.3 Données Chiffrées Sur L'éolien :.....	5
I.3.1 Développement de l'énergie éolienne :.....	5
I.3.2 Production mondiale d'énergie éolienne :.....	6
I.3.3 Energie éolienne en monde jusqu'a 2020 :.....	6
I.3.4 Capacité mondiale de production d'énergie éolienne dans le monde :.....	7
I.3.5 Energie éolienne en Algérie :.....	7
I.3.5.1 Répartition régionale de la vitesse du vent :.....	7
I.3.5.2 production et l'historique d'énergie éolienne en Algérie :.....	8
I.4 Représentation d'une éolienne :.....	9
I.4.1. Définition de l'énergie éolienne :.....	9
I.4.2 Principales composantes d'éolienne :.....	10
I.4.3 Fonctionnement d'une éolienne :.....	12
I.4.4 Classement des turbines éoliennes :.....	13
I.4.4.1 Eolienne à axe vertical :.....	13
I.4.4.2 Eoliennes à axe horizontal :.....	15
I.4.4.3 Eoliennes lentes :.....	16
I.4.4.4 Eoliennes rapides :.....	17
I.4.5 Fonctionnement d'une Pale d'éolienne :.....	18
I.5 Conversion de l'énergie éolienne :.....	18
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :.....	19
I.7 Caractérisation du Vent :.....	20

I.7.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent :.....	20
I.7.2 Histogramme des vitesses de vent :.....	21
I.7.3 Influence de la hauteur :.....	22
I.8 Stratégies de commande de la turbine :.....	23
Conclusion :.....	24

CHAPITRE II

Les Réseaux De Neurones Artificiels et Profonds

II.1. Introduction :.....	25
II.2 Réseaux de neurones artificiels (RNA) :.....	25
II.2.1 Origine :.....	25
II.2.2 Neurone biologique :.....	27
II.2.3 Neurone formel :.....	28
II.2.4 Fonction d'activation :.....	28
II.2.5. Caractéristiques d'un réseau de neurones :.....	30
II.2.6. Principe de fonctionnement :.....	30
II.3 L'apprentissage en profondeur (Deep Learning):	31
II.4 Définition:	32
II.5 Exemples d'application de Deep Learning:.....	32
II.6 Les différentes Architectures du Deep Learning:.....	32
II.6.1 Réseaux de neurones convolutionnels:.....	32
II.6.1.1 Architecture globale de CNN:	33
II.6.1.2 Couche convolutive:.....	34
II.6.1.3 Couche de Pooling:.....	34
II.6.1.4 Couche totalement connectée :.....	35
II.6.1.5 Couche de correction (Relu) :.....	35
II.6.2 Les réseaux neuronaux récurrents(RNN).....	35
II.6.2.1 Long Short-Term Memory (LSTM) :.....	36
II.7 Conclusion : :.....	38

CHAPITRE III

Résultats De Simulation et Discussion

III.1. Introduction :	39
III.2 Présentation de la base de données:	39
III.2.1 Caractéristiques des sites:	39
III.3 Prédiction de la vitesse du vent par les RNA et RNP	40
III.3.1 Critères d'évaluations	40
III.3.1.1 Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE	40
III.3.1.2 Erreur Quadratique Moyenne:	41
III.3.1.2 Erreur Moyenne de Pourcentage Absolue (MAPE)	41
III.4 Résultats de simulation:	41
III.4.1 La prédiction de la vitesse du vent pour site Connecticut :	42
III.4.1.1 Prédiction par le réseau de neurone Profond type LSTM :	42
III.4.1.2 Prédiction par le réseau de neurone type MLP :	44
III.4.2 La prédiction de la vitesse du vent pour le site Colorado :	47
III.4.2.1 Prédiction par le réseau de neurone Profond type LSTM:	47
III.4.2.2 Prédiction par le réseau de neurone type MLP :	49
III.5. Conclusion :	52
Conclusion générale:	53
Bibliographié :	54
Résumé	
Abstract	

ملخص

LISTE DES FIGURES

❖ Chapitre I: Généralités sur les systèmes éoliens

Figure I.1 Capacité éolienne cumulée en GW dans le monde de 1996 à 2014	5
Figure I.2 Energie éolienne mondiale (MW)	6
Figure I.3 Production d'énergie éolienne dans le monde en 2013	7
Figure I.4 Régions ventées en Algérie	8
Figure I.5 Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés	8
Figure I.6 1 ^{er} ferme éolienne en Algérie d'Adrar	9
Figure I.7 Conversion de l'énergie cinétique du vent	10
Figure I.8 Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur	10
Figure I.9 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW	11
Figure I.10 Schéma d'une éolienne Enercon à entraînement direct	12
Figure I.11 Technologie éolienne à axe vertical	13
Figure. I.12 Schéma de principe du rotor de Savonius	14
Figure I.13 Schéma du rotor de Darrieus	15
Figure I.14 Technologie éolienne à axe horizontale.....	15
Figure I.15 Types d'éoliennes à axe horizontal	16
Figure I.16 Principe de la conversion de l'énergie éolienne	18
Figure I.17 Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an	20
Figure I.18 Variations des vitesses moyennes du vent sur 20 ans	21
Figure I.19 Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp.....	21

❖ Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels et profonds

Figure II.1 Chronologie des évènements les plus marquants de l'apprentissage profond .	26
Figure II.2 Neurone biologique	27
Figure II.3 Modèle d'un neurone formel	28
Figure II.4 Propagation de l'influx nerveux dans un réseau de type perceptron.....	31
Figure II.5 La relation entre l'intelligence artificielle, le ML et le Deep Learning.....	31
Figure II.6 Réseau Neuronal Convolutif.....	33
Figure II.7 Architecture simple de CNN.....	33
Figure II.8 Max pooling.....	34
Figure II.9 Une chaîne de cellules LSTM	36

❖ Chapitre III : Résultats de simulation et discussion

Figure III.1 Les courbes de la base de données pour les deux sites.....	40
Figure III.2 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 50 unités cachées site Connecticut.....	42
Figure III.3 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 100 unités cachées site Connecticut.....	43
Figure III.4 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 150 unités cachées site Connecticut.....	43
Figure III.5 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 200 unités cachées site Connecticut.....	44
Figure III.6 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 1 couche cachée site Connecticut.....	45
Figure III.7 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 2 couche cachées site Connecticut	45

Figure III.8 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 3 couche cachées site Connecticut.....	46
Figure III.9 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 4 couche cachées site Connecticut.....	46
Figure III.10 Courbe comparaison valeurs réels et prédites par la technique LSTM pour 50 unit cachée site Colorado.....	47
Figure III.11 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 100 unités cachées site Colorado.....	48
Figure III.12 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 150 unités cachées site Colorado.....	48
Figure III.13 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 200 unités cachées site Colorado.....	49
Figure III.14 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 1 couche cachée site Colorado.....	50
Figure III.15 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 2 couches cachées site Colorado.....	50
Figure III.16 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 3 couches cachées site Colorado.....	51
Figure III.17 Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 4 couches cachées site Colorado.....	51

LISTE DES TABLEAUX

❖ Chapitre I: Généralités sur les systèmes éoliens

Tableau I.1 Découpage fonctionnel de l'installation	13
Tableau I.2 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical..	16
Tableau I.3 Classification des turbines éoliennes	18
Tableau I.4 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement	22
Tableau I.5 les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur	23

❖ Chapitre II : Les réseaux de neurones artificiels et profonds

Tableau II.1 Fonction de transfert	30
---	----

❖ Chapitre III : Résultats de simulation et discussion

Tableau III.1 Caractéristiques géographiques du site Colorado1763.....	39
Tableau III.2 Caractéristiques géographiques du site Connecticut-6869.....	39
Tableau III.3 Résultats des valeurs de critères RMSE, R pour le site Connecticut.....	42
Tableau III.4 Résultats des valeurs de critères RMSE, R pour le site Connecticut	44
Tableau III.5 Résultats des valeurs de critères RMSE, R pour le site Colorado	47
Tableau III.6 Résultats des valeurs de critères RMSE, MSE pour le site Colorado	49

ABREVIATIONS ET NOTATIONS

RNA: Réseau de Neurones Artificiels

RNP: Réseau de Neurones Profonds

ML: Machine Learning

DL: Deep Learning

RN : Réseaux de Neurones

CNN: Convolutional neural network

MNIST: Mixed National Institute of Standards and Technology

NORB : Nyu Object Recognition Benchmark

CIFAR: Canadian Institute For Advanced Research

ANN: Artificial Neural Network

RELU : Rectified Linear Unit

RNN : Recurrent Neural Network

LSTM : Long Short-Term Memory

P : La puissance étant exprimée en Watts,

V : vitesse du vent

D : la diamètre

h : la hauteur

x_i : les entrées du réseau

w_i : les poids synaptiques

y_i : la sortie du réseau

f : fonction de seuillage

b : La biais

F(x) : La fonction ReLu

h_{t-1} :La sortie a l'instant t-1

x_t : l'entrée couant a l'instant t

b : C'est le bais

w : C'est le poids

σ : C'est la fonction sigmoïde

***INTRODUCTION
GENERALE***

INTRODUCTION GENERAL

A cause de l'augmentation rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins chers, la demande mondiale d'énergie a augmenté rapidement, ceci à poser un problème dans le monde entier qui est: comment répondre à la demande des besoins énergétique dans le monde? Cette augmentation se traduit, en réalité, avec la croissance du prix du l'Or Noir qui représente la source la plus importante de l'énergie. La réserve mondiale du pétrole diminue de plus en plus et il n'y aura pas assez du pétrole pour couvrir la demande [1]. L'énergie nucléaire n'est pas disponible pour tout le monde pour des raisons politiques ou financières, son installation coûte cher comme elle peut être dangereuse au niveau écologique.

L'utilisation des ressources conventionnelles est alors limitée et n'est pas encouragée pour des raisons liées à l'environnement. Le recours à d'autres types de ressources d'énergie dites renouvelables est donc inévitable et devient plus qu'une nécessité pour le progrès de l'humanité.

En particulier, parmi toutes les ressources renouvelables possibles (biomasse, soleil, vent, houle,... etc.). Le vent est une source d'énergie libre, propre, et inépuisable. Il a servi l'humanité bien pendant beaucoup de siècles en propulsant des bateaux et en conduisant les moulins à vent pour broyer les grains et de pomper de l'eau. Le Danemark était le premier pays qui a servi de la puissance du vent pour la génération de l'électricité [2].

Les Danois utilisaient une turbine de vent de diamètre de 23m en 1890 pour produire de l'électricité. A partir des années 1910, plusieurs centaines d'unités des capacités de 5 à 25 kilowatts étaient en fonction au Danemark. L'énergie éolienne devient de plus en plus une source significative d'énergie, elle est aujourd'hui l'énergie la plus accessible en termes de technologie et de coûts et est appelée à prendre une place très importante parmi toutes les énergies exploitables par l'homme [3].

Quel est L'origine du vent ?

L'origine du vent est complexe. On peut cependant dégager 2 phénomènes prédominants :

- ✓ La Terre est chauffée par le Soleil. De part de la nature même du mouvement terrestre, les pôles reçoivent moins de chaleur que l'équateur.

- ✓ Les terres émergées se réchauffent (et refroidissent) plus vite que ne le font les mers et les océans.

L'énergie éolienne pour quoi faire ?

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de notre activité, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel [4].

Ainsi l'homme a souvent besoin d'énergie électrique dans des proportions faibles ou importantes selon l'utilisation qu'il a faite :

- ✓ Pour faire fonctionner des stations météo ou toutes autres installations électriques isolées à faible consommation, une éolienne de petite taille peut fournir cette énergie tout au long de l'année.
- ✓ Pour alimenter en éclairage des maisons ou villages dans des contrées isolées exposées au vent, des installations d'éoliennes de quelques mètres de diamètres sont choses courantes.

Pourquoi prédire la vitesse du vent ?

La prédiction de la vitesse du vent permet le contrôle et la gestion du réseau en connaissant la quantité d'énergie produite, la protection du système des grandes vitesses et la détermination de la possibilité de construire des centrales éoliennes dans un site en connaissant son potentiel.

L'objectif principal des systèmes de production d'énergie devrait être répondre à tout moment à la demande d'énergie tout en minimisant les impacts environnementaux associés. Ceci nécessite de développer des formes propres d'énergie, tout en s'assurant la cohérence et la fiabilité de leur approvisionnement et leur utilisation.

Dans ce mémoire, nous proposons un système de prédiction basé sur un type des Réseaux de Neurones Profond qui est: Long Short-Term Memory(LSTM) pour la prédire la vitesse du vent, notre système proposé est comparé avec un autre système de prédiction de la vitesse du vent basé sur les Réseaux de Neurones Artificiels de type (MLP).

Ce mémoire est réparti comme suit une Introduction générale, trois chapitres et à la fin une conclusion générale.

Dans le premier chapitre, nous donnons des généralités sur l'énergie et l'énergie renouvelable par la suite une définition de l'énergie éolienne, les différents types d'aérogénérateurs et les catégories des éoliennes, nous présentons aussi l'architecture et les principaux composants d'une éolienne. une conclusion est présente à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré pour une présentation des Réseaux de Neurones Artificiels où nous allons donner des généralités et quelques types fameux comme le MLP par la suite nous donnons des généralités sur le Réseaux de Neurones Profonds. Où nous allons présenter des Réseaux Neurones Profonds comme les réseaux de type CNN et les réseaux de type LSTM. Ce chapitre se termine aussi par une conclusion.

Le fruit de notre travail est le troisième chapitre où on présentera les résultats de simulation par MATLAB pour deux systèmes de prédiction de la vitesse du vent où le premier est basé sur un RNP de type LSTM or le deuxième est basé sur un RNA de type MLP dont les données utilisées en simulation sont réelles qui sont deux sites Colorado et Connecticut qui se trouvent en USA et nous faisons une comparaison entre les deux systèmes de prédiction proposé, notre chapitre se termine avec une conclusion. A la fin nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

Généralités Sur Les Systèmes Eoliens

I.1 Introduction :

L'énergie éolienne, c'est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent, c'est aussi une énergie cinétique produite par l'air en mouvement. C'est une des formes d'énergies renouvelables. L'énergie éolienne tire son énergie du soleil [5].

L'utilisation des systèmes éoliens pour la production d'électricité est une solution pour satisfaire les besoins en électricité dans un site isolé est assez bien venté. De tel système présente plusieurs avantages du fait de sa flexibilité et sa fiabilité [6].

L'électricité produite par les éoliennes est utilisée pour les circuits de charge de batterie, les systèmes de production d'énergie résidentiels, les systèmes de production distribuée, et les grands réseaux de services publics. Les différents éléments des éoliennes sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La quantité d'énergie éolienne potentielle dépend de la vitesse du vent, en effet plus la vitesse du vent sera élevée, plus la quantité d'énergie produite sera élevée. Elle dépend aussi de plusieurs facteurs tels que l'altitude, le lieu, la température de l'air et les caractéristiques de la surface terrestre [5].

Dans ce premier chapitre, nous présentons un rappel théorique concernant L'énergie éolienne. En premier lieu, présentation d'une éolienne avec des données chiffrées, une brève description des composants principales d'une éolienne les plus employés dans le aérogénérateur, le principe de fonctionnement. Ensuite, nous passons aux types d'éoliennes les plus utilisées dans les applications dédiées aux conversion de l'énergie et aussi les avantages et inconvénients de chacune de ces types des éoliennes.

Enfin, nous présentons les caractérisation du vent et les stratégies de commande de la turbine. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

I.2 Historique de l'éolien :

Depuis l'Antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique. Historiquement, on note que c'est en 1888 qu'un certain Charles F. Brush construit une grande éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est mise au point par le Danois Poul Lacour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. Dans les

années suivantes, il crée l'éolienne Lykkegard, dont il vend soixante-douze exemplaires en 1908.

En France, une éolienne expérimentale de 800 kVa était mise en fonctionnement de 1955 à 1963, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.

Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1 000 kW furent testées par EDF à SaintRémy-des-Landes. Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour que le Danemark relance les activités dans les installations d'éoliennes [6][7].

I.3 Données Chiffrées Sur L'éolien :

I.3.1 Développement de l'énergie éolienne :

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier. Ceci est principalement dû à deux raisons :

- Produire une énergie propre;
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

La capacité éolienne cumulée en GW dans le monde de 1996 à 2014 est donné dans la Figure I.1.

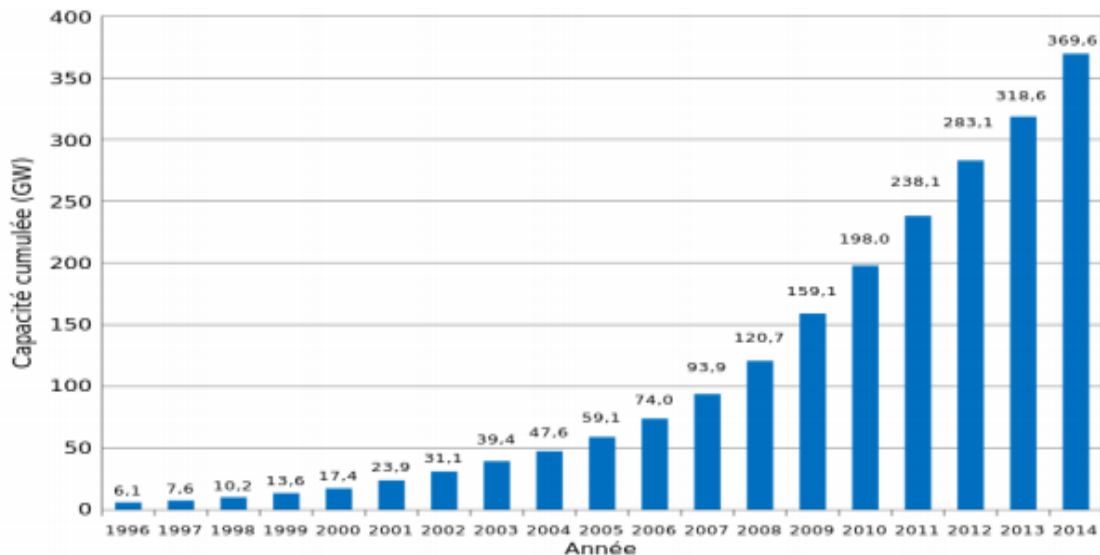


Figure I.1 Capacité éolienne cumulée en GW dans le monde de 1996 à 2014 [8].

