



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi –Tébessa–

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de génie électrique



## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

# Commande basée sur réseau de neurone d'une éolienne à GSAP

Présenté par :

Mr : Zerroud Brahim

Présenté et soutenu publiquement, le devant le jury composé de :

M. Metatla Samir	MAA	Président
M. Yousfi laatra	MCA	Examinatrice
M. Nehal Ouassila	MAA	Rapporteuse

Promotion : 2021/2022

# Remerciements

Je remercie Dieu le tout-puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, je tiens à remercier s'adresse à M. Nehal Ouassila -Rapporteuse- maître assistante classe A à l'université Larbi Tebessi -Tébessa-, pour son aide scientifique et son soutien moral et ses encouragements.

Je suis très sensible à l'honneur que m'ont fait les membres de jury, M. Metatla Samir -Président- maître assistant classe A et M. Yousfi Elatra -Examinatrice- maître de conférences classe A à l'université Larbi Tebessi- Tébessa- En acceptant d'en faire partie pour juger ce travail.

Trouvent ici l'expression de mon profond respect, que tous ceux et celles qui m'ont aidé de près ou de loin durant tout notre travail.

Je souhaite à toute une grande réussite sur tous les plans, votre souvenir restera à jamais gravé dans nos mémoires et dans nos cœurs.

Ibrahim Zerroud

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

**Moi seulement**

Ibrahim

# Sommaire

# Sommaire

Sommaire	I
Liste des Figures	II
Liste des Tableaux	III
Liste des symboles	VI
Introduction générale	1
<b>Chapitre 01 : Généralités sur l'éolienne</b>	
<b>1.1 Introduction</b>	4
<b>1.2 Différents types d'énergies renouvelables</b>	4
1.2.1 Énergie solaire photovoltaïque	4
1.2.2 Énergie hydraulique	4
1.2.3 Énergie Biomasse	5
1.2.4 Énergie Géothermie	5
1.2.5 Énergie éolienne	5
<b>1.3 Généralité sur l'énergie éolienne</b>	5
1.3.1 Historique de l'éolien	5
1.3.2 Perspectives mondiales de l'éolien	6
1.3.3 Énergie éolienne en Algérie	8
1.3.4 Énergie éolienne en Adrar	9
<b>1.4 Notion théorique sur l'éolien</b>	12
1.4.1 Définition d'éolienne	12
1.4.2 Taille des aérogénérateurs	13
1.4.3 Classification des éoliennes	13
1.4.3.1 Générateurs éoliens selon la gamme de puissance	13
1.4.3.2 Classification selon l'axe	14

<b>1.4.3.2.1 Eoliennes à axe vertical</b>	14
➤ <b>Rotor de DARRIEUS</b>	15
➤ <b>Rotor de SAVONIOS</b>	15
➤ <b>Le système mixte SAVONIUS_DARRIEUS</b>	16
<b>A) Avantages d'éolienne à axe vertical</b>	17
<b>B) Inconvénient d'éolienne à axe vertical</b>	17
<b>1.4.3.2.2 Eoliennes à axe horizontal</b>	17
➤ <b>Turbine avant la nacelle (amont)</b>	18
➤ <b>Turbine derrière la nacelle (aval)</b>	19
<b>A) Avantages d'éolienne à axe horizontal</b>	19
<b>B) Inconvénient d'éolienne à axe horizontal</b>	19
<b>C) Principaux composants d'une éolienne à axe horizontale</b>	20
<b>1.4.3.3 Classification selon la vitesse :</b>	23
➤ <b>Les éoliennes à vitesse fixe</b>	23
<b>A) Avantage des éoliennes à vitesse fixe</b>	23
➤ <b>Les éoliennes à vitesse variable</b>	24
<b>A) Avantage des éoliennes à vitesse variable</b>	24
<b>1.5 Notion théorique sur le vent</b>	25
<b>1.5.1 Le vent</b>	25
<b>1.5.2 La direction du vent</b>	25
<b>1.5.3 La vitesse du vent</b>	26
<b>1.6 Les pales</b>	26
<b>1.6.1 Nombre des pales</b>	26
<b>1.6.2 Bilan des forces exercées sur une pale</b>	27
<b>1.7 Principe de conversion d'énergie et le fonctionnement général d'une éolienne</b>	27
<b>1.8 Applications des éoliennes</b>	29

<b>1.9 Zones de fonctionnement de l'éolienne</b>	30
<b>1.10 Systèmes de régulation mécanique de la turbine éolienne</b>	31
<b>1.10.1 Régulation par décrochage aérodynamique passif « Passive Stall »</b>	31
<b>1.10.2 Régulation par décrochage aérodynamique actif « active stall » ou « combi stall »</b>	32
<b>1.10.3 Régulation par variation du calage des pales « pitch control »</b>	32
<b>1.11 Sécurité par grand vent</b>	33
<b>1.12 Conclusion</b>	33
<b>Chapitre 02 : Les réseaux de neurones</b>	
<b>2.1 Introduction</b>	34
<b>2.2 Historique</b>	34
<b>2.3 Concepts et définitions</b>	35
<b>2.3.1 Le neurone biologique</b>	35
<b>2.3.2 Communication entre neurones</b>	36
<b>2.3.3 Le neurone artificiel</b>	37
<b>2.4 Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel</b>	39
<b>2.4.1 Entrées</b>	39
<b>2.4.2 Les principales fonctions d'activation</b>	39
<b>2.4.3 Fonction de sortie</b>	41
<b>2.5 Réseaux de neurones artificiels</b>	41
<b>2.5.1 Définition</b>	41
<b>2.5.2 Composition d'un réseau de neurones</b>	42
<b>2.5.3 Architecture (topologie) des réseaux de neurones</b>	42
<b>2.5.3.1 Les réseaux de neurones statiques (Non Boucles)</b>	43
<b>2.5.3.2 Réseau de neurones bouclé (feed-back)</b>	44

<b>2.5.4 Propriétés des réseaux de neurones</b>	45
<b>2.5.5 Quelques modèles des réseaux de neurones</b>	46
➤ <b>Perceptron simple</b>	46
➤ <b>Réseau auto-organisateur (réseau de Kohonen)</b>	47
➤ <b>Perceptron Multicouches (MLP)</b>	49
➤ <b>Le modèle de Hopfield</b>	50
<b>2.5.6 Apprentissage des réseaux de neurones</b>	50
<b>2.5.6.1 Les types d'apprentissage</b>	50
➤ <b>Apprentissage supervisée</b>	51
➤ <b>Apprentissage non supervisé</b>	51
➤ <b>Apprentissage Renforcé</b>	52
<b>2.5.7 Règles d'apprentissage</b>	52
➤ <b>Règle de correction d'erreur (règle de Widrow-Hoff)</b>	52
➤ <b>Règle de Boltzmann</b>	52
➤ <b>Règle de Hebb</b>	53
➤ <b>Règle d'apprentissage par compétitions</b>	53
➤ <b>La règle de rétro-propagation</b>	53
<b>2.6 Domaine d'application des réseaux de neurones</b>	54
<b>2.6.1 Classification des signaux</b>	54
<b>2.6.2 Identification des processus</b>	54
<b>2.6.3 Contrôle de système</b>	54
<b>2.6.4 Problèmes de diagnostic</b>	54
<b>2.7 Test et évaluation</b>	55
<b>2.8 Avantages plus inconvénient et limites des réseaux de neurones</b>	55
<b>2.8.1 Les Avantage</b>	55
<b>2.8.2 Les inconvénients</b>	56

<b>2.8.3 Limites</b>	56
<b>2.9 Conclusion</b>	57
<b>Chapitre 03 : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne</b>	
<b>3.1 Introduction</b>	58
<b>3.2 Modélisation de la partie mécanique du système éolienne</b>	59
<b>3.2.1 Conversion de l'énergie éolienne</b>	59
<b>3.2.1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique</b>	59
<b>3.2.1.2 Loi de Betz</b>	60
➤ <b>Démonstration de la loi de BETZ</b>	61
<b>3.2.1.3 La vitesse spécifique ou normalisée</b>	62
<b>3.2.1.4 Coefficient de puissance</b>	63
<b>3.2.1.5 La production d'énergie mécanique</b>	64
<b>3.2.2 Modélisation du système éolienne</b>	65
<b>3.2.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine</b>	65
<b>3.2.2.2 Modèle du vent</b>	66
<b>3.2.2.3 Modélisation des pales</b>	66
<b>3.2.2.4 Les étapes de la modélisation du système éolienne</b>	67
➤ <b>Modélisation de la turbine</b>	68
➤ <b>Modèle de multiplicateur</b>	69
➤ <b>Modèle de l'arbre de transmission</b>	70
➤ <b>Le schéma bloc de la turbine</b>	73
<b>3.2.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne</b>	73
<b>3.2.3.1 Objectifs de la commande</b>	73

<b>3.2.3.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)</b>	74
➤ MPPT sans asservissement de vitesse	74
➤ MPPT avec asservissement de vitesse	77
<b>3.3 Modélisation de la partie électrique du système éolienne :</b>	79
<b>3.3.1 Hypothèses simplificatrices</b>	79
<b>3.3.2 Description</b>	80
<b>3.3.3 Mise en équation de la machine synchrone à aimants permanents</b>	81
<b>3.3.3.1 Les équations dans le système triphasé (a, b, c)</b>	81
➤ Equations électriques	81
➤ Equations des flux (magnétique)	82
<b>3.3.3.2 Les équations dans le système biphasé (d,q)</b>	84
➤ Transformation de Park	84
➤ Equation des flux au système biphasé (d, q)	86
➤ Équation des tensions dans le système biphasé (d, q)	87
➤ Expression de la puissance	88
➤ Couple électromagnétique	89
➤ Equations mécaniques	90
<b>3.4 La commande vectorielle</b>	91
<b>3.4.1 Principe et structure de la commande vectorielle de la génératrice</b>	91
<b>3.4.2 Décomposition des tensions</b>	92
<b>3.4.3 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle</b>	92
➤ Avantages de la commande vectorielle	92
➤ Inconvénients de la commande vectorielle	92

<b>3.5 Conclusion</b>	93
<b>Chapitre 04 : Simulation et résultats</b>	
<b>4.1 Introduction</b>	94
<b>4.2 L'outil Matlab</b>	94
4.2.1 Le rôle de Matlab	94
4.2.2 Simulink	95
<b>4.3 La simulation</b>	96
<b>4.3.1 Simulation de la partie mécanique de système éolienne</b>	96
4.3.1.1 Le profil du vent	96
4.3.1.2 La turbine	98
➤ Courbes caractéristiques des turbines éoliennes	98
4.3.1.3 Le multiplicateur	101
4.3.1.4 L'arbre de transmission	1021
4.3.1.5 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT)	102
4.3.1.5 .1 Simulation de MPPT sans asservissement de vitesse	103
4.3.1.5 .2 Simulation de MPPT avec asservissement de vitesse	103
➤ Simulation de réseau de neurones	104
A) Choix du type de réseau de neurones	104
➤ Réalisation le correcteur de réseau de neurones	105
4.3.1.6 Schéma de simulation de la partie mécanique	107
<b>4.3.2 Simulation de la partie électrique de système éolienne</b>	107
4.3.2.1 La commande vectorielle	107
4.3.2.2 La GSAP	109
4.3.2.2 La puissance électrique	110
<b>4.4 Les résultats</b>	111
<b>4.4.1 Programmes et paramètre du système</b>	111

<b>4.4.1.1 Le programme de réseau de neurones</b>	111
<b>4.4.1.2 Le programme de système éolien</b>	111
<b>4.4.1.3 Les paramètres de système éolien</b>	112
<b>4.4.1.4 Les résultats après l'exécution</b>	113
<b>4.4.1.4.1 La comparaison entre les techniques de la maximisation de la puissance</b>	113
<b>4.4.1.4.1.1 La partie mécanique</b>	113
➤ <b>Par rapport à les couples <math>C_g</math> et <math>C_{em\_opt}</math></b>	113
➤ <b>Par rapport à les vitesses <math>\Omega_{mec\_ref}</math> et <math>\Omega_{mec}</math></b>	116
<b>4.4.1.4.1.2 La partie électrique</b>	119
<b>4.5 Conclusion</b>	122
<b>Conclusion générale</b>	123
<b>Bibliographie</b>	125