À la fin 2014, le total mondial de la puissance éolienne installée atteignait 369.6 GW, en augmentation de 51.5 GW en un, La Chine a installé à elle seule 23.35 GW, soit 45.2 % du total 2014, et représente 31 % du parc mondial fin 2014.

I.3.2 Production mondiale d'énergie éolienne :

La capacité éolienne installée dans le monde est de 318 GW fin 2013, et devrait augmenter de plus de 400% et atteindre 1.107 GW en 2030. La puissance éolienne installée dans le monde devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025 et le marché mondial de l'éolien devrait plus que doubler au cours de cette période, passant de 21 à 47 milliards € [9].

I.3.3 Energie éolienne en monde jusqu'a 2020 :

Sur la base de l'expérience et des taux de croissance des années passées prévoie que l'énergie éolienne continuera son développement dynamique dans les années à venir. Malgré les impacts à court terme de la crise financière actuelle qui rendent difficile les prévisions à court terme, on peut attendre, qu'à moyen terme, l'énergie éolienne attirera les investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable. De plus en plus de gouvernements comprennent les bénéfices multiples de l'énergie éolienne et mettent en place des politiques favorables, incluant la promotion des investissements décentralisés par des producteurs indépendants, petits, moyens ou basés sur des communautés, tous ouvrant la voie vers un système de production d'énergies davantage renouvelables pour le futur. En calculant rigoureusement et en prenant en compte des facteurs d'insécurité, on estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale.

En 2015, une capacité totale de 600 000 MW est possible. Fin 2020, au moins 1500 000 MW peuvent être attendus (Figure I.2) [8].

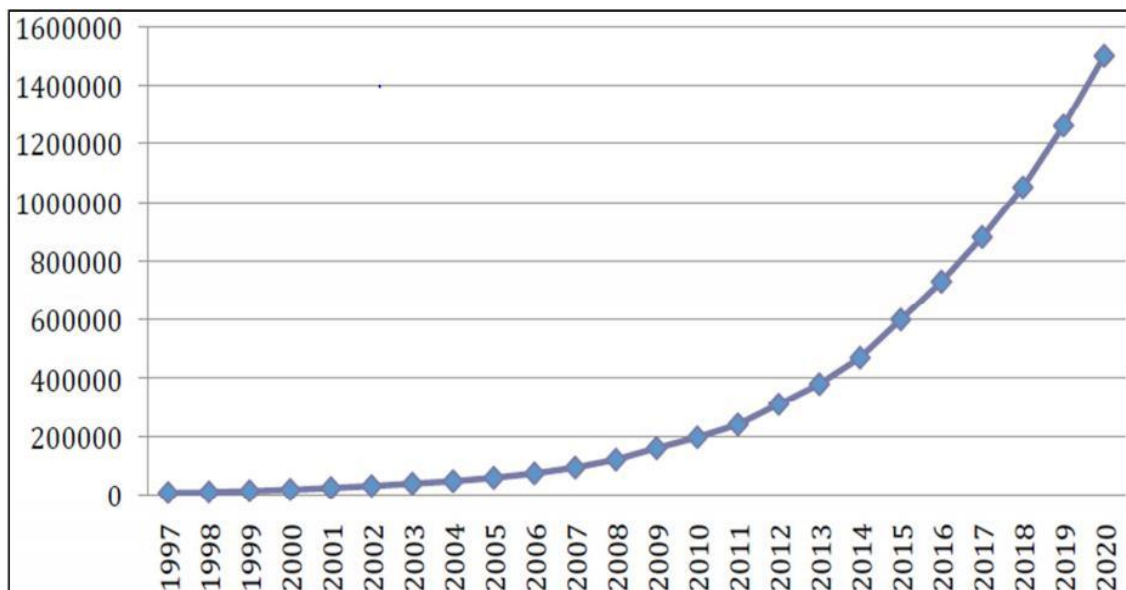


Figure I.2 Energie éolienne mondiale (MW) [8].

I.3.4 Capacité mondiale de production d'énergie éolienne dans le monde :

Les chiffres les plus actuelles concernant la capacité mondiale de production d'énergie éolienne datent de 2013. C'est 318.137 MW. En 2015, la capacité mondiale augmenta de 12,5% et de 10,3% en Europe pour atteindre 318.137 MW fin 2013 (Figure I.3). (soit +35.467 MW en 2013) et l'équivalent de 227 réacteurs nucléaires EPR! (source GWEC -conseil Mondial pour l'Energie Eolienne).

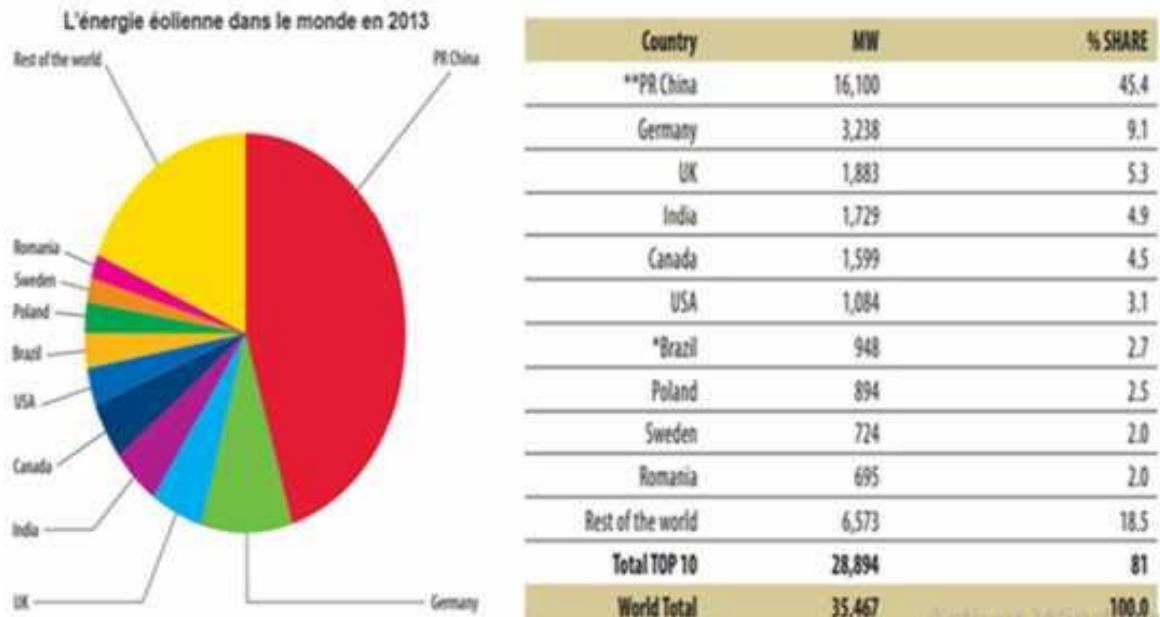


Figure I.3 Production d'énergie éolienne dans le monde en 2013 [9].

I.3.5 Energie éolienne en Algérie :

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés en 1984, suivis en 1985, en 1990, en 1994 et 2002 [10].

I.3.5.1 Répartition régionale de la vitesse du vent :

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. (La Figure I.4) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d' Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie).

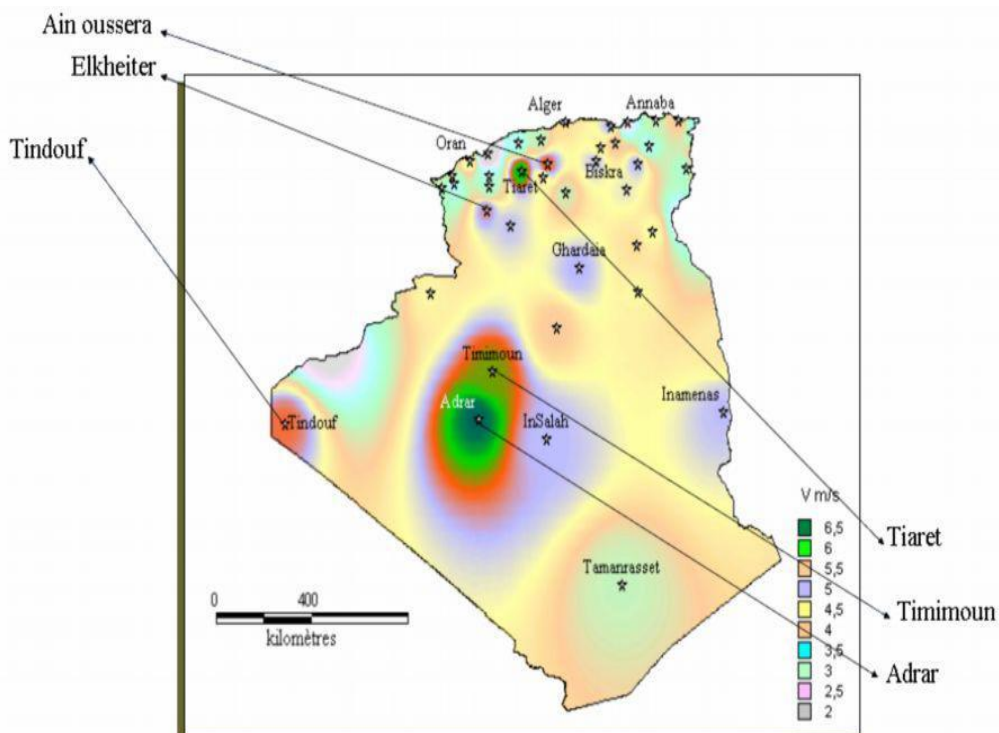


Figure I.4 Régions ventées en Algérie [10].

D’après les données du CDER, (la Figure I.5) indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.



Figure I.5 Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés [10].

I.3.5.2 production et l’historique d’énergie éolienne en Algérie :

En ce qui concerne l’Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d’un endroit à un autre.

Ceci est dû à une topographie et un climat diversifiés. Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said et all, [11] en 1984, suivis par

Benssad, en 1985, [12], Hammouche, en 1990 [13], Kasbadji Merzouk en 1994 [14] et F. Youcef Ettoumi en 2002, [6]. Après plus d'une année de retard, l'Algérie a mis en service sa première ferme éolienne en Adrar, qui doit servir de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420MW à l'horizon 2024. La ferme éolienne d'Adrar constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya. Cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien (Figure I.5) [16].



Figure I.6 1^{er} ferme éolienne en Algérie d'Adrar

I.4 Représentation d'une éolienne :

I.4.1 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle

alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [16].

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'hélice d'une éolienne entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique ou électrique [17].

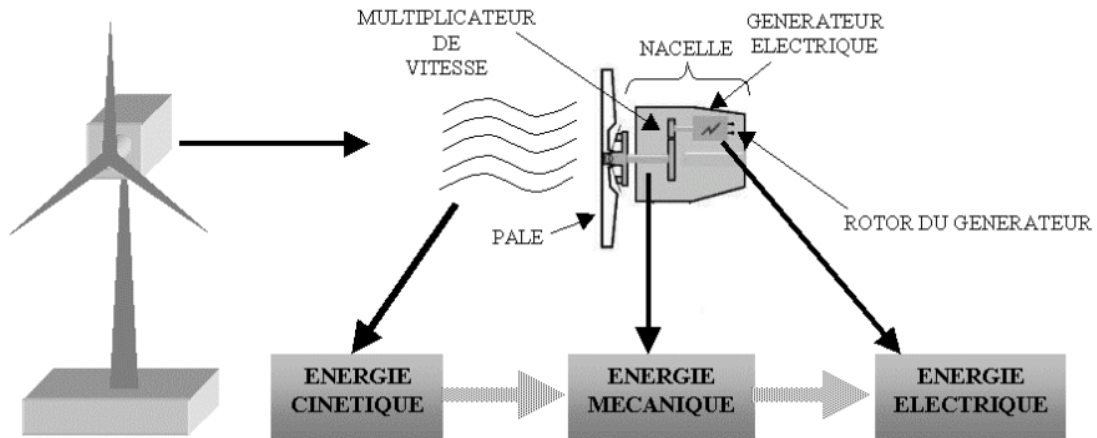


Figure I.7 Conversion de l'énergie cinétique du vent [17].

I.4.2 Principales composantes d'éolienne :

Le schéma d'une éolienne de type aérogénérateur est donné dans la Figure I.8.

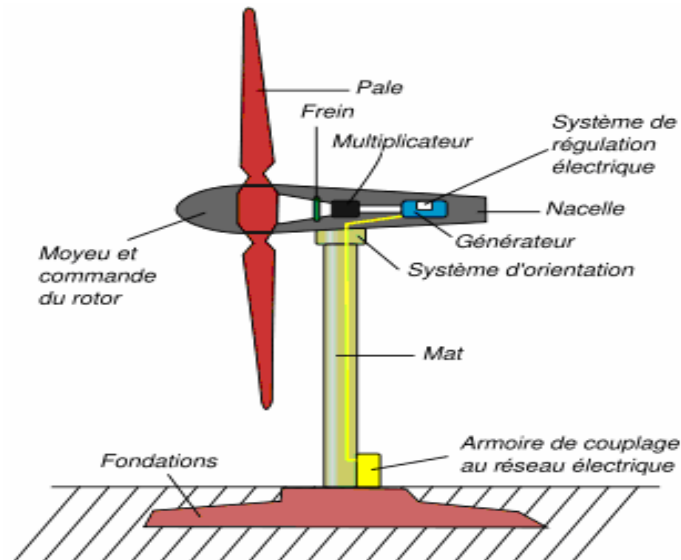


Figure I.8 Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur [17]

La Figure. I.9 représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [18]

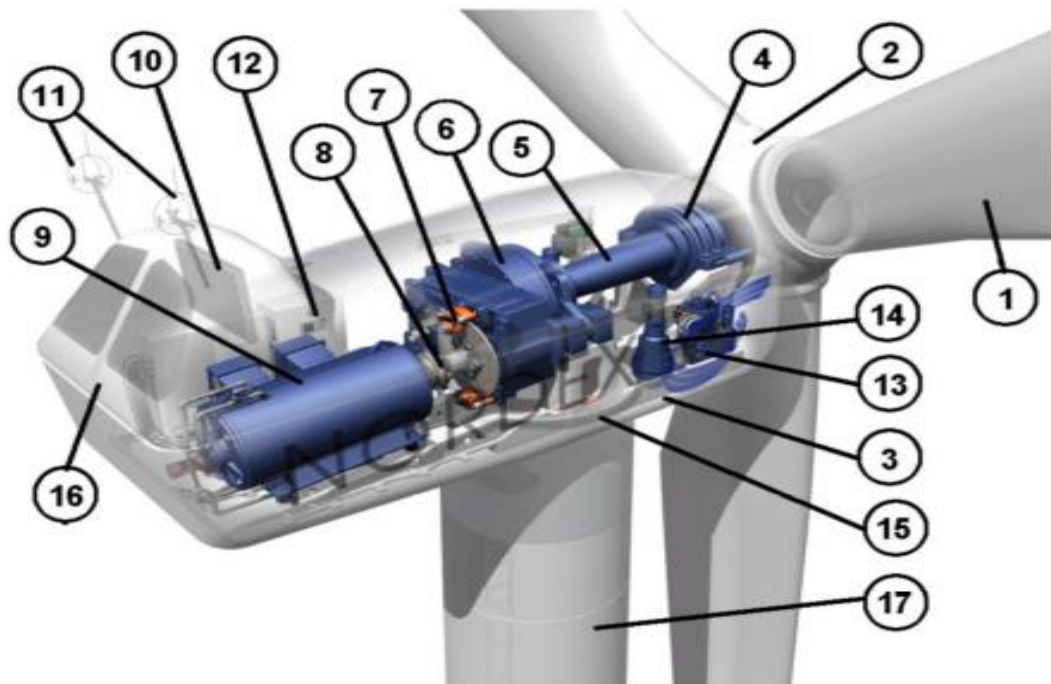


Figure I.9 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW [18].

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.

Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique, Le fabricant allemand Enercon propose ainsi toute une

gamme de telles machines de 200 kW à 4,5 MW (phase de pré-industrialisation).

La Figure I.10 montre le schéma de la nacelle d'une telle machine. Le diamètre de la nacelle est plus élevé mais sa longueur est plus courte. Ces génératrices, dont la vitesse de rotation et le nombre de pôles rendent impossible une connexion directe au 50 Hz, sont nécessairement alimentées par un convertisseur statique qui offre la possibilité d'un fonctionnement à vitesse variable [19].

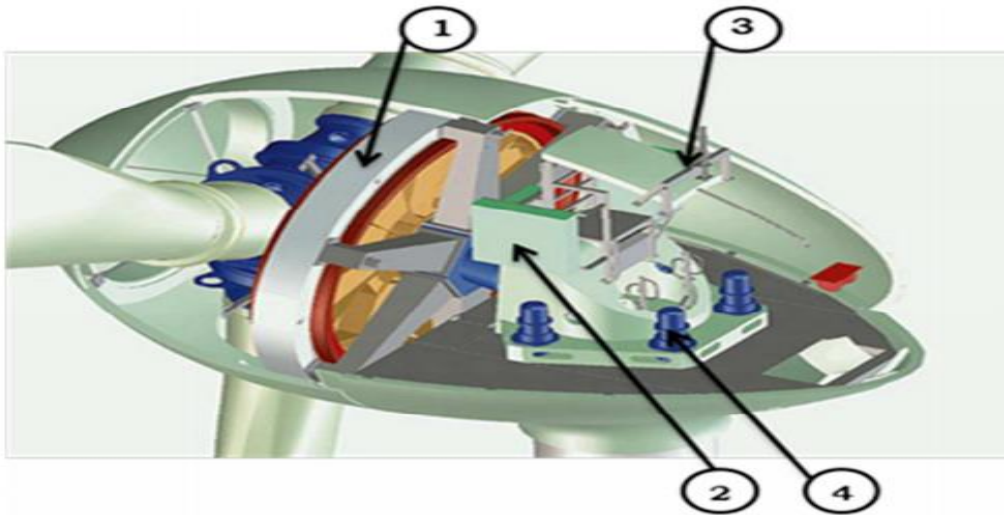


Figure I.10 Schéma d'une éolienne Enercon à entraînement direct [19].