# Liste des figures

# Liste des figures

Figures	Titres	Pages
<b>Figure 1.1</b>	Production mondiale de l'énergie éolienne en GW	<b>7</b>
<b>Figure 1.2</b>	Classement des dix premiers acteurs de l'énergie éolienne en 2008	<b>7</b>
<b>Figure 1.3</b>	Principaux producteurs d'électricité éolienne dans le monde en 2016	<b>7</b>
<b>Figure 1.4</b>	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent et la densité d'énergie en Algérie (2009-2010)	<b>8</b>
<b>Figure 1.5</b>	Les cinq zones ventées en Algérie	<b>9</b>
<b>Figure 1.6</b>	La rose du vent d'Adrar	<b>10</b>
<b>Figure 1.7</b>	Vitesses moyenne annuelle du vent du site Adrar	<b>10</b>
<b>Figure 1.8</b>	Vitesse du vent mesurée au 30 janvier 2014 (Adrar)	<b>10</b>
<b>Figure 1.9</b>	Montrée la station éolienne de Kaberten et la turbine Gamesa G52 (850 kW)	<b>11</b>
<b>Figure 1.10</b>	Turbine éolienne à base MSAP, URERMS, à Adrar	<b>12</b>
<b>Figure 1.11</b>	taille d'éolienne et la puissance	<b>13</b>
<b>Figure 1.12</b>	Éoliennes à axe vertical	<b>15</b>
<b>Figure 1.13</b>	Rotor de SAVONIOS	<b>16</b>
<b>Figure 1.14</b>	Éoliennes à axe horizontal	<b>18</b>
<b>Figure 1.15</b>	Éolienne amont horizontale	<b>18</b>
<b>Figure 1.16</b>	Éolienne aval horizontale	<b>19</b>
<b>Figure 1.17</b>	Les composants d'une éolienne	<b>20</b>
<b>Figure 1.18</b>	la naissance du vent	<b>25</b>
<b>Figure 1.19</b>	Bilan des forces sur une pale	<b>27</b>
<b>Figure 1.20</b>	Conversion de l'énergie cinétique du vent	<b>29</b>

<b>Figure 1.21</b>	Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	<b>30</b>
<b>Figure 2.1</b>	Le neurone biologique	<b>35</b>
<b>Figure 2.2</b>	Neurone formel de McCulloch et Pitts	<b>37</b>
<b>Figure 2.3</b>	Composition d'un réseau de neurones	<b>42</b>
<b>Figure 2.4</b>	Les différentes topologies de réseaux de neurones artificiels	<b>43</b>
<b>Figure 2.5</b>	Structure d'un réseau de neurones non bouclé (feed-forward)	<b>44</b>
<b>Figure 2.6</b>	Structure d'un réseau de neurones dont les connexions sont bouclées (feed-back)	<b>44</b>
<b>Figure 2.7</b>	Schéma général de perceptron simple	<b>47</b>
<b>Figure 2.8</b>	Carte topologique auto-adaptative de Kohone	<b>48</b>
<b>Figure 2.9</b>	Exemple de réseau de type perceptron Multicouche	<b>49</b>
<b>Figure 2.10</b>	Le modèle de Hopfield	<b>50</b>
<b>Figure 2.11</b>	Apprentissage supervisée	<b>51</b>
<b>Figure 2.12</b>	Apprentissage non supervisée	<b>52</b>
<b>Figure 3.1</b>	Colonne d'air animée d'une vitesse $v$	<b>59</b>
<b>Figure 3.2</b>	Tube de courant d'air autour d'une éolienne	<b>60</b>
<b>Figure 3.3</b>	Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle ( $\Omega_t R_t$ )	<b>63</b>
<b>Figure 3.4</b>	Coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes	<b>64</b>
<b>Figure 3.5</b>	Modèle mécanique simplifié de la turbine	<b>65</b>
<b>Figure 3.6</b>	Bilan des forces	<b>66</b>
<b>Figure 3.7</b>	Différentes parties mécaniques de l'éolienne	<b>68</b>
<b>Figure 3.8</b>	Schéma bloc du modèle de la turbine	<b>69</b>
<b>Figure 3.9</b>	Modèle simplifié de multiplicateur	<b>69</b>
<b>Figure 3.10</b>	Schéma bloc du Modèle de multiplicateur	<b>70</b>
<b>Figure 3.11</b>	Schéma bloc du Modèle de l'arbre de transmission	<b>72</b>

<b>Figure 3.12</b>	Modèle de l'arbre de transmission sous forme d'équation de transfert	<b>72</b>
<b>Figure 3.13</b>	schéma bloc de la turbine	<b>73</b>
<b>Figure 3.14</b>	schéma bloc de MPPT sans asservissement de vitesse	<b>76</b>
<b>Figure 3.15</b>	schéma bloc de MPPT avec asservissement de vitesse	<b>78</b>
<b>Figure 3.16</b>	Représentation de la machine synchrone à aimants permanents	<b>80</b>
<b>Figure 3.17</b>	Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)	<b>81</b>
<b>Figure 3.18</b>	Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park	<b>85</b>
<b>Figure 3.19</b>	Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q	<b>88</b>
<b>Figure 4.1</b>	Bibliothèque Simulink	<b>95</b>
<b>Figure 4.2</b>	les quatre parties de base de système éolienne	<b>96</b>
<b>Figure 4.3</b>	Le profil de vent à vitesse fixe et à vitesse variable	
<b>Figure 4.4</b>	L'équation de profil du vent	<b>97</b>
<b>Figure 4.5</b>	Allure de la vitesse du vent à vitesse variable	<b>97</b>
<b>Figure 4.6</b>	Schéma bloc de la Coefficient de puissance	<b>98</b>
<b>Figure 4.7</b>	Coefficient de puissance en fonction du temps pour un angle de calage $\beta = 2^\circ$	<b>99</b>
<b>Figure 4.8</b>	Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique $\lambda$ pour des différents angles de calage $\beta$	<b>99</b>
<b>Figure 4.9</b>	Le coefficient de puissance dans le repère (X, Y, Z) 3D	<b>100</b>
<b>Figure 4.10</b>	Schéma bloc de la turbine	<b>101</b>
<b>Figure 4.11</b>	Schéma bloc de multiplicateur	<b>101</b>
<b>Figure 4.12</b>	Schéma bloc de l'arbre de transmission	<b>102</b>
<b>Figure 4.13</b>	Schéma bloc de MPPT sans asservissement de vitesse	<b>103</b>
<b>Figure 4.14</b>	Schéma bloc de dehors de la commande MPPT relié par le correcteur de mode glissement	<b>103</b>

<b>Figure 4.15</b>	Schéma bloc de dehors de la commande MPPT relié par le correcteur (Réseau de neurone) pour la vitesse de (12 m/s)	<b>104</b>
<b>Figure 4.16</b>	Schéma bloc de dehors de la commande MPPT relié par le Correcteur (Réseau de neurone) pour la vitesse variable du vent	<b>104</b>
<b>Figure 4.17</b>	Modèle du réseau de neurones utilisé	<b>105</b>
<b>Figure 4.18</b>	Fenêtre d'entraînement de réseau de neurones	<b>105</b>
<b>Figure 4.19</b>	Courbe affichée la valeur de l'erreur	<b>106</b>
<b>Figure 4.20</b>	Le correcteur de réseau de neurones relié au système	<b>106</b>
<b>Figure 4.21</b>	Schéma block de simulation de la partie mécanique	<b>107</b>
<b>Figure 4.22</b>	Schéma block de l'équation électrique	<b>108</b>
<b>Figure 4.23</b>	Les différents couples électromagnétiques optimaux utilisés pour la commande vectorielle	<b>108</b>
<b>Figure 4.24</b>	Schéma block de la commande vectorielle	<b>109</b>
<b>Figure 4.25</b>	Schéma block de la GSAP	<b>110</b>
<b>Figure 4.26</b>	Schéma block de la puissance électrique	<b>110</b>
<b>Figure 4.27</b>	Le programme de réseau de neurones	<b>111</b>
<b>Figure 4.28</b>	Le programme de système éolien	<b>111</b>

# Liste des tableaux

# Liste des Tableaux

<b>Tableaux</b>	<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>Tableau 1.1</b>	Classification des éoliennes	<b>14</b>
<b>Tableau 1.2</b>	Les différents composants de l'éolienne	<b>20</b>
<b>Tableau 1.3</b>	échelle Beaufort	<b>26</b>
<b>Tableau 2.1</b>	analogie entre le neurone biologique et le neurone formel	<b>39</b>
<b>Tableau 2.2</b>	Différentes fonctions d'activation les plus utilisées	<b>40</b>
<b>Tableau 4.1</b>	Les paramètres de système éolien	<b>112</b>

# Liste des symboles

# Liste des symboles

$s$ : Surface active de la turbine ( $S = \pi R^2$ ) ( $m^2$ )
$C_p$ : Coefficient de puissance de la turbine.
$V$ : Vitesse instantanée du vent.
$E_c$ : Energie cinétique du vent.
$\rho$ : Masse volumique de l'air.
$P_v$ : Puissance du vent récupérée.
$P_t$ : Puissance réelle extraite par le rotor des pales.
$R_t$ : Rayon de la surface balayée.
$\Omega_t$ : Vitesse de rotation avant multiplicateur.
$\lambda$ : Vitesse spécifique ou normalisée.
$\beta$ : Angle de calage.
$C_g$ : Couple après multiplicateur (couple de la génératrice).
$C_t$ : Couple de la turbine avant multiplicateur.
$J$ : Inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.
$C_{em}$ : Couple électromagnétique développé par la génératrice.
$C_f$ : Couple résistant dû aux frottements.
$C_r$ : Couple résistant.
$f$ : Coefficient de frottement.
$\lambda_{opt}$ : Vitesse réduite optimale.
$C_{p\_max}$ : Coefficient de puissance maximale.
$C_{t-opt}$ : Couple optimal de la turbine.
$C_{ref}$ : Couple de référence de la turbine.
$C_{g\_ref}$ : Couple de référence après multiplicateur.
$C_{em\_opt}$ : Couple électromagnétique optimal.

(as, bs, cs) : Les trois phases du stator.
(d, q) : Indice du repère de Park lié au rotor.
Vas, Vbs, Vcs : Tensions des phases statoriques a,b,c.
Lss : Inductance propre des enroulements statoriques.
Mss : Inductance mutuelle entre les enroulements statoriques.
$\phi_d$ : Flux traversant l'enroulement de l'axe direct.
[P( $\theta$ )] : Matrice de la transformation de Park.
[P( $\theta$ )]-1 : Matrice de la transformation inverse de Park.
$\theta$ : Position du stator en (rad).
Vd, Vq : Vecteurs des tensions statoriques respectivement d'axes d et q.
id, iq : Vecteurs des courants statoriques respectivement d'axes d et q.
Ld, Lq : Inductances statoriques respectivement d'axes d et q.
Cm : Couple moteur appliqué sur la génératrice.
p : Nombre de paires de pôles de la génératrice.
GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents.
M.P.P.T : Maximum Power Point Tracking.
MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.
RNA : Réseau de neurone artificiel.