- 1- Alternateur discoïde.
- 2- Convertisseurs électronique.
- 3- Système de refroidissement.
- 4- Système d'orientation.

I.4.3 Fonctionnement d'une 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.

Tableau I.1 montre l'éléments de l'installation et leurs fonction [20].

Elément de l'installation	Fonction
Fondation	Ancrer et stabiliser l'éolienne dans le sol
Mât	Supporter la nacelle et le rotor
Nacelle	Supporter le rotor Abriter le dispositif de conversion de l'énergie mécanique en électricité(génératrice) ainsi que les dispositifs de contrôle et de sécurité
Rotor/pales	Capter l'énergie mécanique du vent et la transmettre à la génératrice.
Transformateur	Élever la tension de sortie de la génératrice avant l'acheminement du courant électrique par le réseau
Poste de livraison	Adapter les caractéristiques du courant électrique à l'interface entre le réseau privé et le réseau public

Tableau I.1 Découpage fonctionnel de l'installation [21].

I.4.4 Classement des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [20].

I.4.4.1 Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux (voir (Figure I.11) [20].

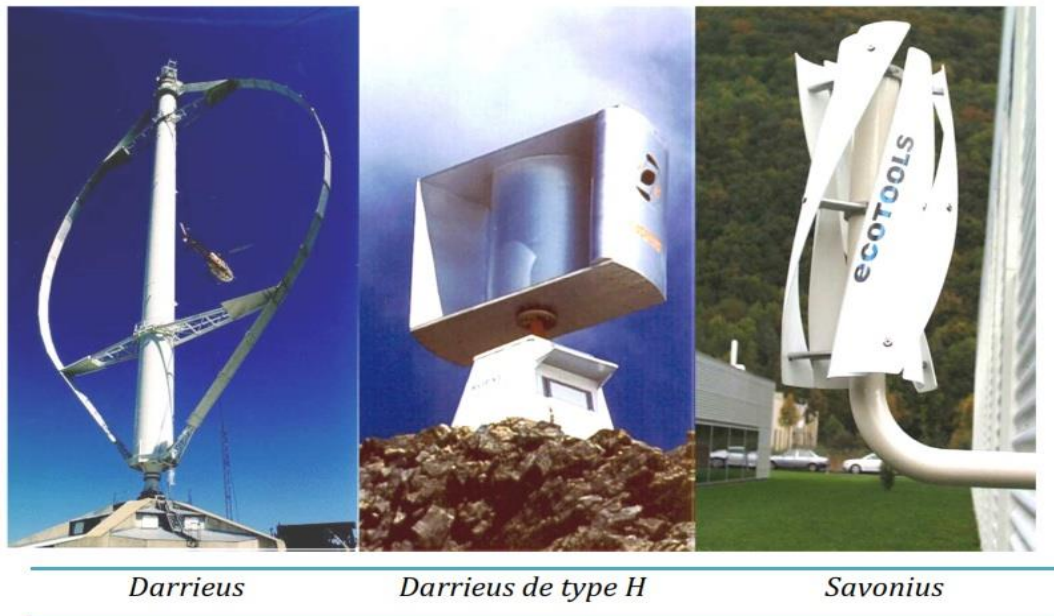


Figure. I.11 Technologie éolienne à axe vertical [20].

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- **Le rotor de Savonius** : dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure I.12) [22]. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

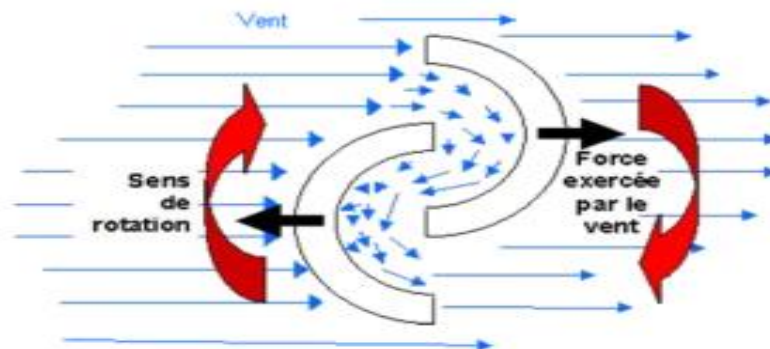


Figure. I.12 Schéma de principe du rotor de Savonius [22].

- **Le rotor de Darrieus** : est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensité et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Figure I.13).



Figure I.13 Schéma du rotor de Darrieus [22].

I.4.4.2 Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [22]



Moulin américain

voilure bipale

voilure tripale

Figure I.14 Technologie éolienne à axe horizontale [22].

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Figure I.14):

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe

horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

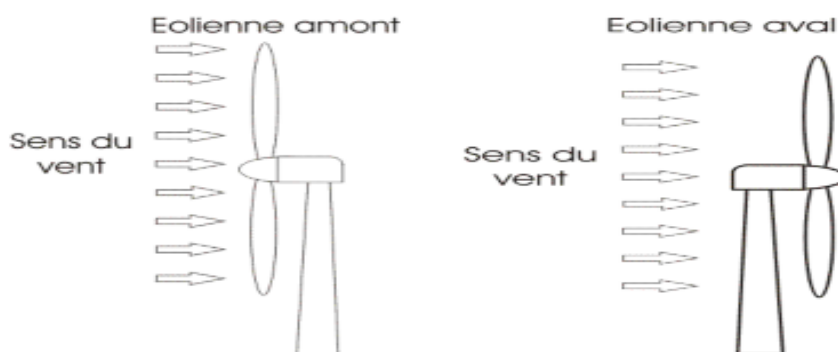


Figure I.14 Types d'éoliennes à axe horizontal [22].

Les précédents types, elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme montrer dans le Tableau I.2.

	Avantages	Inconvénients
AXE HORIZONTAL	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Efficacité de conversion d'énergie élevée. ➤ Auto démarrage possible ➤ Rotor positionnée en hauteur donnant accès à des vents élevés 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cout d'installation élevé. ➤ Nécessite une tour robuste. ➤ Nécessite de longs câbles électriques.
AXE VERTICAL	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Cout d'installation réduit. ➤ Maintenance de l'équipement plus aisé . ➤ Ne nécessite pas de dispositif d'orientation de la turbine dans l'axe de vent. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Efficacité de conversion d'énergie faible . ➤ Haute variation du couple mécanique et des forces sur les éléments des pales. ➤ Doit démarrer en moteur ➤ Option limité pour le control de la vitesse.

Tableau I.2 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical[23].

La presque totalité des turbines éoliennes rencontrées dans le domaine est à axe horizontal. Ce choix repose principalement sur le fait que ce type de turbine présente une efficacité de conversion d'énergie environ deux fois plus élevée que les éoliennes à axe vertical [23], [24].

Par ailleurs, les éoliennes à axe vertical est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elle présentent des phénomènes de fatigue causés par la haute variation du couple mécanique ; ceci en réduit sa robustesse et sa durée de vie. Il est à noter que le présent document traite uniquement des éoliennes à axe horizontal.

I.4.4.3 Eoliennes lentes :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multipales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [25] :

$$P=0.15*D^2*V^3 \quad (\text{I.1})$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre (D) en mètre et la vitesse (V) du vent en m/s.

I.4.4.4 Eoliennes rapides :

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P=0.15*D^2*V^2 \quad (\text{I.2})$$

Le Tableau I.3 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	12 m à 45 m	moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I.3 Classification des turbines éoliennes [25].

I.4.5 Fonctionnement d'une Pale d'éolienne :

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au coeur du principe de fonctionnement [25].

I.5 Conversion de l'énergie éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public [26].

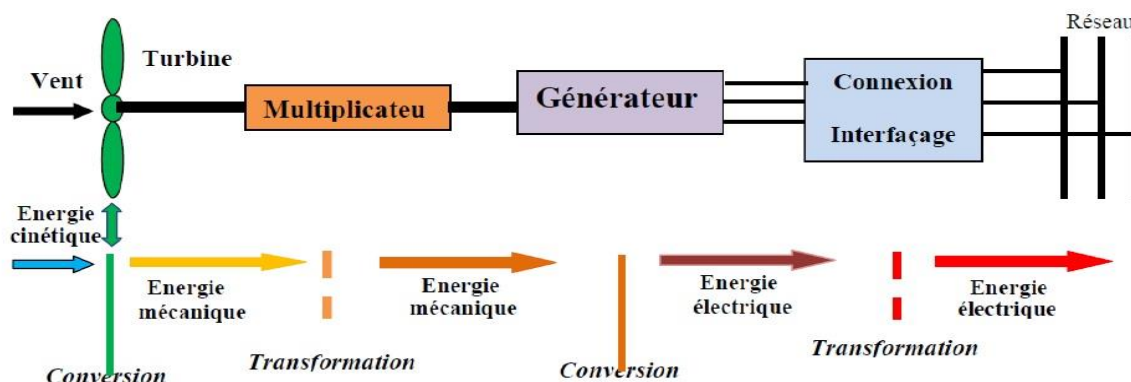


Figure I.15 Principe de la conversion de l'énergie éolienne [26].

I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

a) Avantages :

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie à ces pays pour se développer. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables
- Chaque mégawattheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles

b) Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux;
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante;
- La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne

- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien
- Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques

I.7 Caractérisation du Vent :

I.7.1 Répartition instantanée de la vitesse du vent :

Le vent souffle là où l'air présente des différences de température et de pression et se dirige toujours des hautes pressions vers les basses pressions. Si la terre ne tournait pas, l'air se déplacerait directement (en ligne droite) des centres de haute pression (anticyclone) vers les centres de basse pression (cyclone) mais à cause de cette rotation du globe, l'air est forcé de suivre une trajectoire courbe, légèrement infléchie vers la basse pression (force de Coriolis) [27]. Le choix géographique d'un site éolien est important dans un projet de production d'énergie éolienne. Pour déterminer l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien il faudrait déterminer les caractéristiques du vent dans ce site. Pour connaître les propriétés d'un site, nous devons faire des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps. Les Figures (I.16 et I.17) montrent les variations des vitesses moyennes sur un site pour une période donnée.

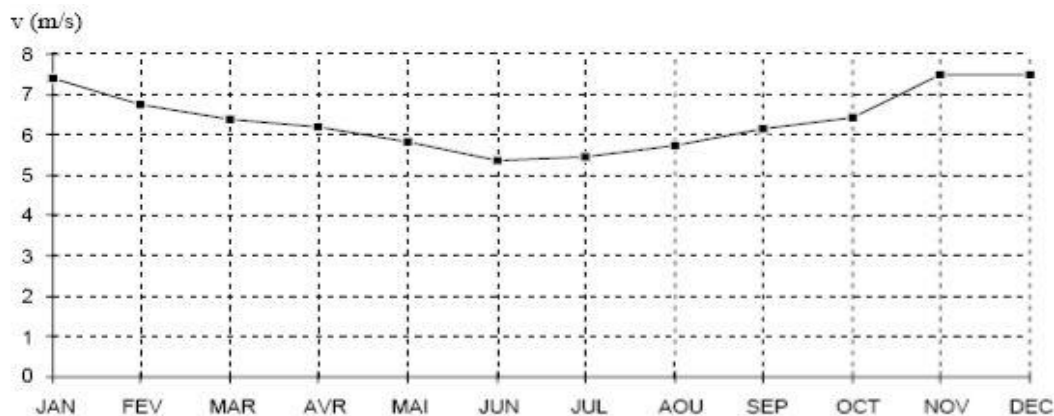


Figure I.16 Variations des vitesses moyennes du vent sur 1 an [28].

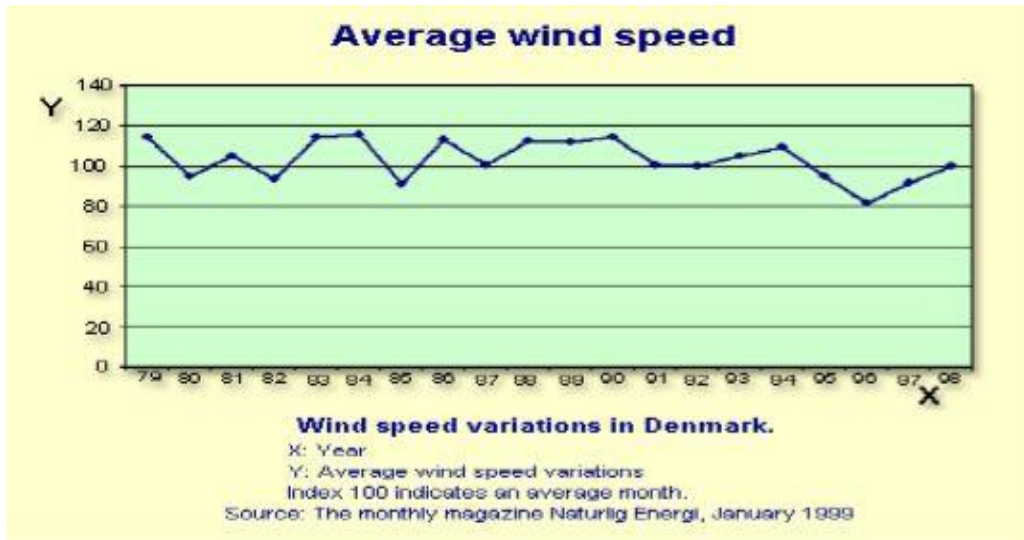


Figure I.17 Variations des vitesses moyennes du vent sur 20 ans [28].

I.7.2 Histogramme des vitesses de vent :

L’histogramme des vitesses des vents ou courbe de durée en vitesse du site est un outil important dans la caractérisation d’un site éolien. La courbe de durée en vitesse représente le temps durant lequel le vent se situe dans chaque fourchette ou palier de valeurs de vitesse. Par exemple, en disposant d’un ensemble N de valeurs mesurées de la vitesse du vent on détermine l’histogramme de la vitesse du vent (la courbe de distribution des vitesses du vent (Figures I.18), l’exemple de calcul est basé sur les données météorologiques de la station de Hassi Rmal [29].

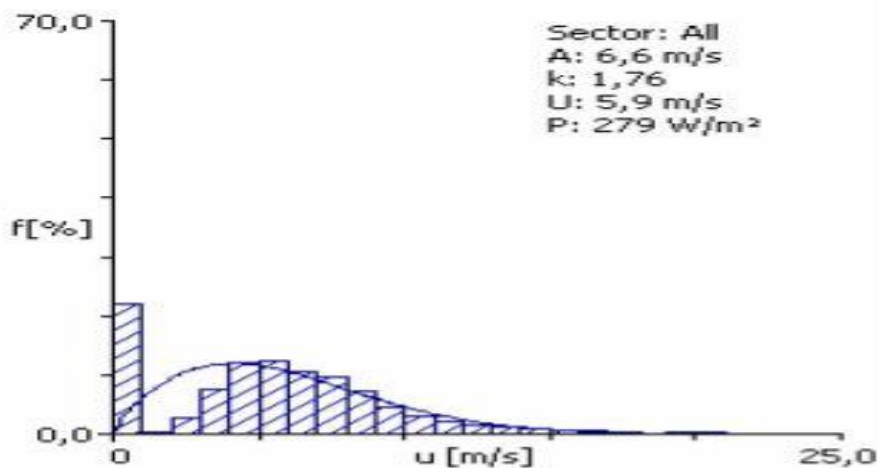


Figure I.18 Courbe de densité de probabilité à Hassi Rmal donnée par Wasp [29].

I.7.3 Influence de la hauteur :

Pour définir les caractéristiques d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur de mat de l'éolienne. En effet, la vitesse du vent V augmente selon la hauteur h . L'expression (I.3) donne la méthode de ce calcul et on précise que h est la hauteur du mat et h_{mes} la hauteur des appareils de mesure [30].

$$V_V(h) = V_V(h_{mes}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{mes}/\alpha)} \quad (\text{I.3})$$

Le Tableau I.4 les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement.

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0.002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.002
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces	0.003
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0.1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0.2
Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

Tableau I.4 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [30].

Le Tableau I.5 donne un exemple de l'évolution du vent en fonction de la hauteur dans une région ventée par un « vent orographique » (vent existant au niveau d'une région indépendamment des effets de rugosité).

Hauteur	Vitesse moyenne estimée
90 m (vent orographique)	6,8 m/s
80 m	6,5 m/s
70 m	6,3 m/s
60 m	6,0 m/s
50 m	5,7 m/s

Tableau I.5 les vitesses de vent moyen en fonction de la hauteur [31].

I.8 Stratégies de commande de la turbine :

La caractéristique puissance vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones:

- **Zone 1**: C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieur à une certaine vitesse ω_{cut_in} , avant cette zone le vent est très faible pour faire tourner l'éolienne.
- **Zone 2** : Dans cette zone le vent fait tourner la turbine à des vitesses différentes mais au-dessous de la vitesse nominale, le but de la commande dans ce cas est d'adapter la vitesse de la génératrice afin de maintenir le rapport de la vitesse spécifique à sa valeur optimale pour extraire le maximum de la puissance, la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking).
- **Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante, dans cette zone la puissance de la génératrice atteint des valeurs très importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.

Au delà de la vitesse ω_{cut_out} un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique, notre travail tourne particulièrement autour de la zone 2.

Les objectifs de la loi de commande d'une éolienne à vitesse variable reposent sur les trois principaux points suivants

- ❖ Génération de la puissance maximale en dessous de la puissance nominale, en d'autres termes à vent faibles;
- ❖ Maintenir une qualité de puissance satisfaisante au dessus de la puissance nominale (à vent forts);
- ❖ Minimiser les efforts subis par le rotor, les pales et le dispositif d'entraînement.

Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, la rentabilité d'une énergie éolienne, nous avons expliqué le principe de conversion aérodynamique du vent.

Le deuxième chapitre est consacré pour la description des réseaux de neurones artificiels (RNA), les réseaux de neurones profonds et les différents types d'architectures et les modèles plus connus.

CHAPITRE II

Les Reseux De Neurones Artificiels

Et Profonds

II.1 Introduction

Depuis 2006, l'apprentissage profond est apparu comme un nouveau axe de recherche de l'apprentissage automatique. Au cours des dernières années, les techniques développées dans l'apprentissage profond ont déjà eu un impact sur les travaux de traitement des signaux et de l'information, y compris les aspects de l'apprentissage automatique et l'intelligence artificielle [32].