*Introduction*

*générale*

## Introduction générale :

Face à une industrialisation croissante dans le monde, la consommation d'énergie n'a cessé d'augmenter, entraînant d'inquiétants problèmes environnementaux dus notamment à la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz et charbon), responsable de pollution et de gaz à effet de serre. Représentant encore aujourd'hui deux tiers des sources utilisées pour la production de l'énergie électrique, les énergies fossiles tendent et tendront de plus en plus à être remplacées par une nouvelle forme d'énergie dite « renouvelable », minimisant ainsi l'émission de CO<sub>2</sub> et limitant le recours aux centrales nucléaires. Le monde doit se tourner vers l'utilisation de ces énergies dans le but de développer les techniques d'extraction des puissances, tout en visant à fiabiliser et à augmenter l'efficacité énergétique, ainsi qu'à baisser les coûts de fabrication, d'usage et de recyclage. [19]

Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies propres à ressource illimitée, qui regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. Parmi ces énergies renouvelables, on trouve les énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre (biomasse) et de l'eau. [19]

Dans notre étude, nous nous intéresserons à la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Considérée comme l'une des plus prometteuses énergies non polluantes, l'énergie éolienne fut la première source d'énergie à être utilisée par l'homme il y a plusieurs siècles. Pour la production d'électricité, l'exploitation du vent est le moyen à la fois le plus efficace et le plus économique, car le vent représente un carburant propre suffisamment disponible à travers la planète. [21]

Les systèmes éoliens ont recours à plusieurs types de génératrices pour convertir l'énergie mécanique de l'arbre éolien en énergie électrique. En raison

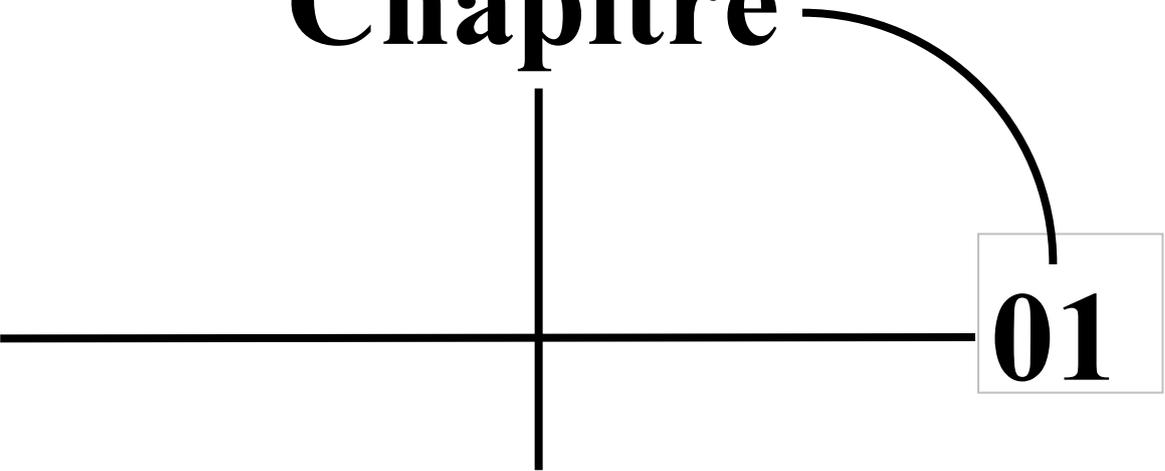
de la complexité des systèmes de conversion éolienne, plusieurs obstacles sont rencontrés, dont : la nécessité d'un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et la non constance de la vitesse du vent. [21]

La génératrice synchrone à aimants permanents 'GSAP', en particulier celle qui fonctionne à vitesse variable, est intéressante pour ce type de processus, car elle permet une extraction maximale de l'énergie. L'utilisation de ce type de génératrices est de plus en plus prédominante par rapport aux autres types de génératrices dans le domaine de la conversion éolienne, et cela en raison des nombreux avantages de la machine, à savoir : un excellent rendement, un faible moment d'inertie ainsi qu'une maintenance réduite. [23]

L'objectif de notre travail est de concevoir une commande à base de réseaux de neurones (RNA) d'une turbine éolienne pour améliorer les performances de notre système, de ce fait, le mémoire est constitué de quatre chapitres :

- Le premier chapitre comporte des généralités sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, en utilisant des turbines éoliennes à travers des concepts physiques régissant leur fonctionnement.
- Dans le second chapitre, on se focalise, dans un premier temps, sur des généralités concernant les réseaux de neurones artificiels, et les apprenons.
- Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du système étudié, à savoir la modélisation de la chaîne de conversion éolienne. Nous allons ainsi présenter le modèle de la GSAP dans le repère naturel triphasé (a,b,c), puis dans le repère biphasé (d,q) en utilisant la transformation de Park.
- Dans le quatrième et dernier chapitre, on se focalise, sur la simulation de système d'éolienne et aussi la commande d'un réseau de neurones où c'est notre sujet.

**Chapitre**



**01**

*Généralités sur  
l'éolienne*

## **1.1 Introduction :**

Les éoliennes sont faites pour produire de l'énergie électrique par la vitesse du vent qui fait tourner le générateur grâce aux ailes de l'hélice.

Les ressources énergétiques fossiles proviennent de la combustion de matières premières telles que le pétrole, le gaz et le charbon. Cette dernière est polluée et ses réserves s'amenuisent et malheureusement non-renouvelables. L'énergie éolienne est classée comme une énergie alternative pour ces énergies parce que considérer comme l'une des énergies propres, car elle ne contient pas d'émissions de CO<sub>2</sub> qui polluent l'environnement et sont nocives pour les êtres vivants.

Dans ce chapitre, on présente une définition et histoire de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne au niveau mondial et national, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

## **1.2 Différents types d'énergies renouvelables :**

### **1.2.1 Énergie solaire photovoltaïque :**

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique, qui génère un courant continu à partir du rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (le soleil) ou artificielle.

### **1.2.2 Énergie hydraulique :**

Les moulins à eau servent à capter l'énergie mécanique de l'eau et à faire fonctionner des machines-outils (moulins à blé). Plus tard, avec l'invention de l'électricité, cette énergie mécanique a été convertie en énergie électrique.

### **1.2.3 Énergie Biomasse:**

On distingue la biomasse sèche (bois et ses dérivés) et la biomasse humide (déchets organiques). Nous utilisons les ordures ménagères pour fabriquer du gaz ou de l'engrais.

### **1.2.4 Énergie Géothermie :**

Contrairement aux autres sources d'énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Le principe est d'extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol, de l'utiliser sous forme de chauffage ou de la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur terrestre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui composent la croûte : c'est l'énergie nucléaire produite par la décomposition de l'uranium, du thorium et du potassium.

### **1.2.5 Énergie éolienne :**

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Cette dernière se caractérise notamment par le mouvement des masses d'air dans l'atmosphère. L'énergie mécanique du mouvement de ces masses d'air est à la base de l'énergie éolienne. Plus de détails sur cette énergie sont notre étude dans ce travail. [1]

## **1.3 Généralité sur l'énergie éolienne :**

### **1.3.1 Historique de l'éolien :**

L'homme a toujours su utiliser les ressources naturelles qui l'entourent pour subvenir à ses besoins et ces besoins n'ont cessé de croître au fil du temps, parmi eux se trouve le vent.

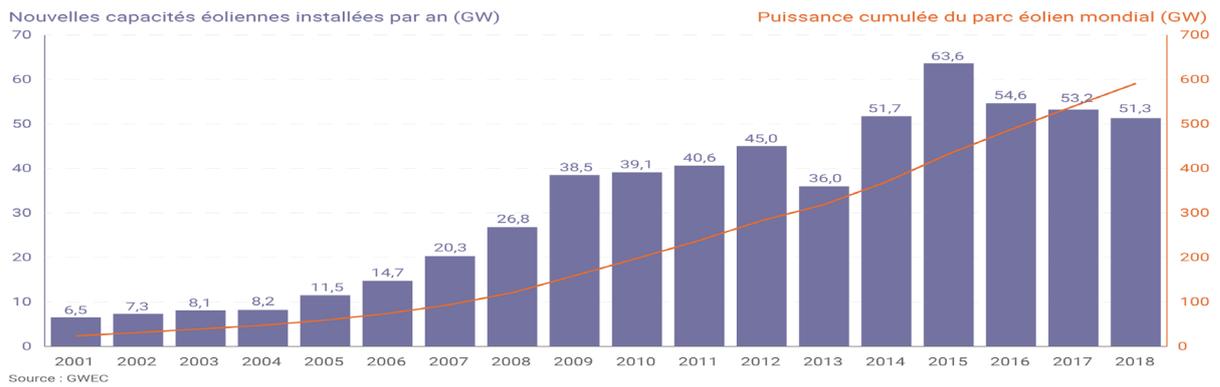
Parmi toutes les énergies renouvelables, outre l'énergie du bois, l'énergie éolienne est la première utilisée par l'homme. Elle a été utilisée depuis l'Antiquité pour propulser des navires, puis des moulins à blé et des bâtiments qui permettaient de pomper l'eau. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à environ 2000 avant Jésus-Christ.

En 1887, Charles F. Brush a construit ce qui est maintenant considéré comme la première éolienne autonome pour produire de l'électricité. Puis il y a eu Mr. Danois Poul La Cour, considéré comme le père de toutes les éoliennes modernes utilisées pour produire de l'électricité, qui a découvert que les éoliennes à rotation rapide composées d'un nombre limité de pales étaient plus efficaces pour produire de l'électricité que celles à plusieurs pales et rotations lentes. Météorologue de formation, il a construit la première éolienne pour produire de l'électricité en 1891. Après, vient Mr. Johannes Juul, ingénieur électricien et ancien élève de La Cour, fut le premier à mettre au point une éolienne moderne capable de produire du courant alternatif, il conçut et construisit la plus grande éolienne du monde, la "turbine de Gedser " de 200 KW. [2]

### **1.3.2 Perspectives mondiales de l'éolien :**

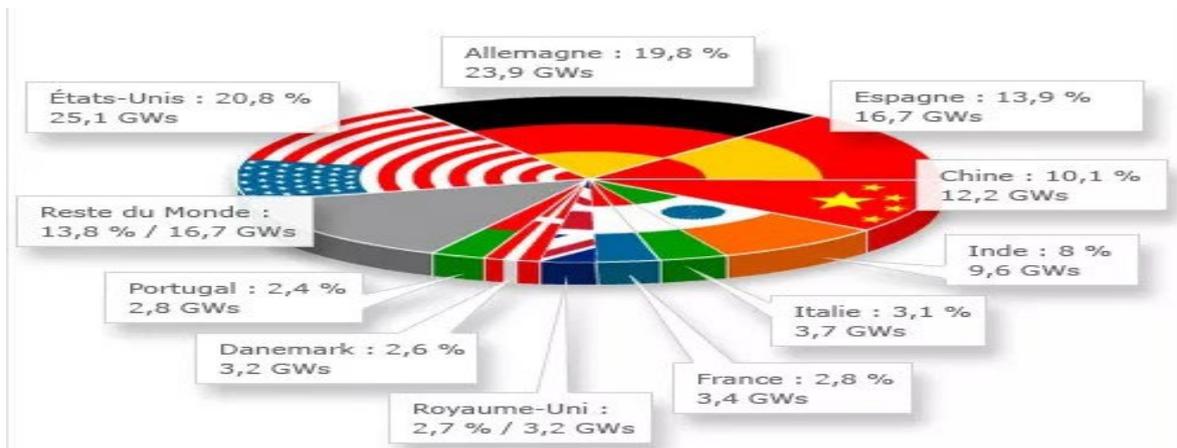
Actuellement, l'énergie éolienne devient aussi compétitive que d'autres sources d'énergie plus traditionnelles en raison de son faible risque et du besoin d'énergie propre et fiable. Selon l'AIEA (agence internationale de l'énergie atomique), aucun réacteur nucléaire n'a été mis en service en 2008. L'énergie éolienne connaît une croissance fulgurante et attire les investisseurs mondiaux. La (**Figure 1.1**) illustre la puissance éolienne installée dans le monde qui est toujours en croissance et elle a plus que doublée en 2016 par rapport à celle installée en 2001. [3]

**Monde** Évolution de la puissance du parc éolien



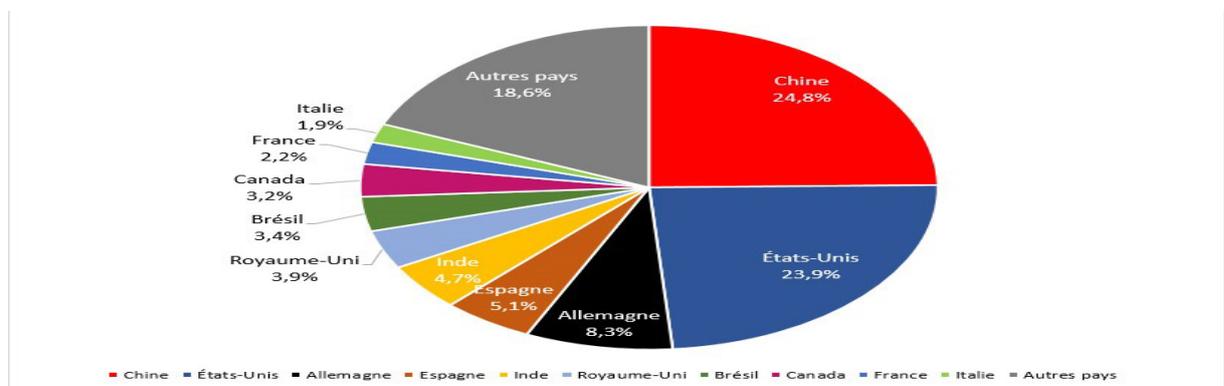
**Figure 1.1 : Production mondiale de l'énergie éolienne en GW.**

La (Figure 1.2) montre la croissance de la capacité installée des dix plus grands producteurs d'énergie éolienne dans le monde.