II.2 Réseaux de neurones artificiels (RNA)

Un réseau de neurones artificiels est un modèle de calcul dont l'inspiration originelle était un modèle biologique, c'est-à-dire le modèle du cerveau nerveux humain. Les réseaux de neurones artificiels sont optimisés par des calculs d'apprentissage de type statistique. Ils sont placés d'une part, dans la famille des applications statistiques, permettant de générer de vastes espaces fonctionnels, souples et partiellement structurés, et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle, permettant de prendre des décisions s'appuyant davantage sur la perception que sur le raisonnement logique formel [33].

II.2.1 Origine

Aujourd'hui, les réseaux de neurones sont utilisés dans de nombreux domaines à cause de leurs propriétés, en particulier leur capacité d'apprentissage. La chronologie des événements les plus marquants de l'apprentissage profond donné dans la Figure II.1.

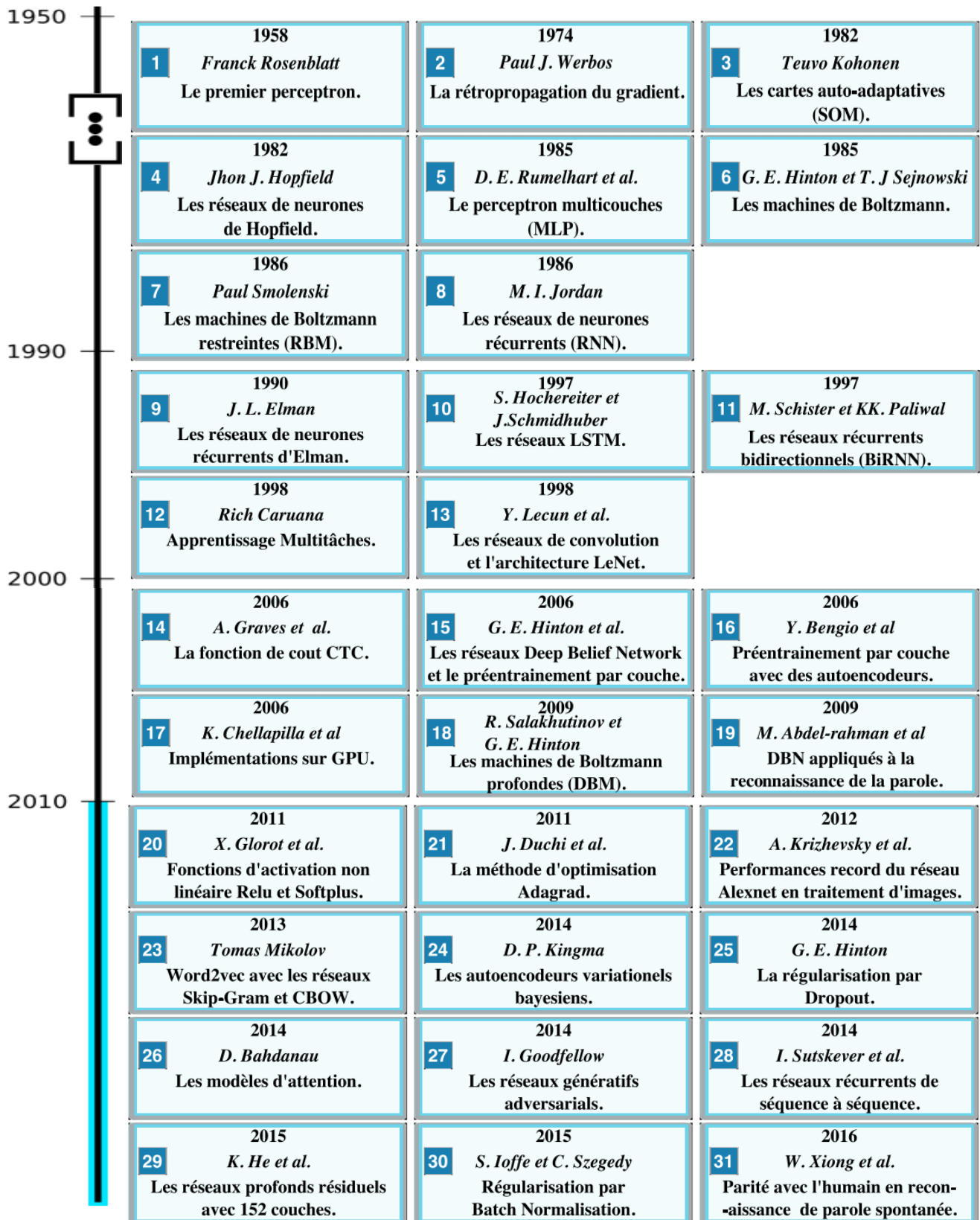


Figure II.1 Chronologie des évènements les plus marquants de l'apprentissage profond [34].

II.2.2 Neurone biologique

Le neurone est une cellule nerveuse. Elle se compose d'un corps cellulaire appelé « Soma » qui contient le noyau (où se déroule les activités cellulaires vitales) de prolongement appelé « Neurite » (voir Figure II.2). Ces dernières sont de deux types, les Dendrites qui servent de canaux d'entrées et l'axone, unique qui est le canal de sortie [35].

Au point de vu fonctionnel, on considère le neurone comme une entité polarisée, c'est à-dire que l'information ne se transmet que dans un seul sens : des dendrites vers l'axone. Le neurone va donc recevoir des informations, venant d'autres neurones, grâce à ses dendrites.

Il va ensuite y avoir sommation, au niveau du corps cellulaire, de toutes ces informations et via un potentiel d'action (un signal électrique). Le résultat de l'analyse va transiter le long de l'axone jusqu'aux terminaisons synaptiques. A cet endroit, lors de l'arrivée du signal, des vésicules synaptiques vont venir fusionner avec la membrane cellulaire, ce qui va permettre la libération des neurotransmetteurs (médiateurs chimiques) dans la fente synaptique. Le signal électrique ne pouvant pas passer la synapse (dans le cas d'une synapse chimique), les neurotransmetteurs permettent donc le passage des informations, d'un neurone à un autre.

Les synapses possèdent une sortie de « mémoire » qui leur permet d'ajuster leur fonctionnement. En fonction de leur « histoire », c'est-à-dire de leur activation répétée ou non entre deux neurones, les connexions synaptiques vont donc se modifier. Ainsi, la synapse va faciliter ou non le passage des influx nerveux. Cette plasticité est à l'origine des mécanismes d'apprentissage.

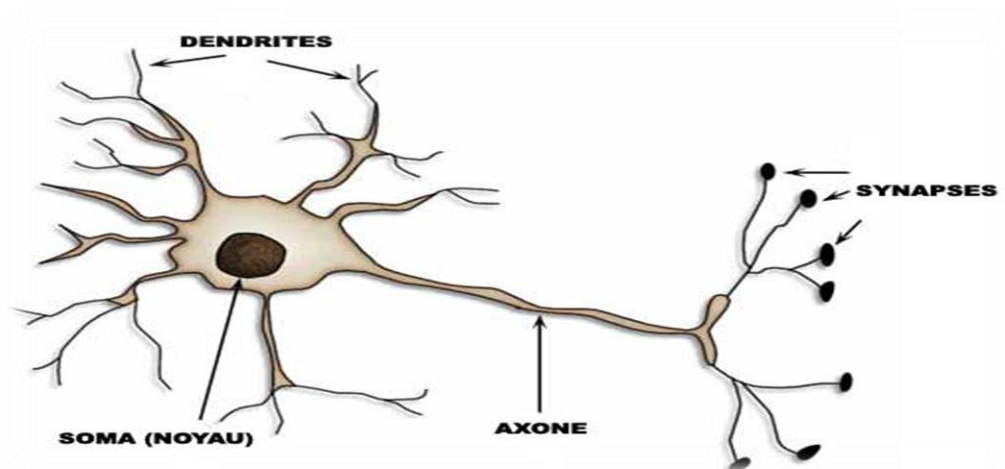


Figure II.2 Neurone biologique [35].

II.2.3 Neurone formel

Qu'au niveau biologique, les synapses n'ont pas toutes la même « valeur » (Le neurone formel (Figure II.3) est une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, en particulier la sommation des entrées. Sachant connexions entre les neurones étant plus au moins fortes), les chercheurs ont donc créé un algorithme qui pondère la somme de ses entrées par des poids synaptiques (coefficients de pondération).

En général, un neurone formel est un élément de traitement possédant n entrées $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$ (qui sont les entrées externes ou les sorties des autres neurones) et une ou plusieurs sorties. Son traitement consiste à effectuer à sa sortie y_i le résultat d'une fonction de seuillage f (dite aussi la fonction d'activation) de la somme pondérée.

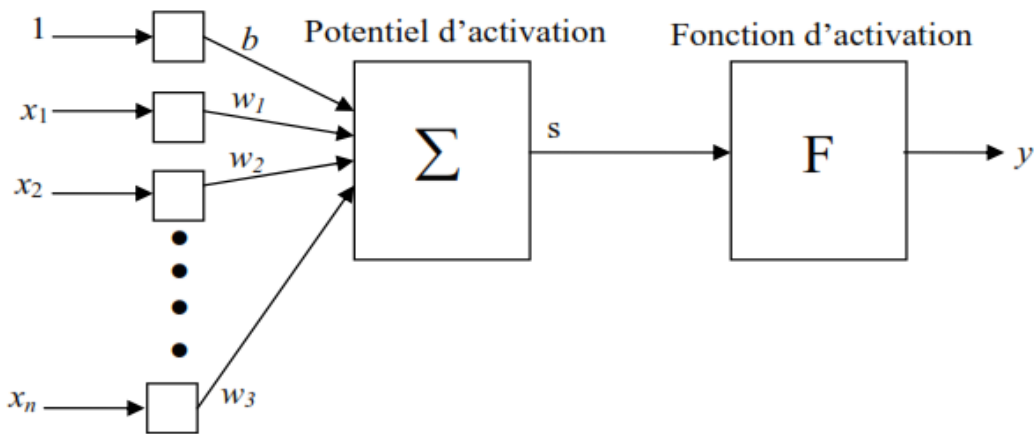


Figure II.3 Modèle d'un neurone formel [35].

Avec :

- Les x_i sont les entrées du réseau.
- s est le potentiel d'activation.
- Les w_i représentent les poids synaptiques.
- y_i la sortie du réseau tels que :

$$y = f(s); s = \sum_{i=0}^n w_i \cdot x_i + b \quad (\text{II. 1})$$

Le résultat de la somme pondérée s'appelle le niveau d'activation du neurone. Le biais b s'appelle aussi le seuil d'activation du neurone [36].

II.2.4 Fonction d'activation :

La fonction d'activation (la fonction de transfert) joue un rôle très important dans le comportement du neurone. Elle retourne une valeur représentative de l'activation du

neurone, cette fonction a comme paramètre la somme pondérée des entrées ainsi que le seuil d'activation [36].

La nature de cette fonction diffère selon le réseau. On en compte divers fonctions comme ils énumérées dans le (Tableau II.1). Les trois fonctions les plus utilisées sont les fonctions « seuil », « linéaire », « sigmoïdes ». , parmi elles :

Catégorie	Type	Equation	Allure
Seuil	Binaire (Heaviside)	$f(x) = 1 \quad \text{si } x > 0$ $f(x) = 0 \quad \text{si } x \leq 0$	
	Signe	$f(x) = 1 \quad \text{si } x > 0$ $f(x) = -1 \quad \text{si } x \leq 0$	
Linéaire	Identité	$f(x) = x$	
	Saturation	$f(k,x) = -1 \quad \text{si } x < -1/k$ $f(k,x) = 1 \quad \text{si } x \geq 1/k$ $f(k,x) = kx \quad \text{sinon}$	

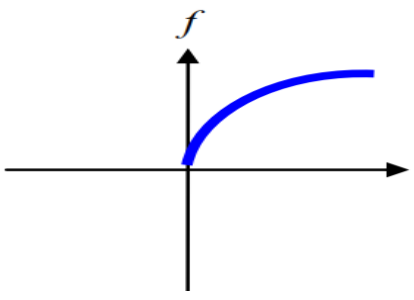
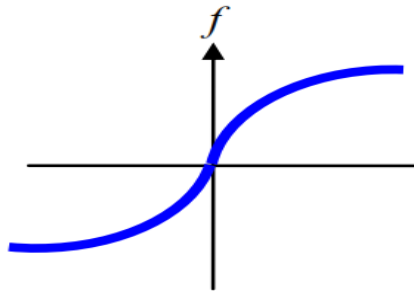
Sigmoïde	Positive (logistique)	$f(k, x) = \frac{1}{1 + e^{kx}}$	
	Symétrique (type tanch)	$f(k, x) = \frac{2}{1 + e^{-kx}} - 1$	

Tableau II.1 Fonction de transfert [37].

II.2.5. Caractéristiques d'un réseau de neurones :

Malgré la simplicité de fonctionnement d'un neurone, c'est l'interconnexion d'un certain nombre d'entre eux qui rend l'ensemble très complexe. De manière générale, on envisage un réseau comme ayant plusieurs couches de neurones, dont une couche d'entrée, une couche de sortie et un certain nombre de couches intermédiaires appelé en anglais "hidden layers" (couches cachées). Si les liens vont des neurones d'entrée vers les neurones de sortie, on définit le réseau comme "feed-forward". Si les liens peuvent boucler à l'intérieur du réseau, on l'appelle « feedback ». Le fait de pouvoir avoir des rebouclages permet au réseau d'avoir une sorte de mémoire interne. Si chaque neurone est relié à tous les neurones de la couche suivante, on dit du réseau qu'il est « complet ».

II.2.6. Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un réseau est un peu plus simple, et dépend uniquement du fonctionnement de ses neurones. Celui-ci doit être considéré comme un circuit électrique contrôlé par une horloge. A chaque cycle, tous les neurones vont, de manière parallèle, calculer une valeur de sortie en fonction de la somme de leurs valeurs d'entrées, sachant que, pour un neurone A, les valeurs en entrée au cycle n sont les valeurs en sortie au cycle n- des neurones connectés à A. On va

donc assister, à chaque “clockage” du réseau, à une propagation de l'influx nerveux de ses entrées vers ses sorties (voir Figure II.4).

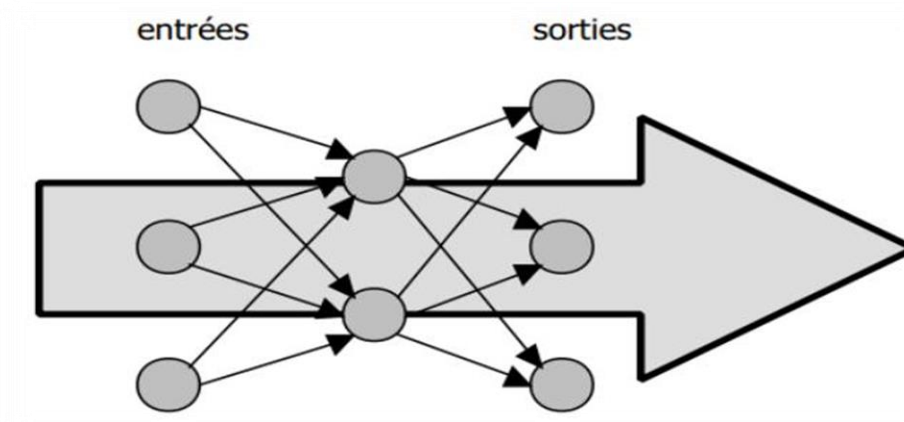


Figure II.4 Propagation de l'influx nerveux dans un réseau de type perceptron[37].

II.3 L'apprentissage en profondeur (Deep Learning):

Le Deep Learning est un nouveau domaine de recherche de la machine Learning (ML), qui a été introduit dans le but de rapprocher le ML de son objectif principal à savoir: l'intelligence artificielle. Il concerne les algorithmes inspirés par la structure et du fonctionnement du cerveau. Ils peuvent apprendre plusieurs niveaux de représentation dans le but de modéliser des relations complexes entre les données [38].

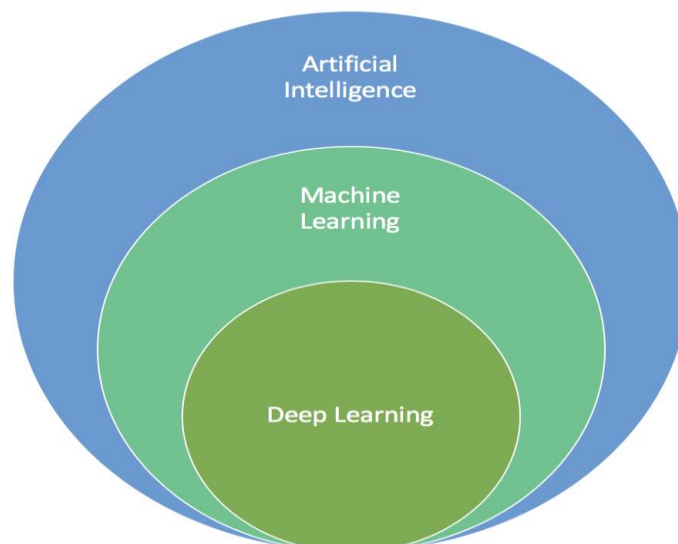


Figure II.5 La relation entre l'intelligence artificielle, le ML et le Deep Learning.

II.4 Définition

L'apprentissage en profondeur est un ensemble d'algorithmes d'apprentissage automatique qui tentent d'apprendre à plusieurs niveaux, correspondant à différents niveaux d'abstraction. Il a la capacité d'extraire des caractéristiques à partir des données brutes grâce aux multiples couches de traitement composé de multiples transformations linéaires et non linéaires et apprendre sur ces caractéristiques petites à petit à travers chaque couche avec une intervention humaine minimale [38].

II.5 Exemples d'application de Deep Learning

L'apprentissage en profondeur investit progressivement notre quotidien :

- La reconnaissance vocale.
- Le tagging automatique de morceaux de musique.
- La synthèse vocale avancée.
- L'étiquetage automatique d'image.
- La conception de nouvelles molécules pharmaceutiques.

Toutes ces applications mettent aujourd'hui en œuvre des techniques de Deep Learning [38].