**Figure 1.2 : Classement des dix premiers acteurs de l'énergie éolienne en 2008.**

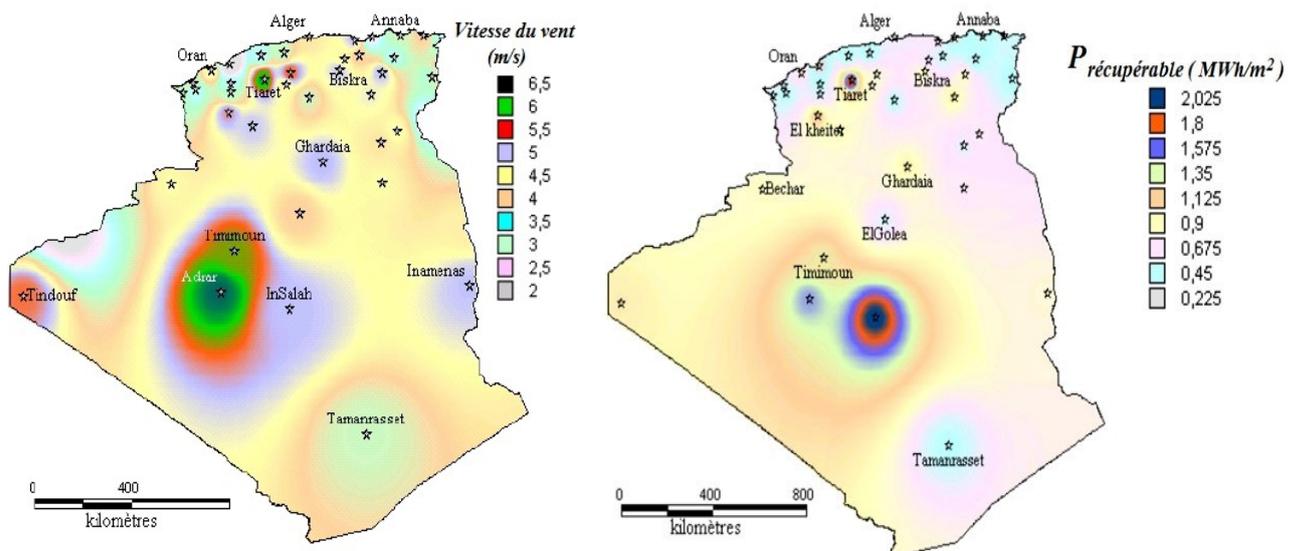
La Chine s'est récemment classé premier en termes d'équipement total devant les États-Unis de 2010 à 2016.



**Figure 1.3 : Principaux producteurs d'électricité éolienne dans le monde en 2016.**

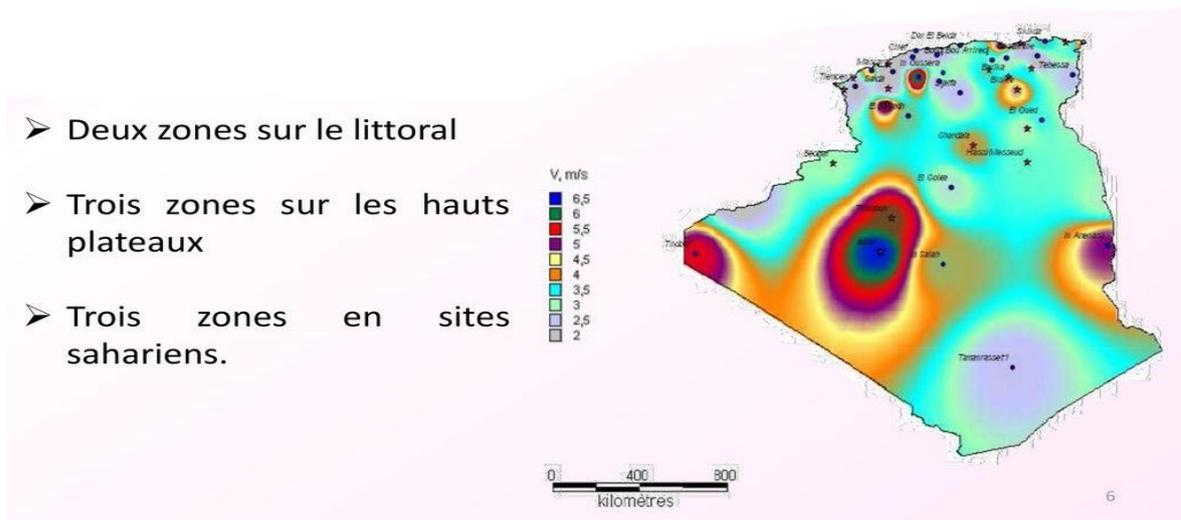
### 1.3.3 Energie éolienne en Algérie :

En Algérie, les ressources du vent sont différentes d'un endroit à l'autre due à une topographie et à un climat très divers. Néanmoins, notre pays présente un potentiel éolien considérable, il a été déjà estimé par le centre de développement des énergies renouvelables (CDÉR) depuis les années 90 à travers la production des atlas, de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie, il est trouvé qu'un potentiel éolien considérable peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans les régions situées au sud-ouest du Sahara, où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser (6 m/s) dans la région de Tindouf et (7 m/s) dans la région d'Adrar. [4]



**Figure 1.4 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent et la densité d'énergie en Algérie (2009-2010).**

En addition, cinq zones ventées ont été identifiées et susceptibles de recevoir des installations éoliennes : deux zones sur le littoral, trois zones sur les hauts plateaux. Le potentiel éolien de ces régions a été estimé à 172 TWh/an dont 37 TWh/an économiquement exploitables soient l'équivalent de 75 % des besoins nationaux en 2007. [4]



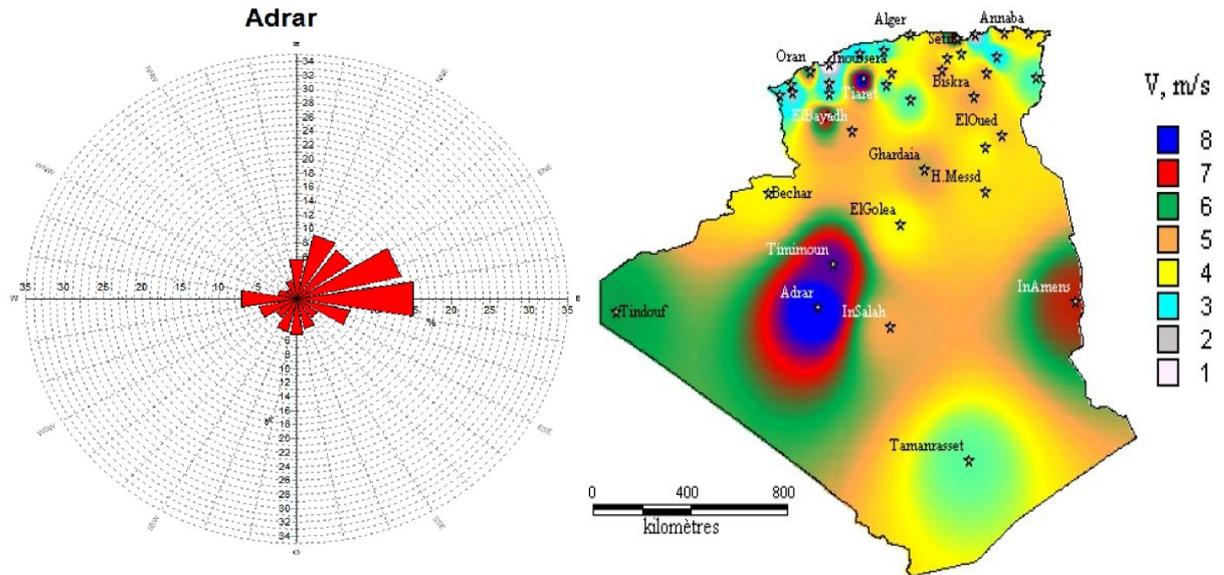
**Figure 1.5 : Les cinq zones ventées en Algérie.**

Les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh/an. [4]

La politique énergétique en Algérie s'articule autour des préoccupations d'utilisation rationnelle de l'énergie, de promotion des énergies renouvelables et de protection de l'environnement; ainsi plusieurs actions sont proposées pour les mettre en place et portent sur l'ensemble de la chaîne allant de la recherche à la distribution. En effet, plusieurs champs éoliens et photovoltaïques sont installés dans différentes régions, en particulier Adrar.

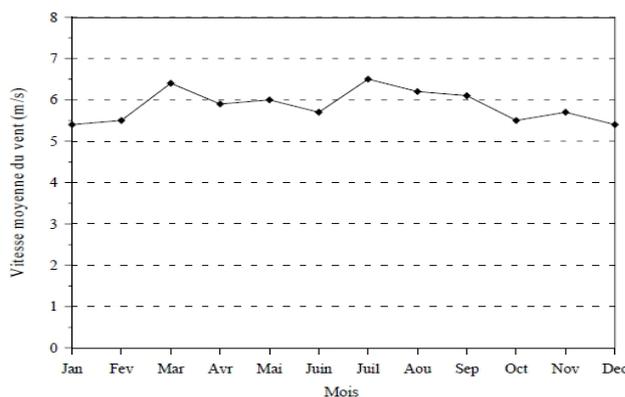
#### **1.3.4 Energie éolienne en Adrar :**

Adrar se trouve au Sud-ouest de l'Algérie, à environ 1540 km d'Alger. Cette région est caractérisée par sa topographie relativement plate, ainsi que par une géomorphologie désertique. Adrar et ses alentours sont caractérisés par un potentiel du vent considérable venant de la direction dominante est-Nord-est (ENE). Les données du vent de cette région classent cette dernière comme la première présentant le meilleur potentiel du vent en Algérie. [5]

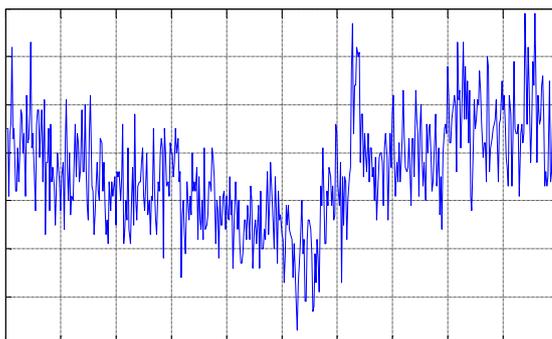


**Figure 1.6 : La rose du vent d'Adrar.**

L'étude du potentiel éolien d'Adrar est basée sur les vitesses horaires du vent de la période (2003-2008) mesurées par l'Office National de la Météorologie (ONM). La station de mesure est placée à l'aéroport d'Adrar, ses coordonnées géographiques sont 27,82° N et -0,18° E, l'anémomètre est placé à une hauteur de 10 m. Les mesures ont permis de tracer les variations journalières, mensuelles et annuelles de la vitesse moyenne du vent. [5]

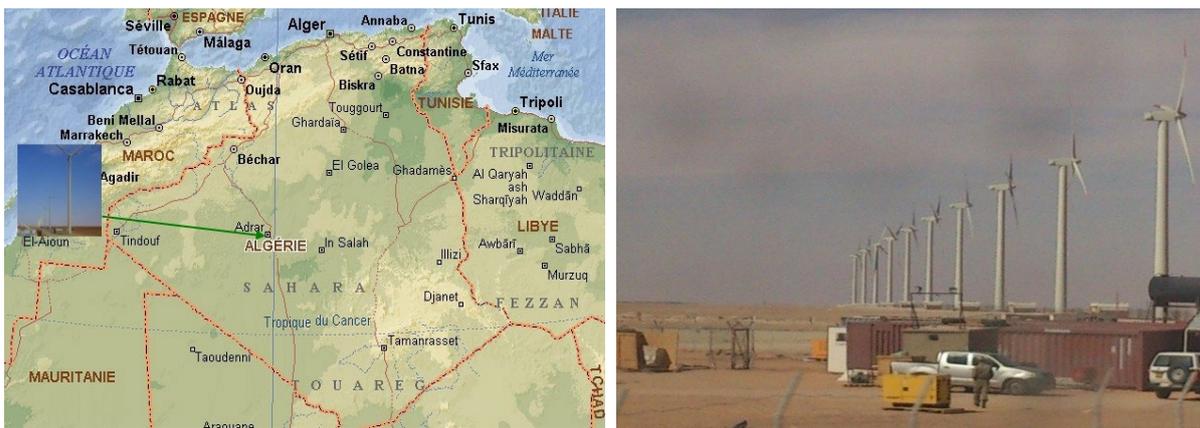


**Figure 1.7 : Vitesses moyenne annuelle du vent du site Adrar.**



**Figure 1.8 : Vitesse du vent mesurée au 30 janvier 2014 (Adrar).**

Adrar possède un potentiel éolien très important, ce qui fait que l'énergie éolienne présente une très bonne solution environnementale et économique surtout pour les applications de production d'électricité, le pompage d'eau et l'irrigation dans les zones arides où l'électricité n'est pas disponible ou son transport est onéreux. Pour cette raison, la première utilisation de pompage d'eau par la turbine éolienne en Afrique a été à "Ksar Ouled Aroussa", Adrar en 1957. En effet, la première ferme éolienne en Algérie a été lancée officiellement le 30/10/2011, puis elle a été mise en marche le 03/06/2014 à Adrar, et plus précisément à Kaberten (72 km au nord le Wilaya d'Adrar), elle se trouve à une altitude d'environ (263 m) à proximité d'une ligne électrique afin de raccorder le parc éolien et de réduire les coûts de production d'électricité. Ce parc éolien a une capacité de 10.2 MW, avec une surface de 30 hectares, et il est constitué de 12 turbines éoliennes, type Gamesa G52 de 0.85 MW chacune ; ces éoliennes sont à rotor tripale de 52 m de diamètre, basées sur des générateurs asynchrones à double alimentation (GADA) fonctionnant à vitesse variable avec un régulateur pitch. Ce projet a été retenu par la Sharikat Kahraba wa Takat Motajaddida (SKTM), filiale du groupe de SONELGAZ. [5]



**Figure 1.9 : Montrée la station éolienne de Kaberten et la turbine Gamesa G52 (850 kW).**

À cet effet, l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URÉRMS), Adrar, qui fait partie du CDÉR, a mis en place un axe d'expertise en énergie éolienne vue la disponibilité de potentiel du vent afin d'approfondir la recherche scientifique sur le système de production éolien avec l'intégration de pompage éolien et d'autres applications. La (**Figure 1.10**) représente la turbine éolienne installée à l'URÉRMS de type « Whisper 100 ». [5]



**Figure 1.10 : Turbine éolienne à base MSAP, URERMS, à Adrar.**

Cette turbine est basée sur le générateur synchrone à aimants permanents, ce type de générateur est préférable dans les applications de petites puissance et dans les sites isolés grâce à son coût relativement faible et à son fonctionnement même à faible vitesse. [5]

## **1.4 Notion théorique sur l'éolien :**

### **1.4.1 Définition d'éolienne :**

L'aérogénérateur, communément appelée éolienne, est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission, qui est ensuite convertie en énergie électrique par un générateur. [6]

Une éolienne se compose d'un générateur entraîné par la turbine éolienne via un multiplicateur, un système de contrôle, un convertisseur statique, un transformateur et enfin le réseau électrique.

#### 1.4.2 Taille des aérogénérateurs :

Avant les développements récents et la nécessité de fournir au réseau des quantités toujours plus importantes d'électricité, les constructeurs et les chercheurs développaient des éoliennes de plus en plus puissantes donc plus grandes. Pour tirer le meilleur parti du vent, on cherche à ce que les hélices balayées la surfacent la plus ventée, car les éoliennes sont si hautes qu'elles ne seront pas affectées par le sol ralentissant le vent. [7]

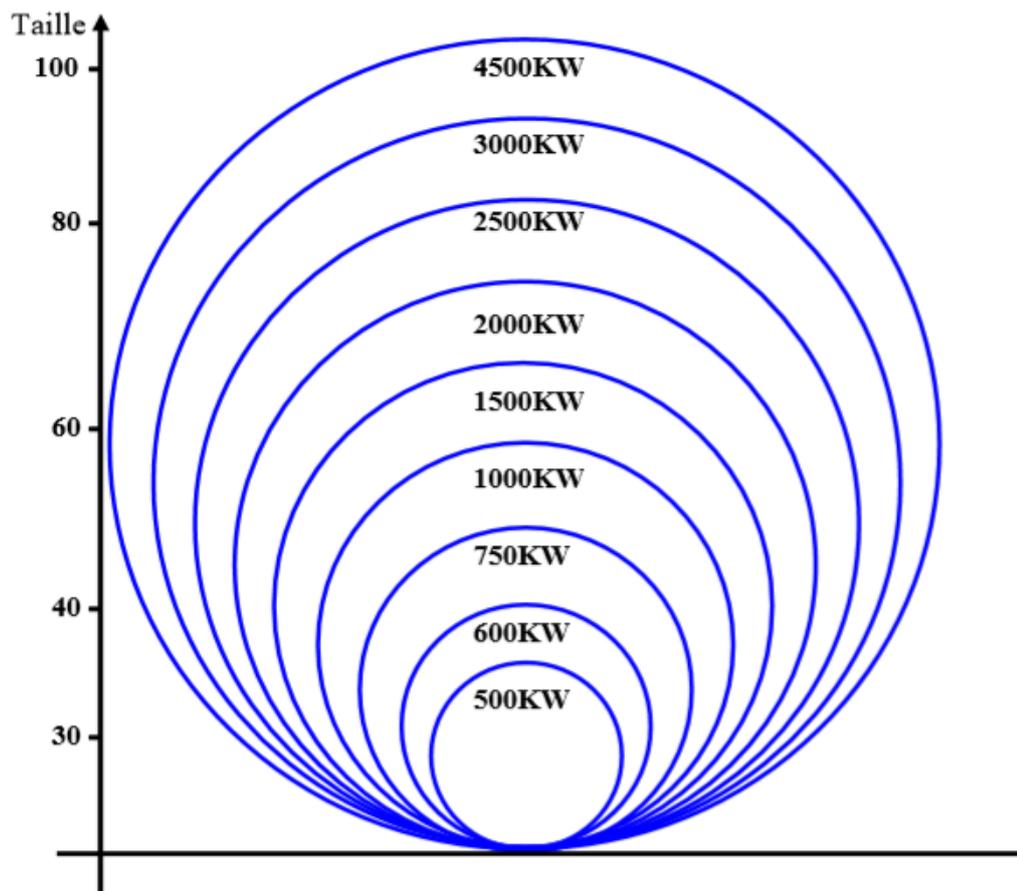


Figure 1.11 : taille d'éolienne et la puissance.

#### 1.4.3 Classification des éoliennes :

### 1.4.3.1 Générateurs éoliens selon la gamme de puissance :

Selon la gamme de puissance nominale produite par l'aérogénérateur, les éoliennes sont divisées en trois catégories, petite, moyenne et grande puissance. [8]

Le tableau suivant donne un résumé sur les trois catégories des éoliennes :

<b>Echelle</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance délivrée</b>
<b>Petite puissance</b>	moins de 12 m	moins de 40 kW
<b>Moyenne puissance</b>	12 m à 45 m	40 kW à 1 MW
<b>Grande puissance</b>	46 m et plus	1 MW

**Tableau 1.1 : Classification des éoliennes.**

### 1.4.3.2 Classification selon l'axe :

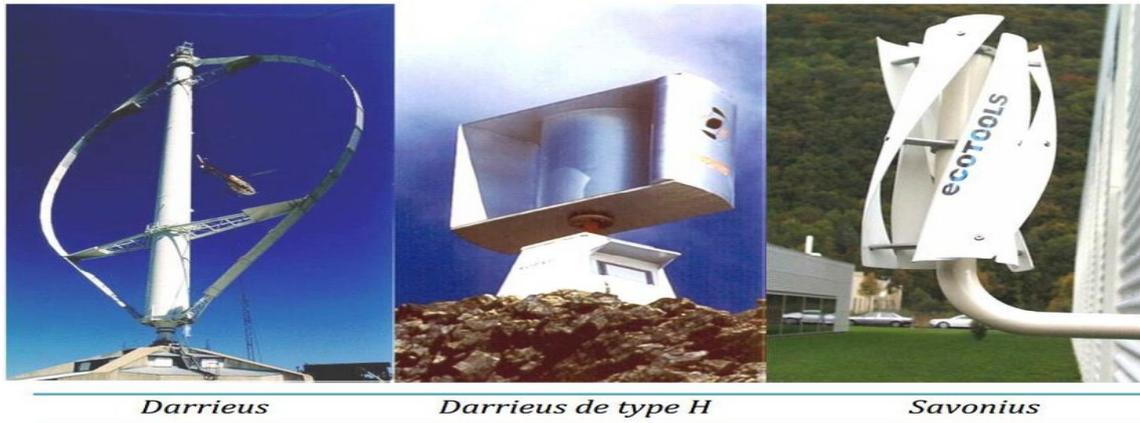
Les éoliennes se répartissent en deux grandes catégories : les éoliennes à axe vertical, qui ont tendance à disparaître, les éoliennes à axe horizontal principalement utilisées pour le pompage de l'eau, et les éoliennes rapides à axe horizontal, qui sont plus spécifiquement utilisées pour la production d'énergie électrique.

#### 1.4.3.2.1 Eoliennes à axe vertical :

Ils sont les moins utilisés, car ils sont moins performants qu'avant, le guidage mécanique est difficile, le palier inférieur doit supporter le poids de toute la turbine, et vitesse de rotation lente donc couple important. Cependant, ils présentent certains avantages. Ce type d'éolienne offre la possibilité de placer le générateur au sol, ne nécessite pas de système d'orientation selon la direction du vent, puisque le vent peut froter les pales dans toutes les directions, et a une structure simple. Ils tournent à basse vitesse, ils ne font donc pas beaucoup de bruit. [4]

Il existe principalement trois technologies de ce type d'éoliennes sont :

- Turbines Darrieus classiques.
- Turbines Darrieus à pales droites (type-H).
- Turbines Savonius.



**Figure 1.12 : Éoliennes à axe vertical.**

➤ **Rotor de DARRIEUS :**

C'est un capteur à circulation in stationnaire conçu par l'ingénieur français GEORGE DARRIEUS en 1925. Ses pales (généralement 2 ou 3) ont un profil biconvexe symétrique qui tourne autour d'un axe vertical et sont de formes variées. Les surfaces qu'ils décrivent peuvent être cylindriques, tronconiques, sphériques ou paraboliques, mais remplissent la même fonction qu'elle soit leur apparence. [1]

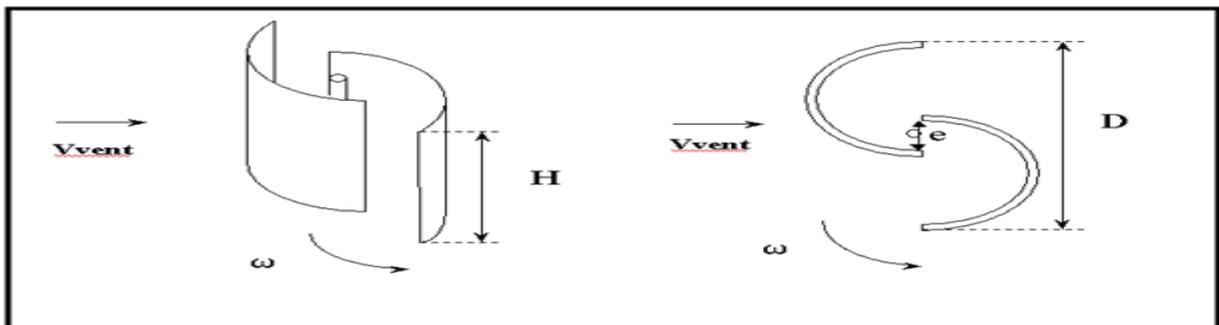
➤ **Rotor de SAVONIOS :**

Cette machine a été inventée en 1925 par finlandais SIGURD SAVON IOUS et a obtenu un brevet français. Elle se compose essentiellement de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un de l'autre. [1]

Le modèle original a été construit en utilisant le rapport ;  $e/d=1/3$ , où  $e$  : désignant l'écartement des bords intérieurs et  $d$  : est le diamètre des deux

demi- cylindres. Il est également intéressant d'utiliser deux rotors superposés décalés de  $90^\circ$ . Certains rotors en ont 3 pour éviter les irrégularités du couple de démarrages.

Les rotors SAVONIOS sont très simples et sont favorisés par les pays moins industrialisés en raison de leur facilité de fabrication. Il a été développé pour les petites éoliennes destinées au nautisme (recharge de batterie). Il est également intéressant de l'associer au rotor DARRIEUS du fait de son couple de démarrages élevé. De plus, il démarre à partir de faibles vitesses de vent de



l'ordre de 2 m/s.