II.6 Les différentes Architectures du Deep Learning

Bien qu'il existe un grand nombre de variantes d'architectures profondes. Il n'est pas toujours possible de comparer les performances de toutes les architectures, car elles ne sont pas toutes évaluées sur les mêmes ensembles de données. Le Deep Learning est un domaine à croissance rapide, et de nouvelles architectures, variantes ou algorithmes apparaissent toutes les semaines.

II.6.1 Réseaux de neurones convolutionnels (CNN)

Les réseaux convolutifs ont été introduits pour la première fois par Fukushima [39], il a dérivé une architecture du réseau nerveux hiérarchique inspirée par le travail de recherche de Hubel [40]. Lecun [41], les a généralisés pour classer les chiffres avec succès et pour reconnaître les numéros de contrôle manuscrit par LeNet-5 qui est montré à la Figure II.6. Ciresan [42] a utilisé les réseaux convolutifs et réalisé les meilleures performances dans la littérature pour la reconnaissance d'objets multiples pour des bases de données d'images : MNIST, NORB, CIFAR10 et l'ensemble de données ImageNet.

Les réseaux CNN se concentrent principalement sur le fait que l'entrée sera composée d'images. Cela permet de centrer l'architecture à mettre en place pour répondre au mieux à la nécessité de traiter un type de données spécifiques.

Les réseaux neuronaux convolutifs diffèrent des autres formes de réseaux neuronaux artificiels en ce sens. Qu'au lieu de se concentrer sur l'intégralité du domaine problématique, les connaissances sur le type spécifique d'entrées sont exploitées, cela permet à son tour de mettre en place une architecture réseau beaucoup plus performante.

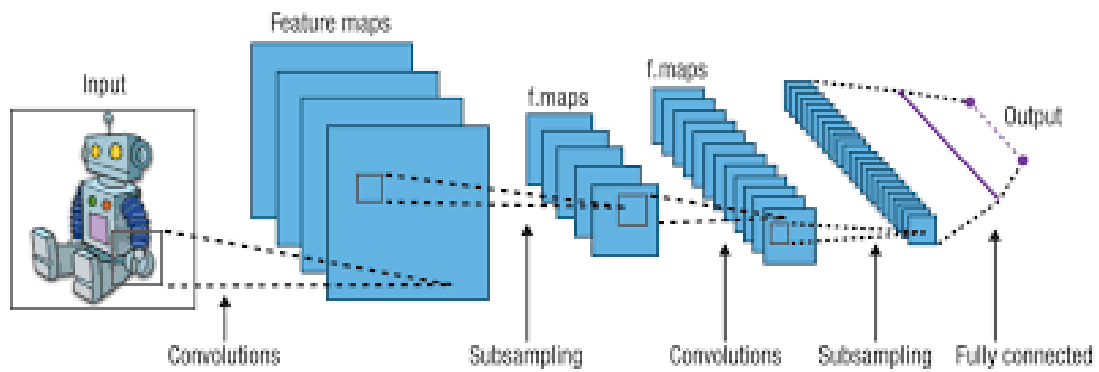


Figure II.6 Réseau Neuronal Convolutif.

II.6.1.1 Architecture globale de CNN

Les CNN sont composés de trois types de couches : des couches convolutives, des couches de regroupement et des couches entièrement connectées. Lorsque ces couches sont empilées, une architecture CNN a été formée. Une architecture CNN simplifiée pour la classification MNIST est illustrée à la figure suivante.

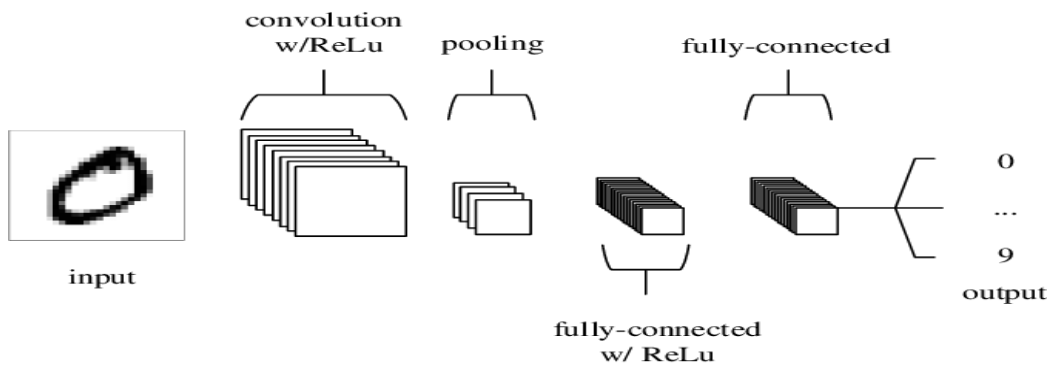


Figure II.7 Architecture simple de CNN.

II.6.1.2 Couche convolutive

Les couches convolutives constituent le noyau du réseau convolutif. Ces couches se composent d'une grille rectangulaire de neurones qui ont un petit champ réceptif étendu à travers toute la profondeur du volume d'entrée. Ainsi, la couche convolutive est juste une convolution d'image de la couche précédente, où les poids spécifient le filtre de convolution.

La couche convolutive déterminera la sortie des neurones qui sont connectés aux régions locales de l'entrée par le calcul du produit scalaire entre leurs poids et la région connectée au volume d'entrée. ReLu vise à appliquer une fonction d'activation «élémentaire» telle qu'une fonction sigmoïde à la sortie de l'activation produite par la couche précédente.

II.6.1.3 Couche de Pooling

Après chaque couche convolutive, il peut y avoir une couche de pooling. Cette couche sous échantillonne le long de la dimensionnalité spatiale de l'entrée donnée, ce qui réduira davantage le nombre de paramètres au sein de cette activation. Il y a plusieurs façons de faire cette mise en commun, comme prendre la moyenne ou le maximum, ou une combinaison linéaire prise par des neurones dans le bloc. Par exemple, la Figure II.8 montre le max pooling sur une fenêtre 2×2 .

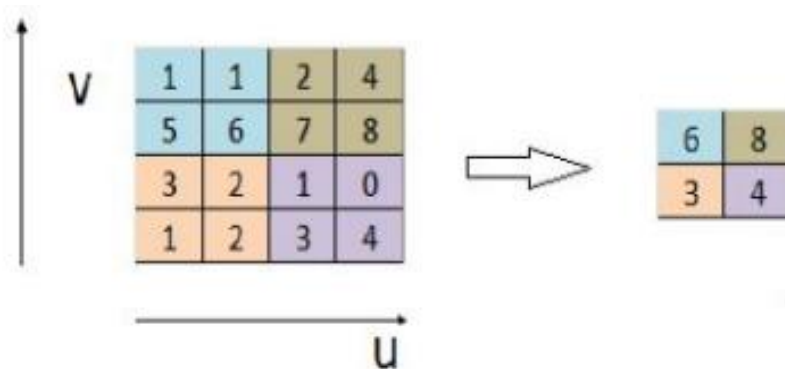


Figure II.8 Max pooling.

II.6.1.4 Couche totalement connectée

Enfin, après les couches de convolution et pooling, le raisonnement de haut niveau dans le réseau neuronal se fait via des couches totalement connectées. Dans les réseaux de neurones convolutifs, chaque couche agit comme un filtre de détection.

pour la présence de caractéristiques spécifiques ou de motifs présents dans les données d'origine. Les premières couches d'un réseau convolutif détectent des caractéristiques qui peuvent être reconnues et interprétées facilement. Les couches ultérieures détectent de plus en plus des caractéristiques plus abstraites. La dernière couche du réseau convolutif est capable de faire une classification ultra-spécifique en combinant toutes les caractéristiques spécifiques détectées par les couches précédentes dans les données d'entrée.

Les couches totalement connectées font les mêmes tâches que celles des ANN standard et tenteront de produire des notes de classe à partir des activations, pour les utiliser pour la classification. Il est également suggéré d'utiliser ReLu entre ces couches pour améliorer les performances [43].

II.6.1.5 Couche de correction (Relu)

C'est une couche pour améliorer l'efficacité du traitement en intercalant entre les couches de traitement une couche qui va opérer une fonction mathématique (fonction d'activation) sur les signaux de sortie.

La fonction ReLu : $F(x)=\max(0, x)$ Cette fonction force les neurones à retourner des valeurs positives[44].

II.6.2 Les réseaux neuronaux récurrents (RNN)

Les réseaux neuronaux récurrents (RNNs) sont des réseaux de neurones qui comportent des cycles dans leur graphe de connectivité. Ces cycles permettent au réseau d'entretenir une information en se l'envoyant à lui-même. Cela change la dynamique du réseau de neurones et l'amène à s'auto-entretenir. Ces modèles étaient souvent plébiscités notamment pour le traitement automatique de la parole, et plus généralement de séquences, car leurs caractéristiques leur permettent d'apprendre, de stocker et de prendre en compte l'information contextuelle passée lors de traitement de l'information à l'instant présent[45].

II.6.2.1 Long Short-Term Memory (LSTM)

Les réseaux de mémoire à long terme à court terme généralement appelés simplement (LSTM : Long Short Term Memory) sont un type spécial de RNN. Ils ont été introduits par Hochreiter Schmidhuber (1997). Les Réseaux neuronaux récurrents présentés dans la section précédente sont capables d'apprendre des règles de mise à jour de séquence arbitraire en théorie. Dans la pratique, cependant, ces modèles oublient généralement rapidement le passé [46]. C'est ce qu'on appelle le problème de la disparition de gradient [47]. et c'est pourquoi ils ont inventé le LSTM. La cellule LSTM est une adaptation de la couche récurrente qui permet aux signaux plus anciens des couches profondes de se déplacer vers la cellule du présent, La figure suivante représente une chaîne de trois cellules LSTM :

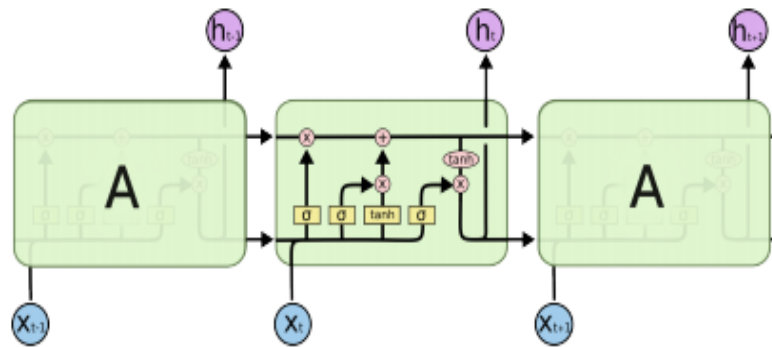
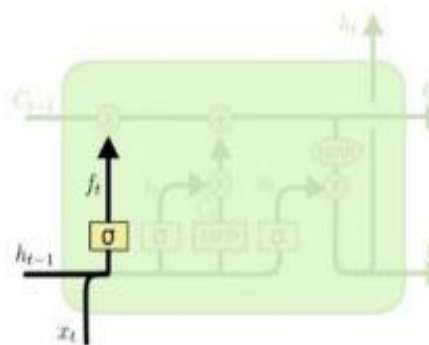


Figure II.8 Une chaîne de cellules LSTM [48].

Les calculs se déroulent comme suit [48].



$$f_t = \sigma(w_t \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f) \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

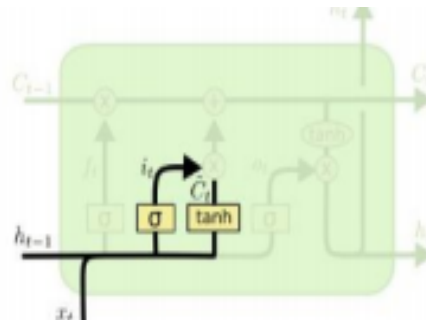
h_{t-1} : La sortie a l'instant t-1

x_t : l'entrée couant a l'instant t

b : C'est le bais

w : C'est le poids

σ : C'est la fonction sigmoïde



$$i_t = \sigma(w_t \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \quad (\text{II. 3})$$

$$c_t = \tanh(w_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

h_t : La sortie.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions de base de RN notamment son principe de fonctionnement, ses composantes principales et également ses limitations. Ensuite, nous avons décrit une nouvelle variante de RN qui s'appelle Deep Learning (DL). Cette technique se caractérise par son habilité de résoudre le problème de la complexité de l'entraînement de (RN) ainsi que son pouvoir de représenter les formes (les entrées) d'une manière puissante, automatiques et discriminante.

Finalement, nous avons discuté les différents modèles de Deep Learning à savoir le CNN, le LSTM qui est une architecture spéciale des réseaux de neurones caractérisée par son modèle simple et sont temps de calcul qui est extrêmement rapide par rapport aux autres types de réseaux afin de prédire la valeur future de la vitesse du vent.

Le chapitre suivant est consacré à la simulations et résultats de notre travail.

CHAPITRE III

Résultats de Simulation et Discussion

III.1. Introduction :

L'objectif de ce Chapitre est de présenter les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel MATLAB sur les bases de données, dans le présent travail et de les commentés. Nous illustrons l'intérêt de la technique développée pour la prédiction du vent.

Les travaux de ce mémoire consistent à étudier les méthodes de la prédiction de la vitesse du vent, en utilisant la technique **LSTM** et les réseaux de neurones de types **MLP** en régression, ceci en se basant sur deux critères de performances, à savoir : la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur moyenne de pourcentage absolue (MAPE) et l'erreur quadratique moyenne (MSE).

III.2 Présentation de la base de données:

Pour faire la prédiction du vent Nous avons pris deux bases de données pour deux sites au Etats-Unis à partir du site web du laboratoire national des énergies renouvelables d'États-Unis « NREL » (National Renewable Energy Laboratory)

III.2.1 Caractéristiques des sites:

- Le premier site se situe dans l'état de Colorado (est un état de l'Ouest des Etats-Unis), les coordonnées du site sont (41° 6' " N, 72° ' " W).
- Le deuxième site se situe dans l'état de Connecticut (est une état du Nord-est des États Unis), les coordonnées du site sont (39° ' " N, 105° ' " W).

Site	Longitude	Latitude	L'altitude	Zone (km ²)	Densité (MW/km ²)	Total MW pour site
Colorado	-102.81	37.71	1422	48.7	15	732.2

Tableau III.1 : Caractéristiques géographiques du site Colorado1763.

Site	Longitude	Latitude	L'altitude	Zone (km ²)	Densité (MW/km ²)	Total MW pour site
Connecticut	-73.22	41.88	471	7	20	140.4

Tableau III.2 : Caractéristiques géographiques du site Connecticut-6869.

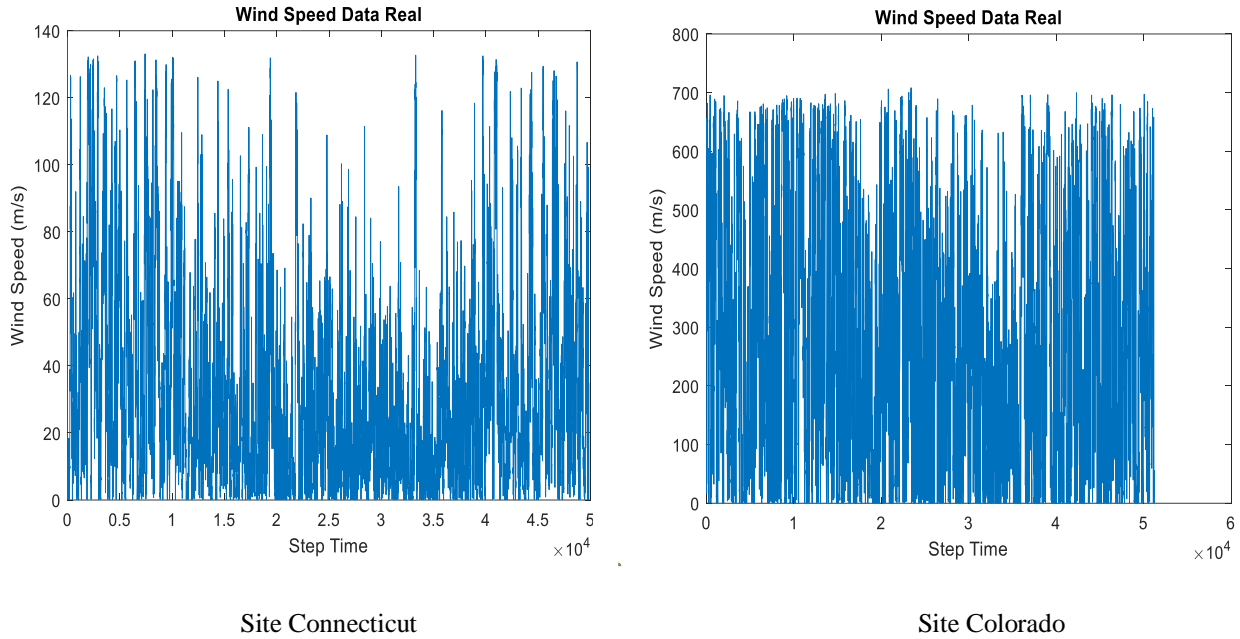


Figure III.1 : Les courbes de la base de données pour les deux sites.

III.3 Prédiction de la vitesse du vent par les RNA et RNP

Plusieurs types de Réseaux de Neurones Artificiels et aussi plusieurs architecture des Réseaux Neurones Profonds ont été présentés dans la littérature, dont chacun a des avantages et des inconvénients, pour la mise en œuvre de notre système de prédiction de la vitesse du vent nous avons choisit un RNA de type MLP et un RNP de type LSTM.

III.3.1 Critères d'évaluations :

Pour évaluer les performances de notre système proposé nous avons choisis les critère statique suivants: la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur moyenne de pourcentage absolue (MAPE) et l'erreur quadratique moyenne (MSE).

III.3.1.1 Racine carrée de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE) :

Le RMSE multiplie chaque erreur par elle-même (le carré de l'erreur), donnant ainsi un poids plus grand aux grandes erreurs qu'aux petites erreurs [24].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2} \quad (\text{III.1})$$

y_t, \hat{y}_t Sont respectivement les valeurs réelles et prédites et N est le nombre d'observations.