**Figure 1.13 : Rotor de SAVONIOS.**

➤ **Le système mixte SAVONIUS\_DARRIEUS :**

L'inconvénient du rotor DARRIEUS est qu'il nécessite une impulsion de démarrage pour atteindre sa vitesse normale. On pourrait évidemment utiliser la grille pour démarrer le rotor avec le générateur, qui fonctionne alors en moteur puis reprendrait son fonctionnement normal dès que la vitesse du vent de production serait atteinte, mais on pourrait aussi utiliser SAVONIUS pour démarrer le rotor DARRIEUS. [1]

Le rotor SAVONIUS, de par le couple élevé qu'il produit au démarrage, facilite le démarrage du montage, mais en fonctionnement normal la puissance est fournie par le rotor DARRIEUS. Il n'est pas impossible que le rotor SAVONIUS n'ait aucun effet en fonctionnement normal, et il n'est pas

impossible que les perturbations qu'il crée dans l'écoulement de l'air à travers le DARRIEUS réduisent le rendement de l'ensemble.

**A) Avantages d'éolienne à axe vertical :**

- Il Permet de mettre les génératrices, le multiplicateur et les appareils de commande au sol.
- Possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quelle que soit la direction de vents sans avoir à l'orientation de rotor.
- Sa conception est simple par rapport à l'axe horizontal.

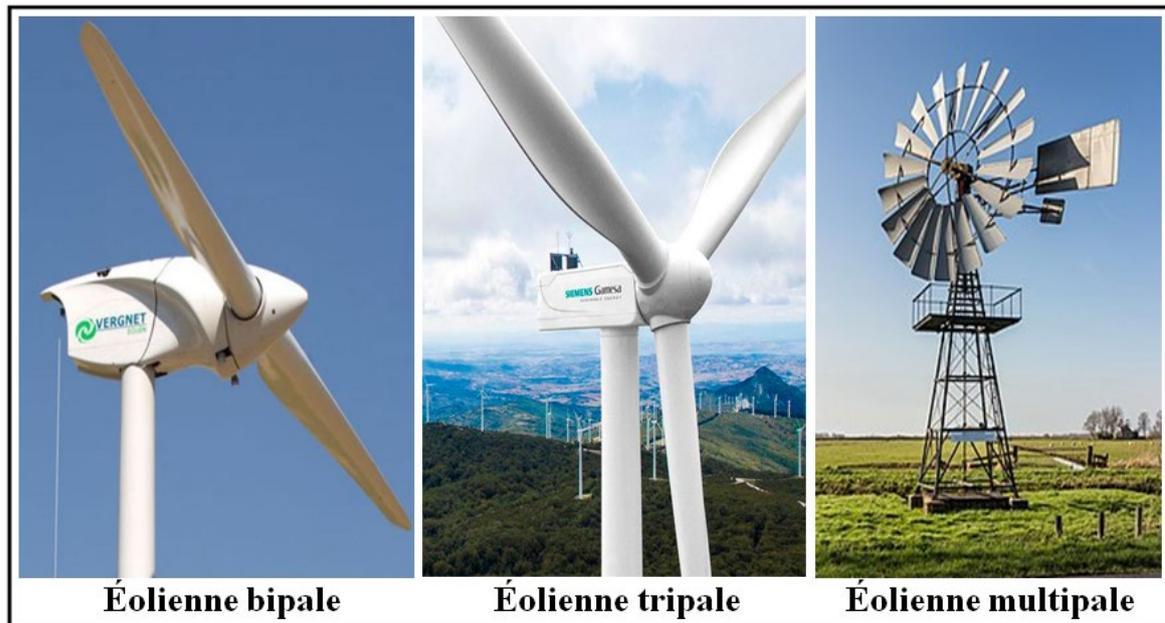
**B) Inconvénient d'éolienne à axe vertical :**

- Occupe une surface plus large (importante) que l'éolienne à tour à cause de son établissement au sol.
- Moins performant par rapport à l'axe horizontal.
- Sa conception verticale impose un fonctionnement avec le vent qui est proche au sol (moins de rendement).

**1.4.3.2 Eoliennes à axe horizontal :**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur l'ancienne technologie des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique, comme une aile d'avion.

Les éoliennes à axe horizontal sont constituées de deux, trois pales ou plus. Dans la plupart des cas, les rotors de ces éoliennes sont tripales, car le tripale par rapport au bipale, constitue un bon compromis entre le rendement, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus utilisées car elles sont rendement aérodynamique plus efficaces que les éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et sont moins chères. [5]

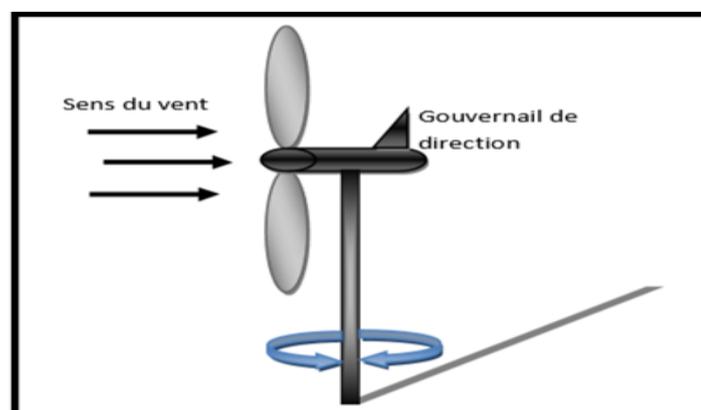


**Figure 1.14 : Éoliennes à axe horizontal.**

Dans les éoliennes à axe horizontal, la turbine peut se trouver à l'avant de la nacelle ou à l'arrière, on distingue deux catégories :

➤ **Turbine avant la nacelle (amont) :**

Dans ce type, la voilure est placée avant la nacelle, un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. 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. [5]



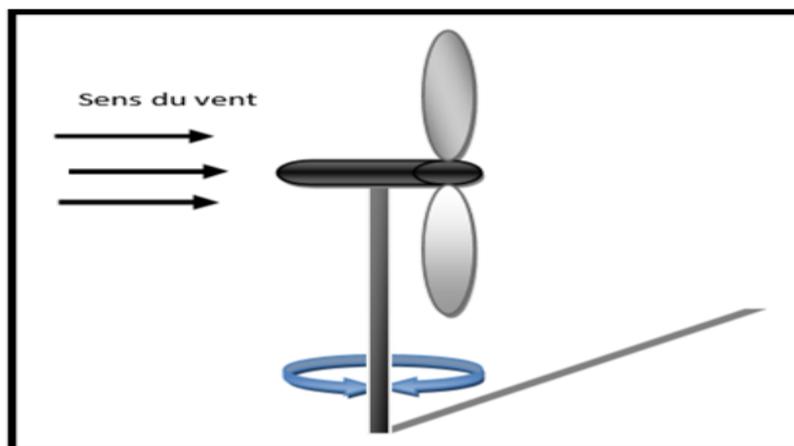
**Figure 1.15 : Éolienne amont horizontale.**

Une autre solution qui permet, notamment pour les fortes puissances d'éviter le tout dispositif mécanique d'orientation, complexe, lourd et coûteux est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle, il s'agit d'éolienne « aval ».

➤ **Turbine derrière la nacelle (aval) :**

Dans ce cas, la turbine se place automatiquement face au vent qui souffle sur l'arrière des pales, le rotor est flexible et auto-orientable.

Les éoliennes de ce type sont assez rares, car des vibrations importantes sont notées dues au passage des pales derrière le mat et aux changements de direction du vent. [5]



**Figure 1.16 : Éolienne aval horizontale**

**A) Avantages d'éolienne à axe horizontal : [1]**

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

**B) Inconvénient d'éolienne à axe horizontal :**

- Coût de construction très élevé.

- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas de l'incident.

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant ; les éoliennes à axe horizontal sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

### C) Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :



Figure 1.17 : Les composants d'une éolienne.

<b>1</b> Régulateur du moyeu.	<b>11</b> Transformateur
<b>2</b> Vérins de réglage de pas	<b>12</b> Pale
<b>3</b> Moyeu	<b>13</b> Roulement de pale
<b>4</b> Arbre principal.	<b>14</b> Système de verrouillage
<b>5</b> Système de refroidissement	<b>15</b> Bloc hydraulique
<b>6</b> Multiplicateur	<b>16</b> Châssis
<b>7</b> Frein mécanique.	<b>17</b> Moteur d'orientation
<b>8</b> Pont roulant	<b>18</b> Couplage composite
<b>9</b> Régulateur avec convertisseur	<b>19</b> Alternateur
<b>10</b> Anémomètre et girouette ultrasoniques	

Tableau 1.2 : Les différents composants de l'éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. [2]

- **La tour :**

À la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle, Une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut.

- **La nacelle :**

Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande.

Un dispositif oriente automatiquement la nacelle face au vent, grâce à une mesure de la direction du vent effectuée par une girouette située à l'arrière de la nacelle. La turbine éolienne est munie de pâles fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/mn. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite.

Les turbines unies et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. À ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80 % des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

Lorsque des pales fixes sont utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au-delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou Stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

- **Un arbre dit "lent" :**

Relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

- **Un multiplicateur :**

Adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

- **Le système de refroidissement :**

Comprends généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

- **La génératrice (ou l'alternateur) :**

Est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600 kW et 2,5 MW.

- **Les signaux électroniques émis par l'anémomètre :**

Sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement

l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

- **Le système de contrôle-commande :**

Comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique. [11]

- **Une armoire de commande :**

Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

### 1.4.3.3 Classification selon la vitesse :

➤ **Les éoliennes à vitesse fixe :**

Ce mode de fonctionnement concerne principalement des éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par l'orientation des pales (pitch control). Typiquement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil connecté directement à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50 Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, pilotée par un multiplicateur, avec un glissement inférieure ou égal à 1 %. [10]

#### **A) Avantage des éoliennes à vitesse fixe :**

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électrique de commande.
- Moins cher.

➤ **Les éoliennes à vitesse variable :**

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on règle le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne.

Dans ces systèmes, la vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière, la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité, car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible. [10]

**A) Avantage des éoliennes à vitesse variable :**

- Niveau de bruit inférieur à bas régime éolien et un meilleur transfert de puissance vers la charge.

- Une meilleure extraction de l'énergie du vent.
- La vitesse variable représente l'avenir des éoliennes. En effet, si la génératrice fonctionne à vitesse fixe, les maximums théoriques des courbes ne sont pas exploités. Mais on voit clairement quand la génératrice fonctionne à vitesse variable, les maximums théoriques sont atteints pour chaque vitesse du vent. [10]

## 1.5 Notion théorique sur le vent :

### 1.5.1 Le vent :

Le vent est créé sous l'influence des différences de température et de pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil. Il réchauffe les océans et les continents, mais à des rythmes différents. Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour la masse d'air au-dessus d'eux. L'air augmente de volume lorsqu'il est chauffé, ce qui crée un déplacement des particules d'air, et c'est en captant leur énergie cinétique que les éoliennes sont mises en fonctionnement. [12]

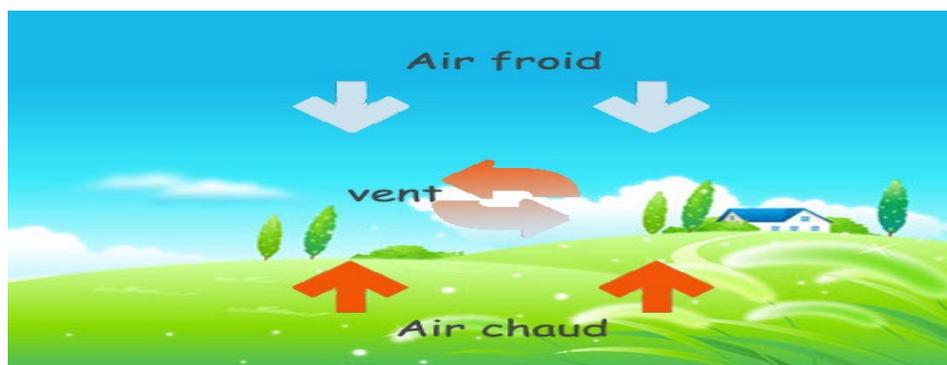


Figure 1.18 : la naissance du vent.

### 1.5.2 La direction du vent :

Le vent souffle généralement des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Cependant, aux latitudes moyennes et grandes, son orientation change en raison de la rotation de la Terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère

nord, les vents tournent dans le sens antihoraire autour des zones cycloniques et dans le sens horaire autour des zones de haute pression. Dans l'hémisphère sud, la direction est inversée par rapport à la direction précédente. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre. Il en existe plusieurs types qui se répartissent en deux grandes catégories (anémomètres à rotation et anémomètres à pression). [11]

Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au (**Tableau 1.3**).

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m <sup>2</sup> )
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

**Tableau 1.3 : échelle Beaufort.**

### 1.5.3 La vitesse du vent :

En effet, pour construire un parc éolien, afin de juger de la capacité de production d'un parc éolien, la première chose à faire est de trouver des emplacements possibles. Une étude météorologique complète du site putatif doit être menée pendant au moins un an pour déterminer la possibilité d'établir un parc. Non seulement, vous devez connaître la vitesse moyenne du vent, mais vous devez également savoir comment elle varie avec l'altitude. Les vents les plus intéressants qui fournissent finalement le plus d'énergie annuelle sont les vents réguliers avec des vitesses de 6 à 10 m/s. [1]

## 1.6 Les pales :

### 1.6.1 Nombre des pales :

Les pales sont généralement fabriquées à partir d'un mélange de fibre de verre et de matériaux composites. Leur rôle est de capter l'énergie du vent puis de la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier d'une éolienne à l'autre. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé, car il limite les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor, et améliore le coefficient de puissance par rapport aux systèmes bipales ou mono pale. Ainsi, ce dernier augmente de 10 % lorsqu'on passe d'une à deux pales et de 3 % lorsqu'on passe de deux à trois pales. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien et les aspects esthétiques d'un système tripale constitue un avantage supplémentaire par rapport à un système bipale.

### 1.6.2 Bilan des forces exercées sur une pale :

La (Figure 1.17) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante du vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . [10]

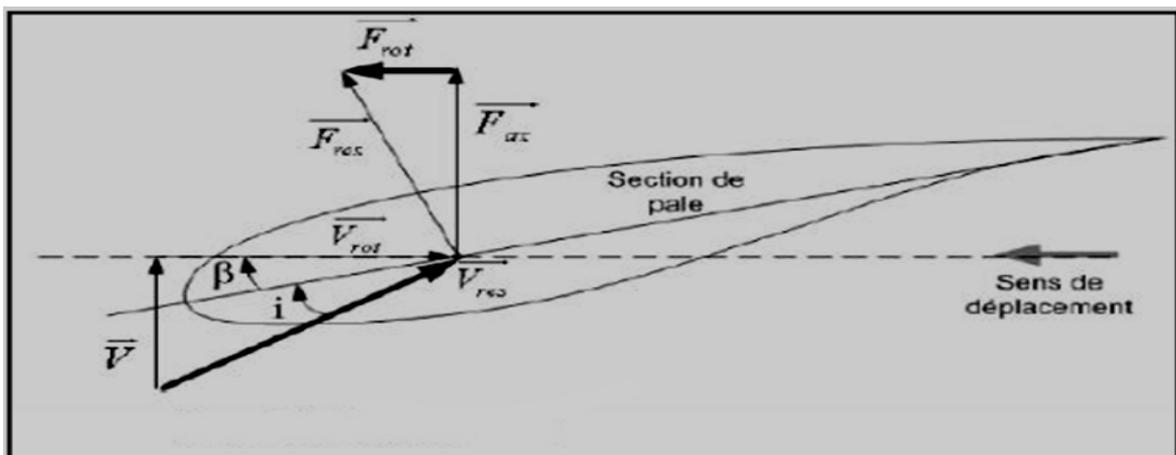


Figure 1.19 : Bilan des forces sur une pale.

## 1.7 Principe de conversion d'énergie et le fonctionnement général d'une éolienne :

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. À partir de l'énergie cinétique des particules de masse d'air en mouvement traversant la surface active  $S$  de la voilure. Les éoliennes peuvent convertir l'énergie cinétique du vent en électricité. Cette conversion se fait en deux étapes.

- Au niveau de l'éolienne qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent, la convertissant en énergie mécanique utilisable sur le rotor. Là où l'éolienne se compose généralement de trois pales, portées par le rotor et montées au sommet d'un mât vertical, qui peut mesurer jusqu'à 120 m de long. L'hélice est entraînée en rotation par le vent à une vitesse d'au moins 2,8 m/s. La nacelle qui la porte est équipée d'un gouvernail qui s'oriente automatiquement face au vent. Les pales pivotent pour capter le plus de vent possible, et plus elles sont grandes, plus elles tournent lentement. Si la vitesse du vent dépasse 25 m/s, l'éolienne freine automatiquement et s'arrête de fonctionner pour éviter toute perte de contrôle.
- Au niveau du générateur, l'énergie mécanique est reçue du rotor de la turbine et convertie en énergie électrique, effectuée dans la nacelle, où l'hélice entraîne l'arbre. Comme il ne tourne pas assez vite pour produire de l'électricité, un multiplicateur augmente cette vitesse à 1500 tr/min et la transmet à un deuxième arbre, qui à son tour entraîne le rotor de l'alternateur. Dans ce dernier, selon le principe de Lenz, l'interaction entre les aimants du rotor et les bobines du stator, induit une tension triphasée à la sortie du stator. Un transformateur situé à l'extérieur du mât augmente cette tension avant l'injecteur dans le réseau ou d'isoler la charge.

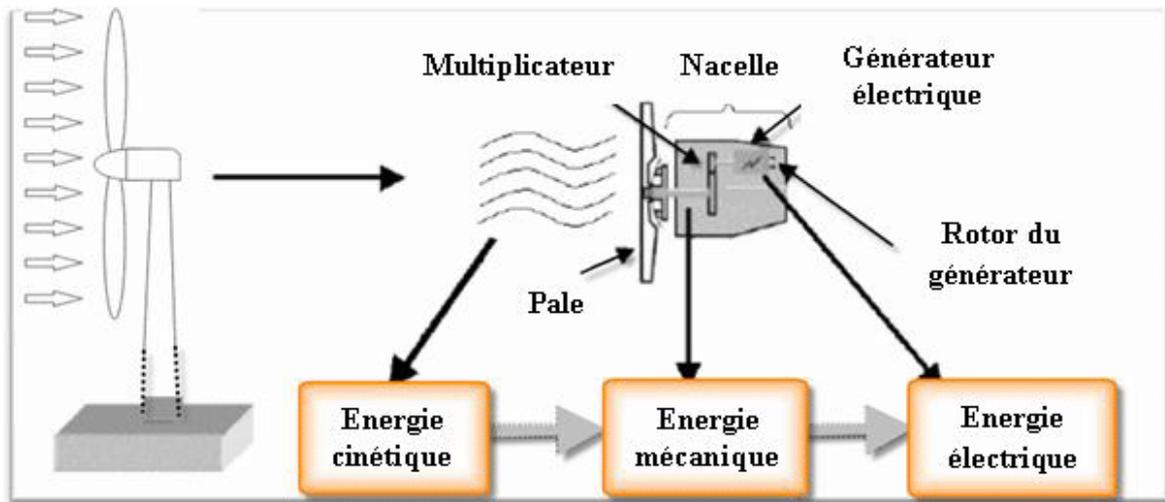


Figure 1.20 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

## 1.8 Applications des éoliennes :

La vocation principale d'une éolienne domestique est de produire de l'électricité. Il est l'application la plus demandée pour les besoins des domestiques.

Par le passé, les moulins utilisaient déjà la force du vent pour actionner les meules, servant à broyer des céréales et à produire de la farine. Aujourd'hui, même cette application est moins courante, mais les éoliennes sont encore utilisées pour le pompage d'eau en milieu rural et les zones isolées.

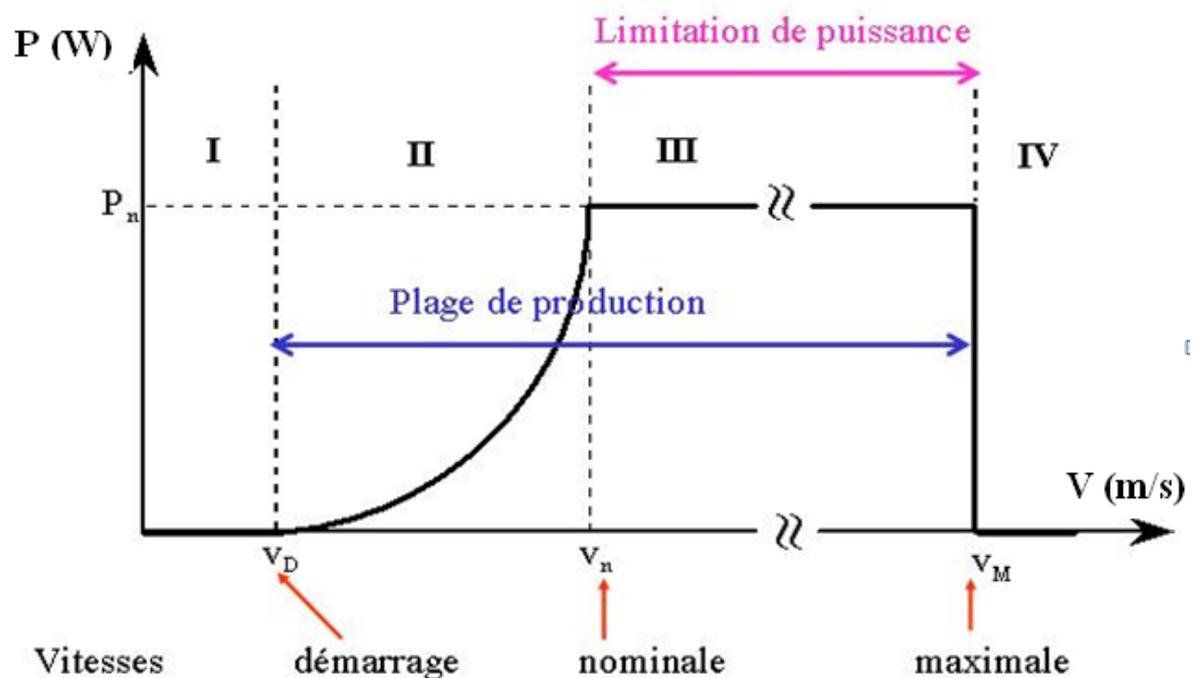
- Il existe d'autres applications des éoliennes, par exemple, pour les particuliers :  
Plus généralement, une éolienne pour particulier est destinée à réduire les factures d'électricité. Car même si dans la plupart des cas, il est obligatoire d'être relié au réseau, l'électricité produite par une éolienne permet de faire face aux principaux besoins électriques domestiques et a un impact bénéfique sur la facture d'électricité.
- Applications de l'éolienne pour les entreprises et le monde agricole :

Les éoliennes de petites tailles peuvent parfaitement être adaptées aux besoins d'une entreprise ou d'une exploitation agricole. Effectivement, dans certaines situations, la consommation électrique peut être importante et l'éolienne intervient comme une solution économique et écologique.

- Dans des cas précis, comme sur les voiliers, des micros éoliennes sont utilisés pour subvenir aux besoins électriques peu importants tels que l'alimentation de la radio et du matériel informatique de navigation.

### 1.9 Zones de fonctionnement de l'éolienne :

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent : [7]



**Figure 1.21 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.**

$V_D$ : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs,  $V_D$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

$V_n$  : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs,  $V_n$  varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

$V_M$  : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes,  $V_M$  vaut 25m/s. [3]

- **Zone I :  $V < V_D$  :**

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible. [3]

- **Zone II :  $V_D < V < V_n$  :**

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle. [3]

- **Zone III :  $V_n < V < V_M$  :**

La vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et La puissance fournie  $P$  reste égale à  $P_n$ . [7]

- **Zone IV :  $V > V_M$  :**

La vitesse du vent est trop importante, La turbine s'arrête pour ne pas détériorer le générateur éolien (les pales de la turbine sont mises en drapeaux  $\beta = 90^\circ$ ). Donc la puissance extraite est nulle. [7]

## **1.10 Systèmes de régulation mécanique de la turbine éolienne :**

Il existe trois systèmes de régulation. Ces systèmes servent principalement à limiter la puissance captée pour des vents forts, mais certains systèmes peuvent également intervenir pour favoriser la rotation des turbines.

### **1.10.1 Régulation par décrochage aérodynamique passif « Passive Stall » :**

Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "stall control", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts.

Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des éoliennes, car il a l'avantage de ne pas nécessiter de pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor. [13]

### **1.10.2 Régulation par décrochage aérodynamique actif « active stall » ou « combi stall » :**

Ce type de régulation vise à utiliser les atouts de la régulation passive et de la régulation active afin de contrôler de manière plus précise la production d'électricité. Ce système est dit à régulation active par décrochage aérodynamique, "active stall". On l'utilise pour les éoliennes de fortes puissances. [13]

### **1.10.3 Régulation par variation du calage des pales « pitch control » :**

La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "pitch control", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort. [13]

### **1.11 Sécurité par grand vent :**

Pour éviter l'emballement du rotor par fort vent, les pales sont conçues pour décrocher progressivement à des vitesses critiques. Ainsi, lorsque le vent augmente, le rotor n'augmente plus en vitesse, car des turbulences se créent autour des pales et réduisent leur portance, réduisant ainsi le couple produit.