III.3.1.2 Erreur Quadratique Moyenne (MSE) :

représente la différence entre les valeurs d'origine et prédites extraites au carré de la différence moyenne sur l'ensemble de données

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2 \quad (\text{III.2})$$

Où:

y_i : les valeurs d'origine

\hat{y} : les valeurs prédites

III.3.1.3 Erreur Moyenne de Pourcentage Absolue (MAPE):

Le pourcentage d'erreur absolu moyen (MAPE) est une mesure courante de précision ou d'erreur pour les séries chronologiques ou d'autres prédictions,

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|y_i - y_f|}{y_i} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

où y_i sont les réels et y_f les prévisions ou prédictions correspondantes.

Le MAPE est un pourcentage, nous pouvons donc facilement le comparer entre les séries, et les gens peuvent facilement comprendre et interpréter les pourcentages.

III.4 Résultats de Simulation:

Dans ce qui suit nous allons présenter les résultats de simulation obtenus en utilisant le logiciel MATLAB, pour deux systèmes de prédiction de la vitesse du vent que nous avons proposé où le premier est basé sur LSTM et le deuxième est basé sur le MLP pour deux sites de données réelles Connecticut et Colorado situés en USA.

Pour améliorer les performances de notre premier système de prédiction basé sur les LSTM en fait varier le nombre de neurones cachées pour la cellule LSTM. Or le deuxième système basé sur MLP en fait varier nombre de couches cachée.

L'objectif de cette proposition (deux systèmes LSTM en suite MLP) et de ces variations est de faire une comparaison entre les résultats de ces deux types de réseaux de neurones.

III.4.1 La prédiction de la vitesse du vent pour site Connecticut :

III.4.1.1 Prédiction par le Réseau de Neurone Profond type LSTM :

Le tableau suivant présente les critères statique pour évaluer notre premier système de prédiction de la vitesse du vent basé sur LSTM où on a varier le nombre d'unités cachées pour la cellule LSTM.

LSTM	RMSE	MAPE	MSE
50 Unités Cachées	0.4047	0.0241	0.0702
100 Unités Cachées	0.3673	0.0214	0.0578
150 Unités Cachées	0.3614	0.0197	0.0560
200 Unités Cachées	0.3499	0.0198	0.0525

Tableau III.3 : Critères statistique pour LSTM- site Connecticut.

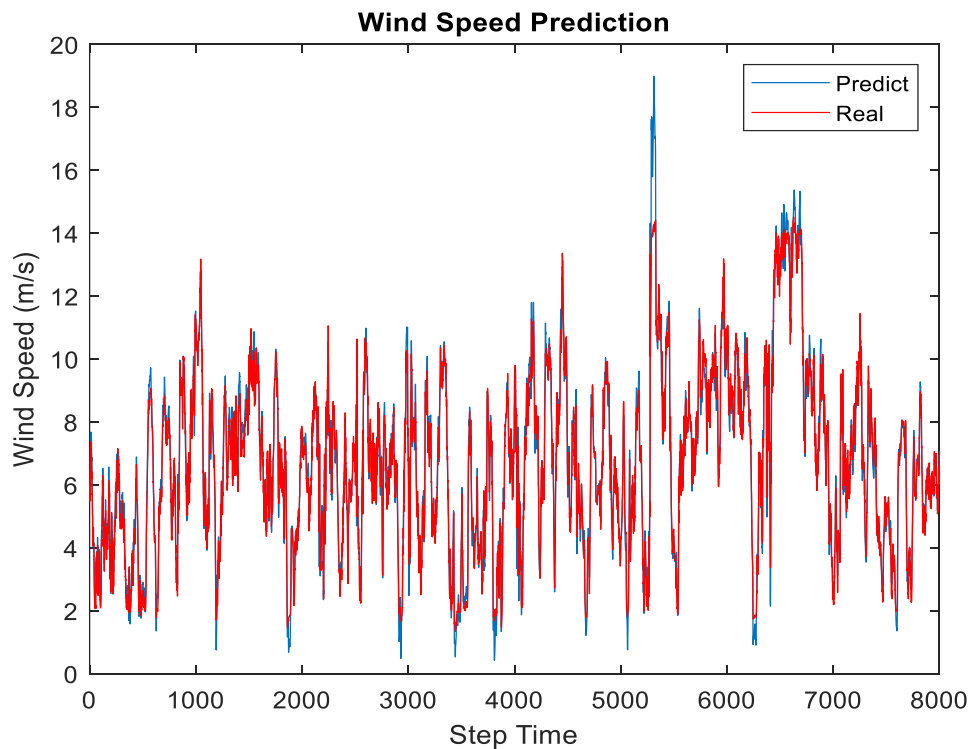


Figure III.2 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 50 unités cachées site Connecticut.

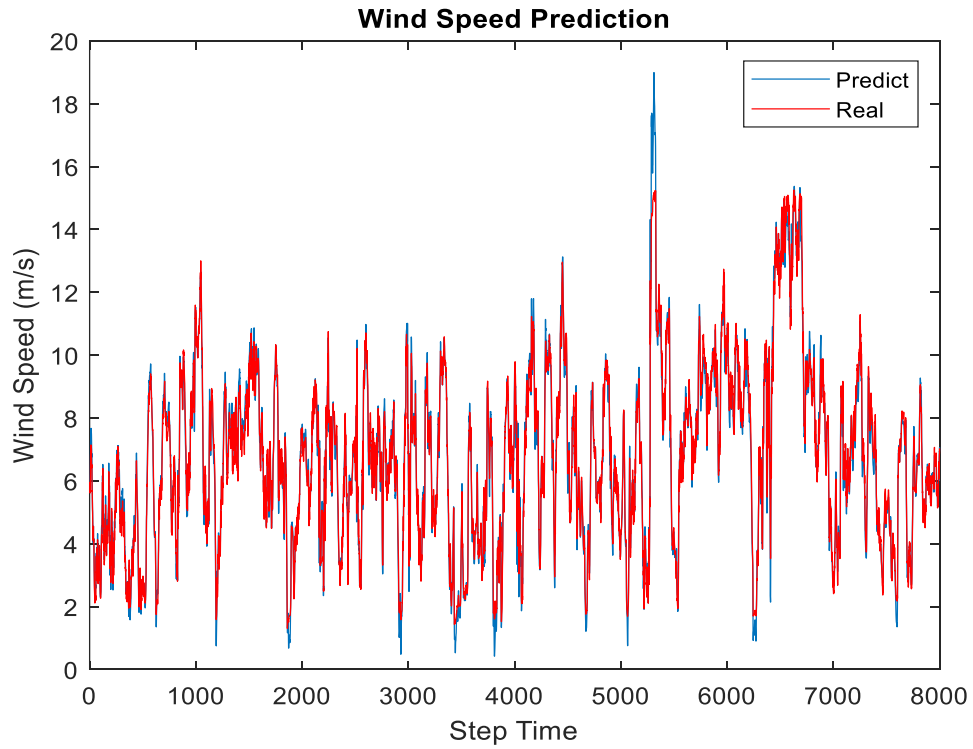


Figure III.3: Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 100 unités cachées site Connecticut.

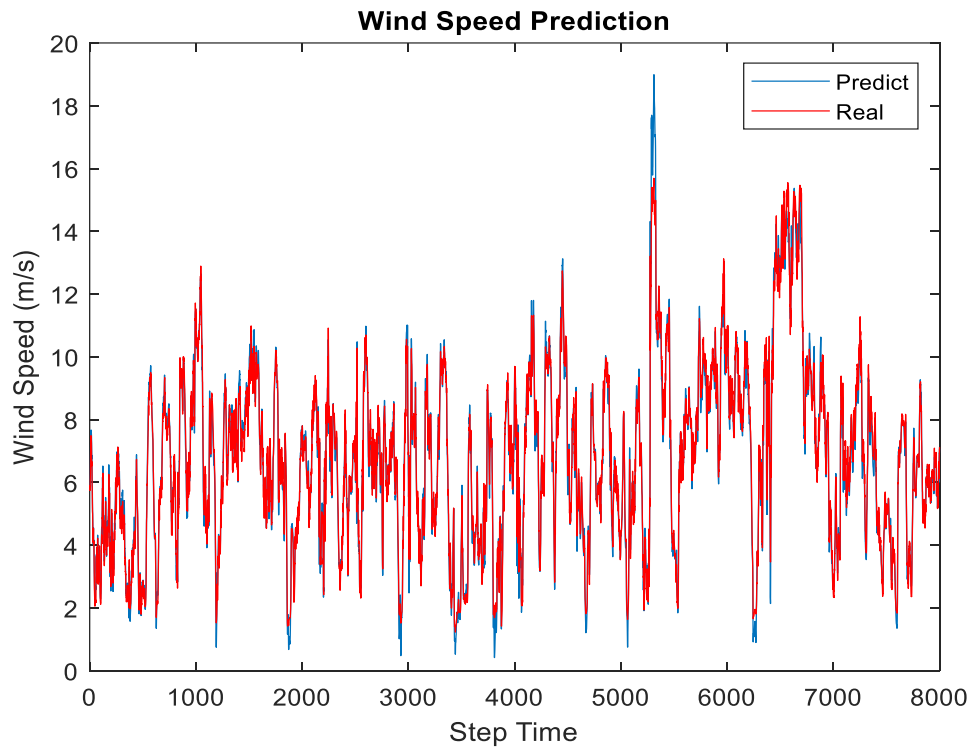


Figure III.4 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 150 unités cachées site Connecticut.

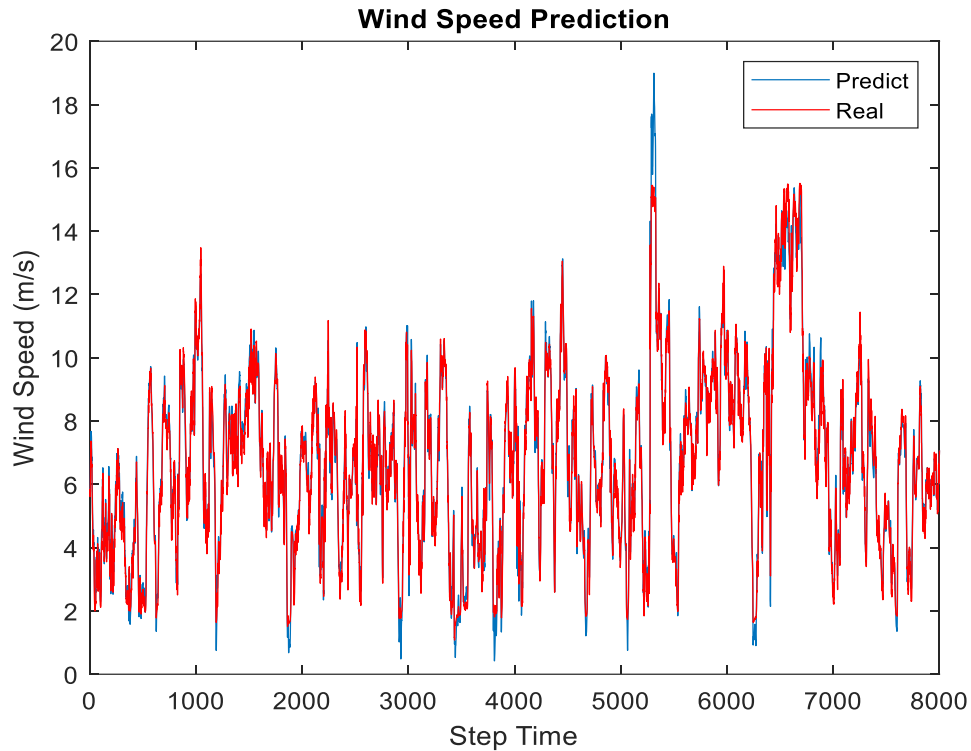


Figure III.5 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 200 unités cachées site Connecticut.

III.4.1.2 Prédiction par le réseau de neurone type MLP :

Le tableau suivant en présente les critères statique pour évaluer notre deuxième système de prédiction de la vitesse du vent basé sur MLP où on a varier le nombre de couches cachées.

MLP	RMSE	MAPE	MSE
1 couche cachée	4.1780	0.0805	0.0012
2 couches cachées	4.1403	0.0800	0.0012
3 couches cachées	4.1082	0.0779	0.0012
3 couches cachées	4.1115	0.0787	0.0012

Tableau III.4 : Critères statistique pour MLP- site Connecticut.

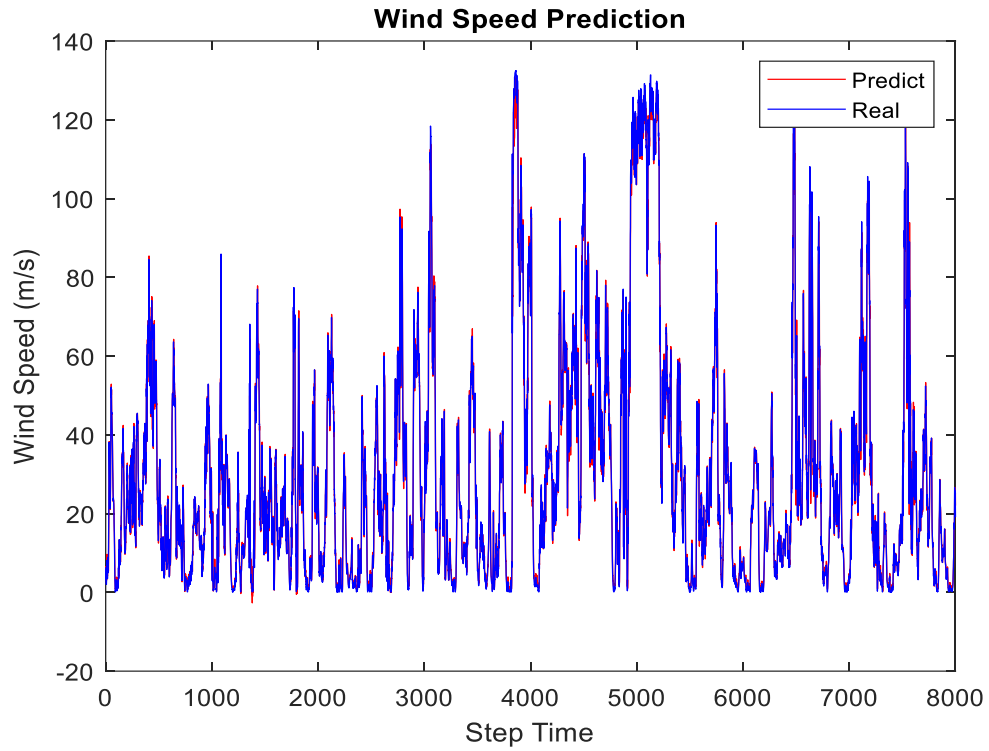


Figure III.6 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 1 couche cachée site Connecticut.

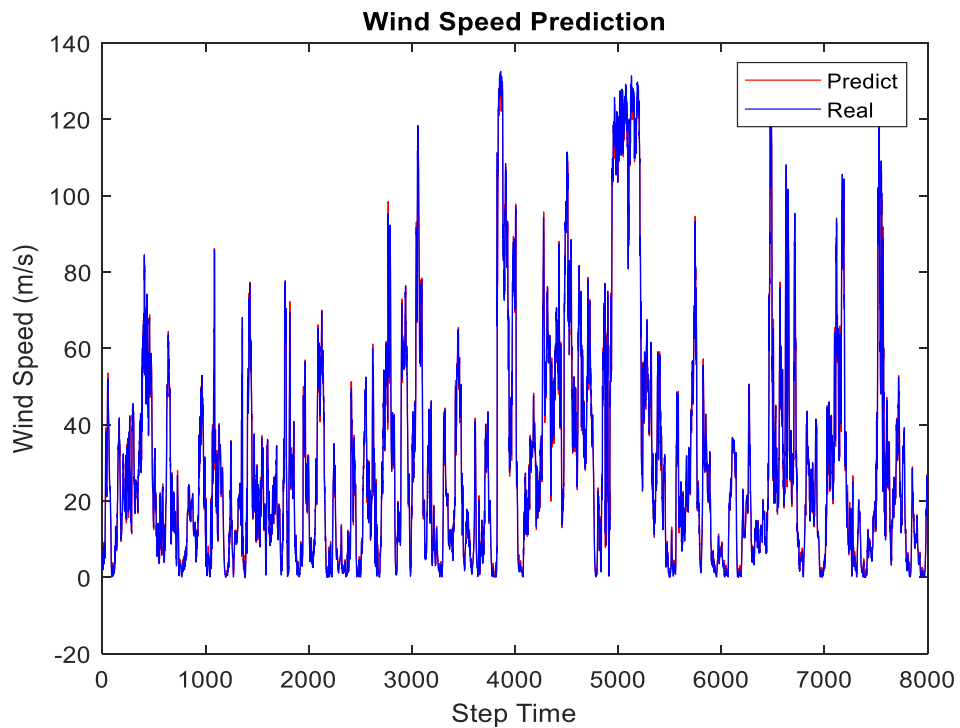


Figure III.7 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 2 couches cachées site Connecticut.

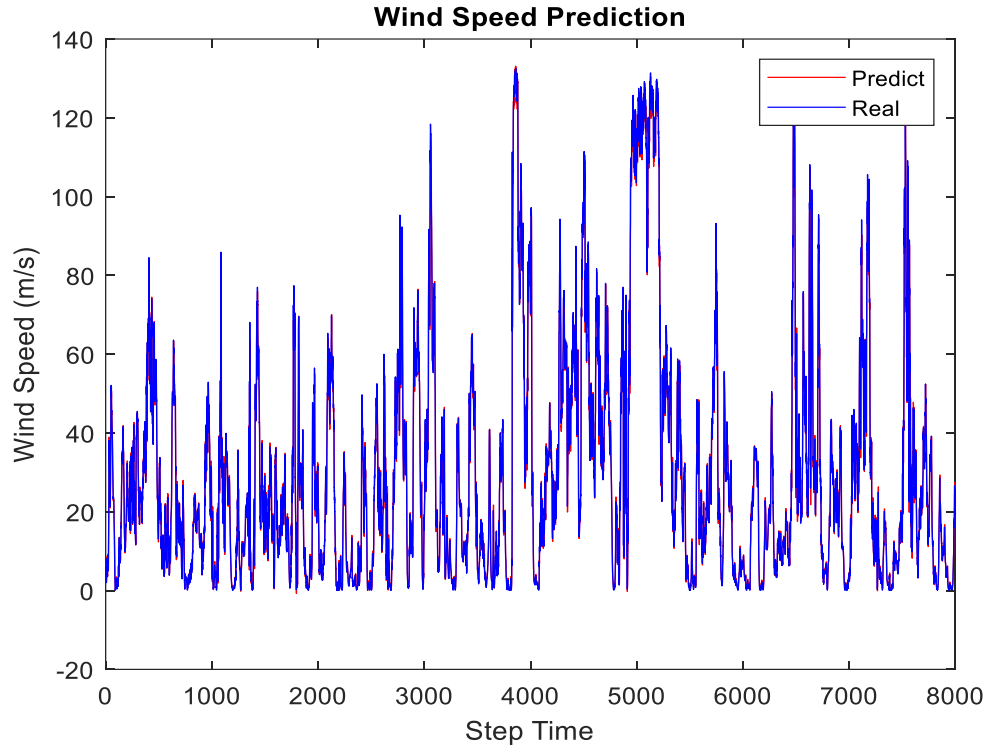


Figure III.8 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 3 couches cachées site Connecticut.

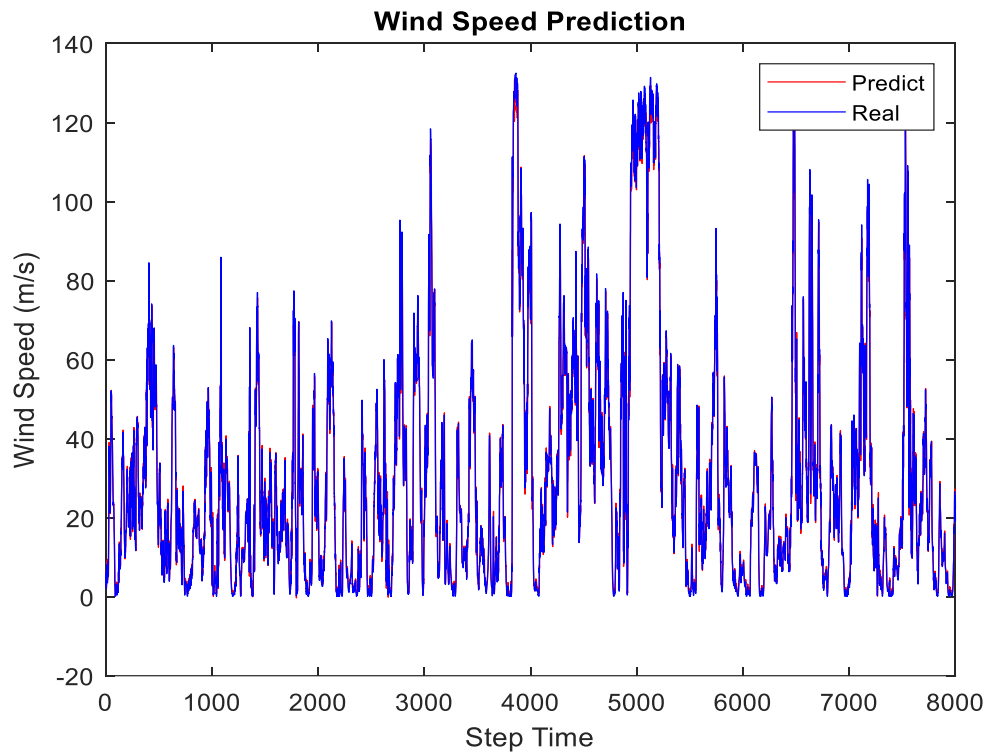


Figure III.9 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 4 couches cachées site Connecticut.

III.4.2 La prédiction de la vitesse du vent pour le site Colorado :

III.4.2.1 Prédiction par le réseau de neurone Profond type LSTM:

Le tableau suivant présente les critères statique pour évaluer notre premier système de prédiction de la vitesse du vent basé sur LSTM où on a varier le nombre d'unités cachées pour la cellule LSTM.

LSTM	RMSE	MAPE	MSE
50 Unités Cachées	0.5997	0.0303	0.1541
100 Unités Cachées	0.5862	0.0285	0.1473
150 Unités Cachées	0.5042	0.0259	0.1090
200 Unités Cachées	0.4915	0.0259	0.1036

Tableau III.5 : Critères statistique pour LSTM- site Colorado.

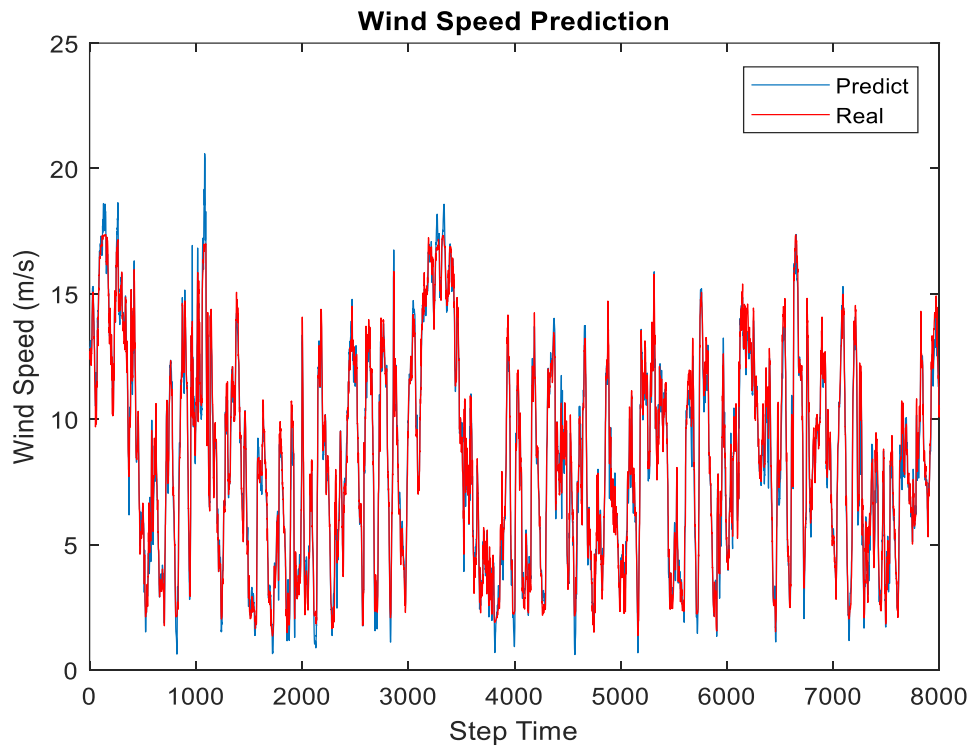


Figure III.10 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 50 unités cachées site Colorado.

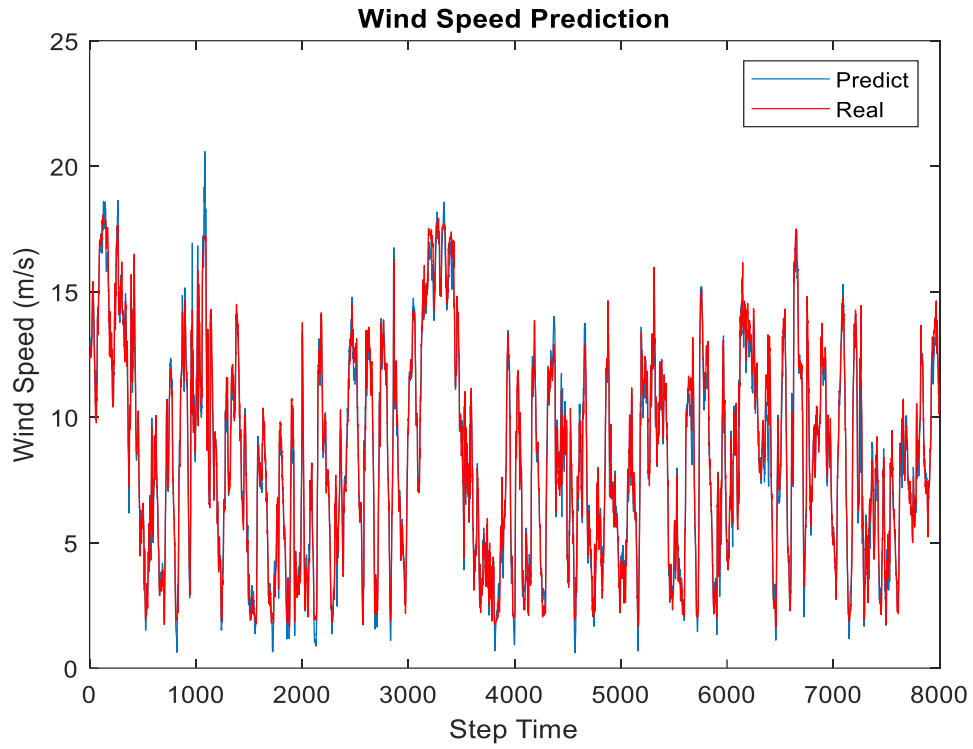


Figure III.11 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 100 unités cachées site Colorado.

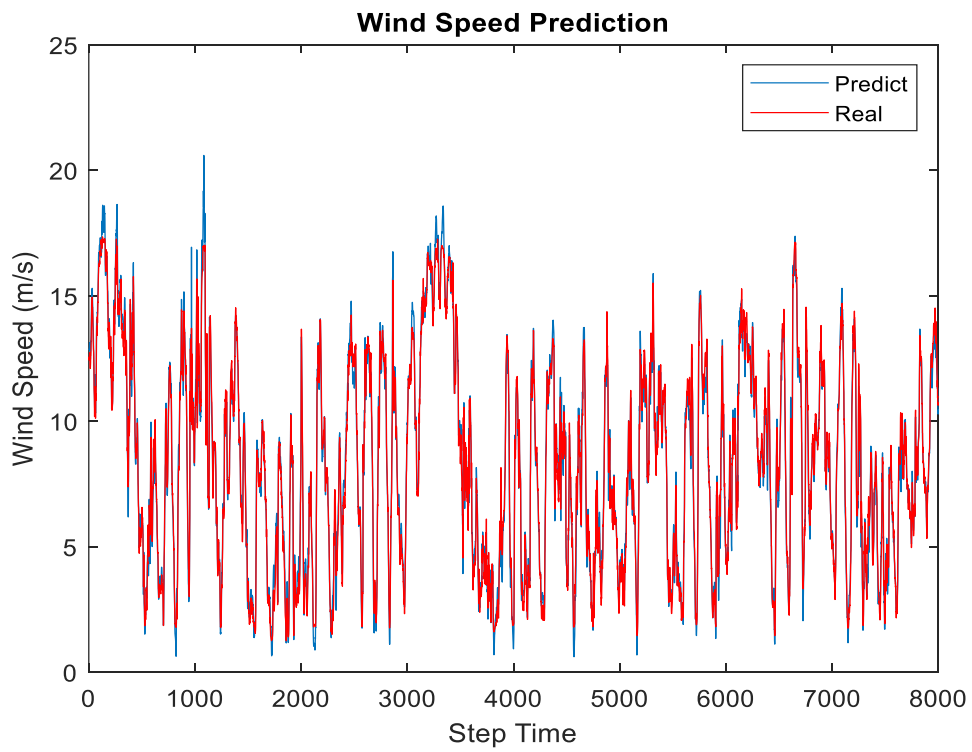


Figure III.12 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 150 unités cachées site Colorado.

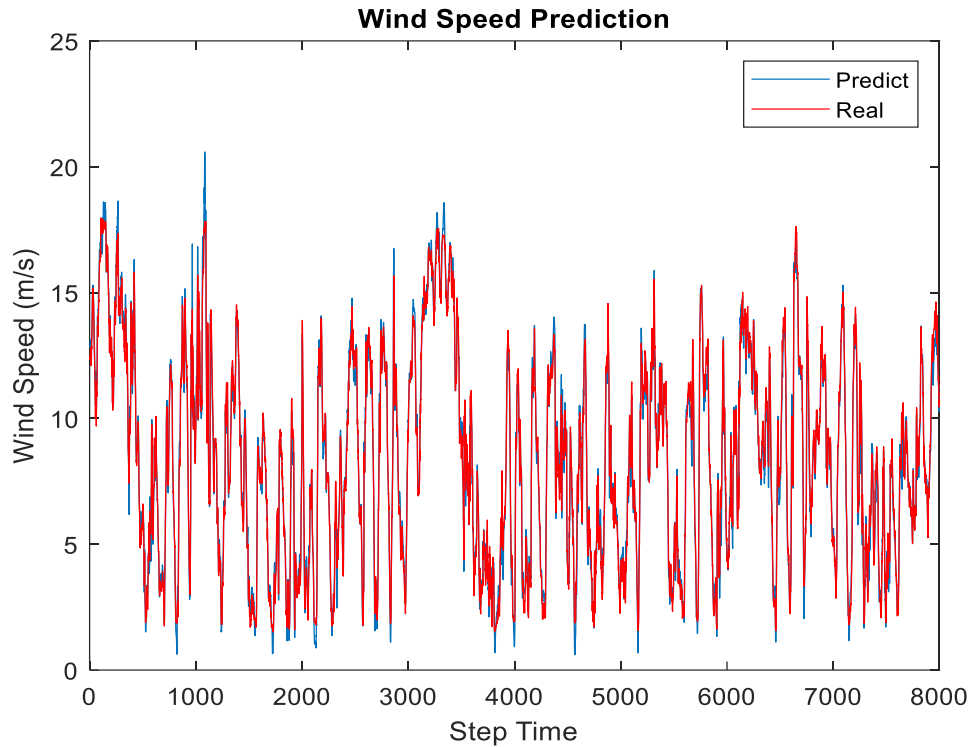


Figure III.13 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNP - LSTM pour 200 unités cachées site Colorado.

III.4.2.2 Prédiction par le réseau de neurone type MLP :

Le tableau suivant en présente les critères statique pour évaluer notre deuxième système de prédiction de la vitesse du vent basé sur MLP où on a varier le nombre de couches cachées.

MLP	RMSE	MAPE	MSE
1 couche cachée	17.7567	0.0431	0.0205
2 couches cachées	17.6658	0.0427	0.0203
3 couches cachées	17.3576	0.0418	0.0196
4 couches cachées	17.6337	0.0427	0.0202

Tableau III.6 : Critères statistique pour MLP- site Colorado.

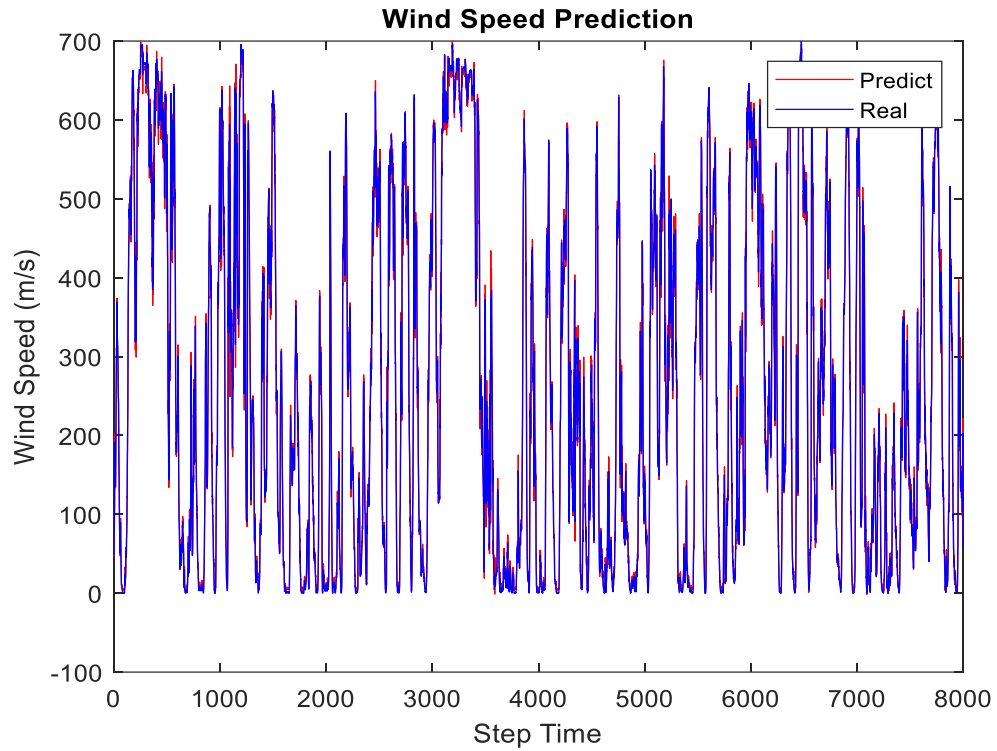


Figure III.14 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 1 couche cachée site Colorado.

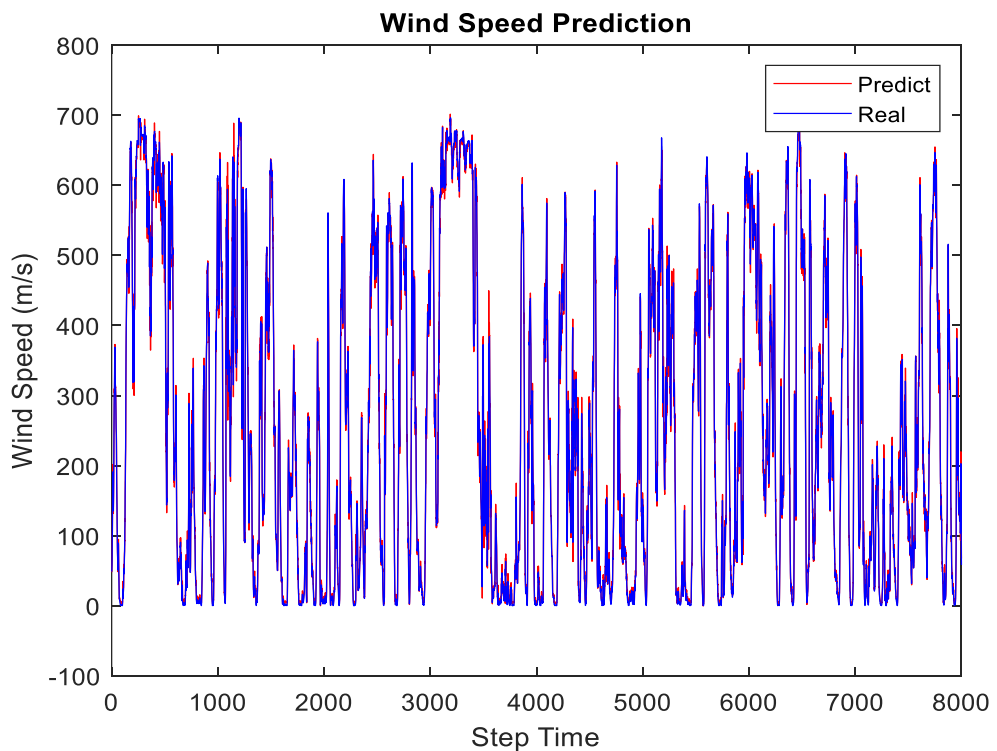


Figure III.15 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 2 couches cachées site Colorado.

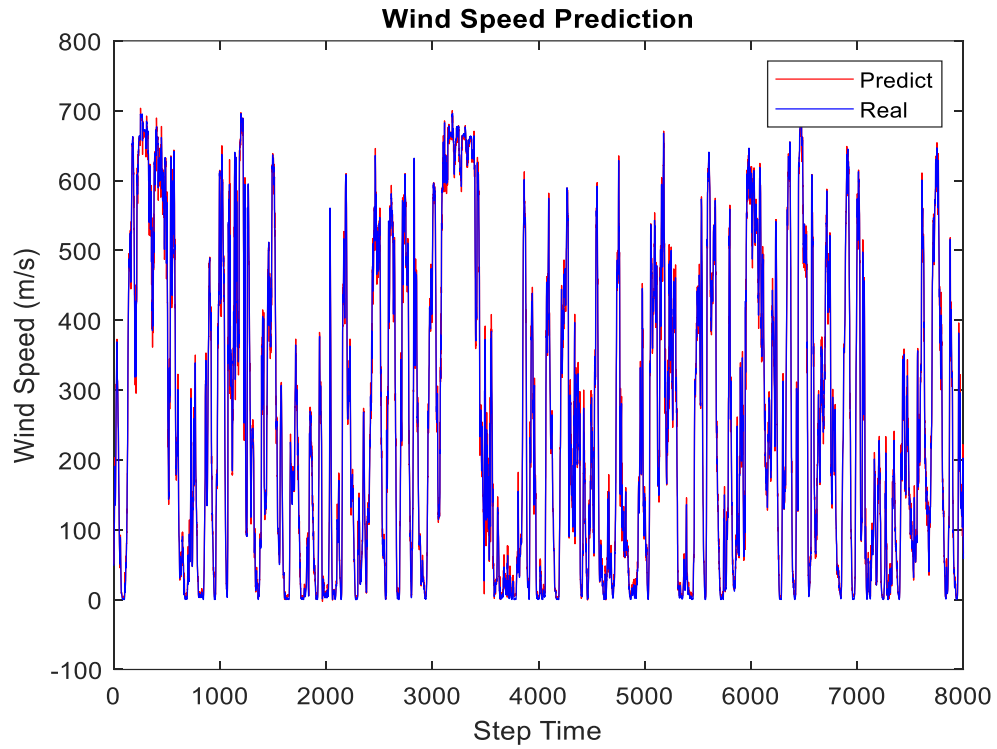


Figure III.16: Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 3 couches cachées site Colorado.

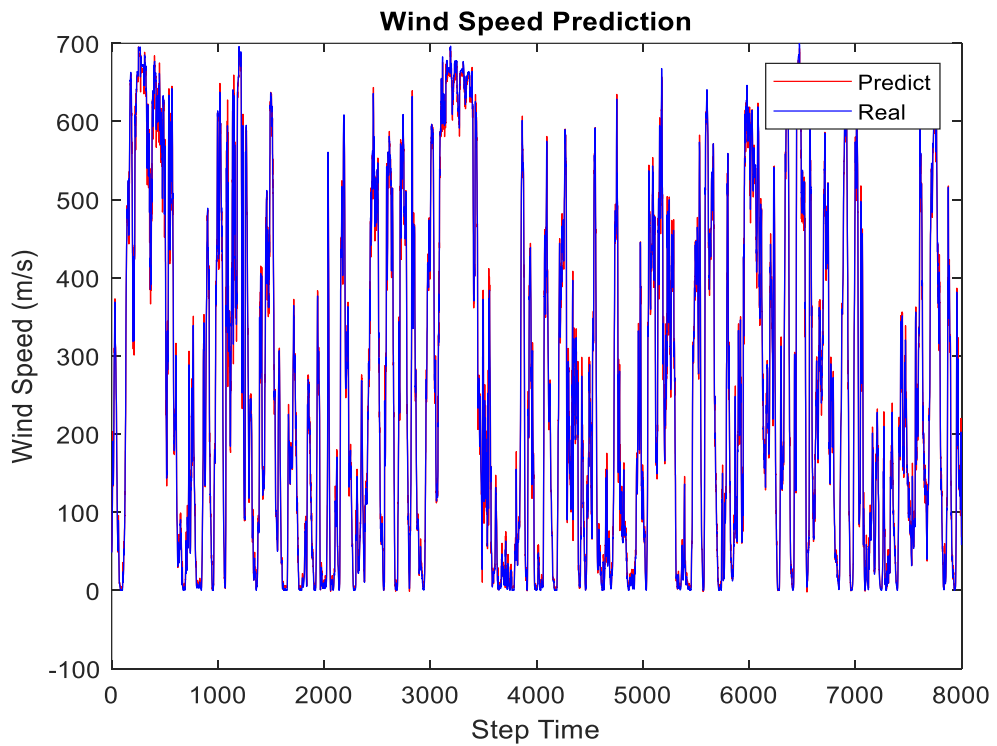


Figure III.17 : Courbes des Valeurs réels et prédites par le RNA - MLP pour 4 couches cachées site Colorado.

D'après les résultats des critères statiques présentés dans les Tableaux III.3, III.4, III.5 et III.6 et les courbes présentés dans les figures III.2 ,III.3, III.4, III.5, III.6 ,III.7, III.8, III.9 III.10, III.11 ,III.12, III.13, III.14 , III.15, III.16 et III.17 on peut dire que le système de prédiction de la vitesse du vent basé sur le réseau de neurones profond de type LSTM peut être vu comme le système le plus précis pour prédire la vitesse du vent dans les deux sites que nous choisis dans notre étude.

Conclusion :

Ce dernier chapitre a fait l'objet d'une étude en simulation concernant la mise en œuvre de la techniques d'apprentissage automatique basé sur les RNA de type-MLP, et DL de type LSTM sont appliquées pour la prédiction de la vitesse du vent.

Cette simulation nous a permis la validation et l'évaluation des performances de chacune de ces méthodes présentées. Une étude comparative dans le but d'un choix décisif de la méthode la mieux adaptée à l'application a été effectuée pour la régression et pour améliorer les performances de la prédiction de la vitesse du vent, nous avons calculer les critères de performances RMSE, MAPE et MSE pour chaque technique et aussi on a présenter les courbes réels et prédite pour chaque site étudier Colorado et Connecticut.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire, l'objectif principal c'est d'utiliser des différentes techniques d'apprentissage automatique basé sur les Réseaux de Neurones Artificiel et Profonds à la régression dans le domaine de prédiction de la vitesse du vent , Nous avons montré lors de cette étude, les performances pour chaque type . Dans l'objectif est de découvrir laquelle des techniques est la plus efficace, dans ce domaine à partir d'une étude comparative. Pour cette raison une simulation à l'aide du logiciel MATLAB à été effectuée pour deux site de données réelles situé en USA.

La discussion des résultats obtenus est liés à les critères statique suivants Racine carrée de l'Erreur Quadratique Moyenne (RMSE), Erreur Quadratique Moyenne (MSE) et Erreur Moyenne de Pourcentage Absolue (MAPE) pour les deux systèmes de prédiction basé sur les RNA type MLP, et les RNP type LSTM nous avons pu noter pour que la système de prédiction basé sur le réseau LSTM a fourni de très bons résultats de simulation en donne une mémoire dynamique à notre système de prédiction et pour l'autre technique les résultats de simulation sont acceptables.

Généralement, l'utilisation de ces techniques nous permet d'obtenir des valeurs futures bien précises concernant la vitesse du vent et par conséquent une meilleur prédiction de la valeur de la vitesse du vent.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Mahieddine HACIL, " Amélioration des Performances des Energies Eoliennes" These Présentée Pour Obtenir Le Diplôme De Doctorat En Science S En Electrotechniqu. Universite Mentouri – Constantine 2012.
- [2] N . R.. Abedi, «Modelling And Simulation Of Micro Turbine Generation System For On - Grid And Off - Grid Operation Modes», International Conference On R Enewable Energies And Power Quality (Icrepq'09) Valencia (Spain), 15th To 17th April, 2009
- [3] KATTEL AHCEN «Amélioration Des Performancesd'un System Eoliennes Par L'introduction Dune Source Solaire » Université Dhalebde Blida De Setif, Mémoire De Master.
- [4] Boyette. A: Contrôle-Commande D'un Générateur Asynchrone A Double Alimentation Avec Système De Stockage Pour La Production Eolienne. Thèse De Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy (France), 2006
- [5] Site web : <http://tpe-si-2011.e-monsite.com>.
- [6] S. Lazaar, mémoire de Magister « Contribution à l'étude d'une station éolienne pour la production de l'électricité. Application aux sites de Tlemcen, Djelfa et Ghardaïa » Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelable URMER Tlemcen.2009.
- [7] <http://www.éolienne> , « Un article de Wikipédia, l'encyclopédie libre » Article de Scientific American sur l'invention de Brush (1890).
- [8] Adam MIRECKI , « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance »,Thèse de doctorat , L'institut National Polytechnique de Toulouse avril 2005.
- [9] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.
- [10] Site web : <http://www.planetoscope.com>.
- [11] Nachida KASBADJI MERZOUK , « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » ,Thèse de doctorat, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2006.

- [12] M. Said and A. Ibrahim, «Energy in the Arab World’, Energy» Vol. 9, N°3, pp. 217-238, 1984.
- [13] H. Bensaid, « The Algerian Programme on Wind Energy ». Proceeding of WEAC, pp. 21-27, Oxford, 1985.
- [14] R. Hammouche , « Atlas Vent de l’Algérie/ONM » Office des Publications Universitaires (OPU), Alger 1990.
- [15] N. Kasbadji merzouk , « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
- [16] F. Youcef Ettoumi, « Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie », Thèse de doctorat d’état, USTHB, 2002.
- [17] eolien.les.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm.
- [18] S El Aimani, « Modélisation des différentes technologies d’éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l’université des sciences et technologies de Lille (USTL).
- [19] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l’art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [20] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED «Le Génie Electrique dans le vent : état de l’art et recherches dans le domaine de la génération éolienne » JCGE'03, Saint Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [21] LATRECHE Mohammed Tahar "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien" ,Université Ferhat Abbas de Setif UFAS - ALGERIE, Mémoire de Magister.
- [22] Melloul. A: Simulation et diagnostic d’une machine asynchrone à double alimentation d’une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, Sétif (Algérie), 2011 .dans un Réseau de Distribution Insulaire”, Thèse de Doctorat, Université d'Artois décembre 2004.
- [23] M. Chemachema, "Contribution à la commande adaptative neuronale floue des systèmes non linéaires". Thèse de doctorat en électronique option contrôle des systèmes. Université Constantine 2007.
- [24] D. Guérette, "Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien diesel à haute pénétration". Thèse maîtrise en ingénierie présenté à Université Québec à Rimouski, pp 12 Novembre 2010.

- [25] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.
- [26] Khelfat Lotfi "Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone. Doublement Alimentée" université badji mokhtar- Annaba mémoire de master.
- [27] PIERRE BOUCHER, Le Vent et ses caprices (<http://www.Le Vent - Wind.com>).
- [28] Bernard MULTON « Aérogénérateurs électriques » Master Recherche Equipe SETE Module C16. STS IST Paris – ENS Cachan 2007.
- [29] Bernard MULTON, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, Xavier ROBOAM, Stéphan ASTIER, Brayima DAKYO, Cristian NICHITA. Etat de l'art dans les aérogénérateurs électriques, Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002.
- [30] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat à laboratoire d'électrotechnique et d'électronique industrielle de L'ENSEEIH, Université de Toulouse 5 Avril 2005.
- [31] N. KASBADJI MERZOUK et M. MERZOUK « Perspectives du pompage éolien en ALGERIE », Projet National de recherche, domicilié au CDER Alger 2008.
- [32] Goodfellow, I., Bengio, and Courville, deep learning. MIT Press, 2016.
- [33] M. A. Ammar, " Mise en oeuvre de réseaux de neurones pour la modélisation de cinétiques réactionnelles en vue de la transposition batch/continu, " Thèse de doctorat de l'I.N.P. – Toulouse – 194 p, 2007.
- [34] (Ackley et al., 1985) D. H. Ackley, G. E. Hinton, et T. J. Sejnowski, 1985. A learning algorithm for boltzmann machines. Cognitive Science 9, 147–169.
- [35] P.K. Simpson. « Artificial Neural Systems », Pergmon Press Elmsford, New York, 1989.
- [36] : G. A. Harrison, J. M. Tanner. « Human biology: An Introduction to human evolution » Oxford science publication, 1998.
- [37] S. Chabaa, " Identification des systèmes non linéairement utilisant les techniques d'intelligence artificielles et les bases de fonctions de la guerre pour la modélisation des données du trafic dans les réseaux internet, " Thèse de Doctorat, Université Cadi Ayyad, Faculté des Sciences Semlalia – Marrakech. 187 p, 2011.
- [38] : M. Parizeau. « Réseaux de neurones », GIF-21140 et GIF-64326, Université Laval, Automne 2004.
- [39] Y. Moualek Djaloul, "Deep Learning pour la classification des images", Mémoire de

master, Université de Tlemcen, Algérie, 2017.

[40] H. Tolgui, " Deep learning par reconnaissances du visage ", mémoire de master, université du Biskra, Algérie, 2018.

[41] FUKUSHIMA Kunihiko, MAYAKE Sei. Neocognitron: a self-organizing neural network model for a mechanism of visual pattern recognition. 1982.

[42] HUBEL David hunter, WIESEL Torsten nils. Ferrier lecture-functional architecture of macaque monkey visual cortex. 1977.

[43] LECUN Yann, BOTTOU Leon, BENGIO Yoshua, HAFFNER Patrick. Gradient-based learning applied to document recognition. 1998.

[44] Rougier, Nicolas P, 2000. Modèles De Mémoires Pour La Navigation Autonome. Thèse De Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy [https://Tel.Archives-Ouvertes.Fr/Tel-00602997/Document](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00602997/document)

[45] CIRESAN Dan C, MEIER Ueli, MASCI Jonathan, MARIA GAMBARDELLA Luca, SCHIDHUBER Jurden. Flexible, high performance convolutional neural networks. for image classification. 2011.

[46] O'SHEA Keiron, NASH Ryan. An introduction to convolutional neural networks. 2015.

[47] TensorFlow for Deep Learning. Reza Bosagh Zadeh, Bharath Ramsundar. 2017.

[48] The Vanishing Gradient Problem During Learning Recurrent Neural Nets And Problem Solutions. Sepp Hochreiter. International Journal. of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems.

[48] <https://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>.

ملخص :

طاقة الرياح هي طاقة متجددة مستمدة من الريح. أصبحت هذه الطاقة أهم طاقة متجددة من حيث النمو المستخدم في العالم

نظرًا لأن إنتاج طاقة الرياح يرتبط بتغير سرعة الرياح ، فقد أصبح التنبؤ بالأخير مرحلة أساسية في الشبكة الكهربائية وأيضًا للاستغلال السليم لطاقة الرياح. يمكن استخدام سرعة الرياح لتصميم مزارع الرياح ، تقدير إمكانات طاقة الرياح..الخ

في هذا العمل ، سوف نستخدم الشبكات العصبية العميقة للتنبؤ بسرعة الرياح. هدفنا هو معالجة سلسلة زمنية من البيانات المقاسة للتنبؤ بالقيم المستقبلية لسرعة الرياح

الكلمات المفتاحية: الذكاء الاصطناعي ، الشبكات العصبية الاصطناعية ، التعلم العميق ، الشبكات العصبية العميقة ، السلسلة الزمنية ، التنبؤ ، سرعة الرياح

Résumé :

L'énergie éolienne est l'énergie renouvelable tirée du vent. Cette énergie est devenue l'énergie renouvelable la plus importante en termes de croissance d'utilisation dans le monde.

Du fait que la production de l'énergie éolienne est liée aux variations de la vitesse du vent, la prédiction de cette dernière est devenue une étape essentielle réseau électrique et aussi pour une bonne exploitation de l'énergie éolienne. vitesse du vent peuvent être utilisées pour la conception des parcs éoliens, estimation du potentiel énergétique éolien,etc.

Plusieurs modèles de prédictions ont été développés sur un site. à titre d'exemple on peut citer les réseaux de neurones artificiels ...etc.

Dans ce travail on va utiliser les Réseaux de Neurones Profonds pour prédire la vitesse du vent. Notre objectif c'est de traiter une série temporelle de données mesurées prédire les valeurs futures de la vitesse du vent.

Mots clés : Intelligence Artificielle, Réseaux de Neurones Artificiels, Deep Learning, Réseaux de Neurones Profonds, Série Temporelles, Prédiction, Vitesse du Vent.

Abstract :

Wind energy is renewable energy drawn from the wind. This energy has become the most important renewable energy in terms of growth in use in the world.

Because the production of wind energy is linked to the variation of wind speed, the prediction of this has become an essential step in the electrical network and also for a good exploitation of wind energy. wind speed can be used for the design of wind farms, estimation of wind energy potential, etc.

Several prediction models have been developed on one site. as an example we can quote artificial neural networks ... etc.

In this work we will use Deep Neural Networks to predict wind speed. Our goal is to process a time series of measured data to predict future values of wind speed.

Keywords: Artificial Intelligence, Artificial Neural Networks, Deep Learning, Deep Neural Networks, Time Series, Prediction, Wind Speed.