Certains rotors sont équipés d'aérofreins placés sur le bord de fuite (comme un avion) ou aux extrémités des pales, actionnés par les systèmes centrifuges ou hydrauliques pour les plus grosses machines.

Toutes les éoliennes possèdent un frein de sécurité mécanique pour ralentir ou maintenir le rotor immobile. Le plus souvent, ce sont des freins à disque à commande hydraulique placée sur l'arbre du générateur. [6]

### **1.12 Conclusion :**

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception, les différents types d'éoliennes utilisés et la classification des éoliennes.

**Chapitre**

**02**

*Les réseaux de  
neurones*

## 2.1 Introduction :

Le réseau de neurones artificiels est considéré comme l'une des méthodes de calcul mathématiques modernes pour résoudre des problèmes non-linéaires et dynamiques. Ces dernières années, la recherche dans le domaine des réseaux de neurones a fait l'objet de plus en plus d'attention, précisément en raison de sa capacité d'apprentissage et généraliser les données, en utilisant des neurones de traitement parallèle.

Dans ce chapitre, nous avons choisi la commande par réseau de neurones dans le but d'obtenir un algorithme qui réalise le meilleur compromis entre performance, robustesse et facilité d'implémentation.

## 2.2 Historique :

L'histoire des réseaux de neurones artificiels revient au 1943, où Mac Culloch et Pitts ont proposé des neurones formels mimant les neurones biologiques et capables de mémoriser des fonctions booléennes simples.

Les réseaux de neurones artificiels réalisés à partir de ce type de neurones sont ainsi inspirés du système nerveux. Ils sont conçus pour reproduire certaines caractéristiques des mémoires biologiques par le fait qu'ils sont massivement parallèles, capables d'apprendre et de mémoriser l'information dans les connexions entre les neurones, capables de traiter des informations incomplètes.

En 1949, Hebb a mis en évidence l'importance du couplage synaptique dans l'apprentissage par renforcement ou dégénérescence des liaisons inter-neuronales lors de l'interaction du cerveau avec le milieu extérieur.

Le premier modèle opérationnel est le perceptron simple inspiré du modèle visuel et capable d'apprentissage. Il a été proposé en 1958 par Rosenblatt. Les limites du Perceptron monocouche du point de vue

performance ont été montrées en 1969 par les mathématiciens Minsky et Papert.

Les travaux de Hopfield en 1982 ont montrés que des réseaux de neurones artificiels étaient capables de résoudre des problèmes d'optimisation et ceux de Kohonen (1982) ont montré qu'ils étaient capables des résoudre des tâches de classification et de reconnaissance.

C'est en 1986 que Rumelhart, Hinton et Williams publient l'algorithme de la " retro propagation de l'erreur ", qui permet d'optimiser les paramètres d'un réseau de neurones à plusieurs couches.

À partir de cette date, la recherche sur les réseaux de neurones s'intensifie encore, aboutissant, dans les années 1990, à des applications commerciales. [14]

## 2.3 Concepts et définitions :

### 2.3.1 Le neurone biologique :

Les neurones (cellules nerveuses) sont des cellules différenciées qui sont biologiquement spécialisées pour traiter et transmettre des informations. Ceci est un schéma d'un neurone biologique. [15]

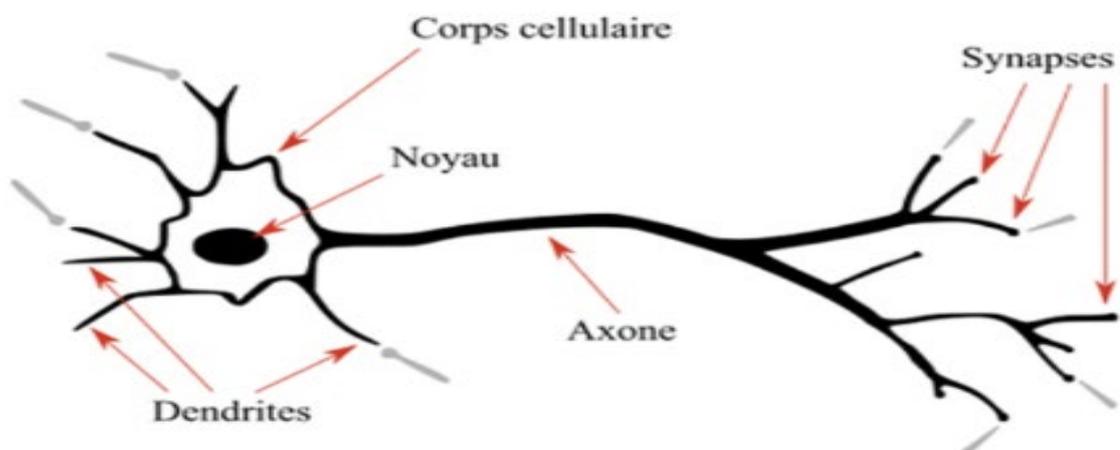


Figure 2.1 : Le neurone biologique.

Le neurone biologique est composé de quatre parties distinctes :

- Le corps cellulaire : qui contient le noyau de la cellule nerveuse; c'est en cet endroit que prend naissance l'influx nerveux, qui représente l'état d'activité du neurone.
- Les dendrites : ramifications tubulaires courtes formant une espèce d'arborescence autour du corps cellulaire; ce sont les entrées principales du neurone, qui captent l'information venant d'autres neurones.
- L'axone : longue fibre nerveuse qui se ramifie à son extrémité; c'est la sortie du neurone et le support de l'information vers les autres neurones.
- La synapse : qui communique l'information, en la pondérant par un poids synaptique, à un autre neurone; elle est essentielle dans le fonctionnement du système nerveux.

Chaque neurone effectue une opération très simple, qui est en fait une somme pondérée de ses entrées. Le résultat est comparé à un seuil et le neurone devient excité si ce seuil est dépassé. L'information contenue dans le cerveau est représentée par les poids donnés à l'entrée de chaque neurone. Le système est tolérant aux fautes en raison du grand nombre de neurones et de leurs interconnexions. Ainsi, les défauts des éléments de la mémoire (neurones) n'entraînent aucune perte réelle d'informations, mais seulement une légère diminution de la qualité de toutes les informations contenues dans le système. C'est pourquoi nous pouvons reconnaître le visage d'une personne, par exemple, même si cette personne vieillit.

### **2.3.2 Communication entre neurones :**

Les neurones stimulés envoient des impulsions électriques ou des potentiels d'action à d'autres neurones. Ces impulsions se propagent le long de l'axone unique de la cellule.

Au point de contact entre neurones, la synapse, ces impulsions des excitations atteint un certain seuil, le neurone génère un potentiel d'action d'une amplitude d'environ 100 ms et pendant une Durée de 1 ms.

Le neurone émettant le signal est appelé neurone-près synaptique, et le neurone qui reçoit ce signal est appelé neurone post-synaptique. [23]

### 2.3.3 Le neurone artificiel :

Le neurone artificiel (formel) est donc une modélisation mathématique qui reprend les principes du fonctionnement du neurone biologique, chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire. Il reçoit un nombre variable d'entrées en provenance de neurones amont. À chacune de ces entrées est associé un poids  $w$  représentatif de la force de la connexion. Chaque processeur élémentaire est doté d'une sortie unique, qui se ramifie ensuite pour alimenter un nombre variable de neurones aval. À chaque connexion est associé un poids.

La première étude systématique du neurone artificiel est due au neuropsychiatre McCulloch et au logicien Pitts, qui s'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, proposèrent en 1943 le modèle suivant [4] :

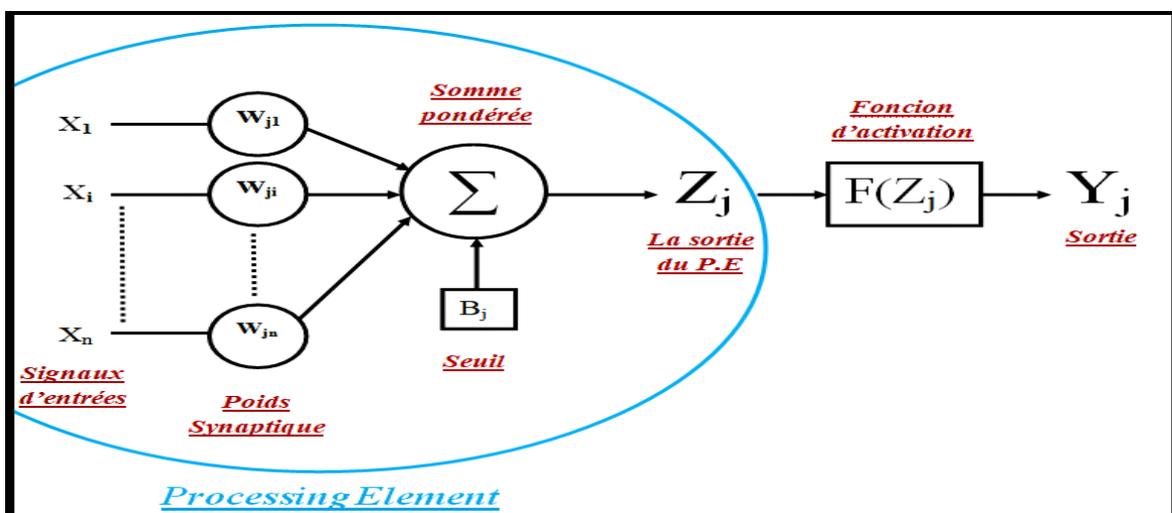


Figure 2.2 : Neurone formel de McCulloch et Pitts

Les neurones formels (**Figure 2.2**) sont dotés de caractéristiques inspirées de celles des neurones biologiques que nous avons passées en revue dans le titre précédent :

- Le potentiel d'action des cellules nerveuses : il s'agit ici (pour le neurone formel) d'une valeur numérique, qui peut être transmise à des neurones en aval. Un neurone formel, ne peut transmettre qu'une valeur unique qui correspond à son état d'activation.
- Les Dendrites : les neurones biologiques leur permettent de recevoir différents signaux de l'extérieur. De même, un neurone formel peut recevoir des signaux de plusieurs neurones. Ces signaux  $X_i$  sont combinés en un signal d'entrée unique. ( $\sum$  : la somme pondérée)
- Les synapses : les valeurs  $W_{ji}$  pondèrent les signaux émis par les différents neurones situés en amont. On retrouve ici l'analogie des synapses qui peuvent être inhibitrices ( $W_{ji} < 0$ ), ou excitatrices ( $W_{ji} > 0$ ).
- Le seuil d'activation : une fonction d'activation  $A$  gère l'état du neurone formel. Généralement,  $A \approx 1$  le neurone est excité et il est au repos si  $A \approx -1$  ou  $A \approx 0$  selon le cas.

Pour un nombre compris entre ( $j=1$ ) et en nombre quelconque  $n$ , le neurone formel va calculer le somme de ses entrées ( $X_1, \dots, X_n$ ), pondérées par les poids synaptique ( $W_1, \dots, W_n$ ), et la comparer à son seuil tête. Si le résultat est supérieur au seuil, alors la valeur renvoyée est 1, sinon la valeur renvoyée est 0. [18]

D'où la **formule (2.1)** :

$$Z_j = \sum_{i=1}^n W_{ji} X_i + B_j \quad (2.1)$$

$Z_j$  : Est la sortie de processing element.

$W_{ji}$  : Désigne les poids synaptiques.

$X_i$  : Représente les signaux d'entrées.

$B_j$  : Le seuil interne du neurone.

Alors, la sortie du P.E. calculée, est convertie à une valeur d'activation.

Donc, on peut l'écrire comme suit : **Formule (2.2)** :

$$Y_j = F(Z_j) \quad (2.2)$$

$Y_j$  : Est la sortie de neurone.

$F$  : La fonction d'activation.

## 2.4 Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel :

On peut résumer la modélisation précédente (**Figure 2.2**) par le (**Tableau 2.1**), qui permet de voir clairement la transition entre les neurones biologiques et formels. [13]

<b>Neurone biologique</b>	<b>Neurone artificiel</b>
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrite	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation

**Tableau 2.1 : analogie entre le neurone biologique et le neurone formel.**

### 2.4.1 Entrées :

Elles peuvent être :

Booléennes. Binaires (0, 1) ou bipolaires (-1, 1). Réelles

### 2.4.2 Les principales fonctions d'activation :

<b>Catégorie</b>		<b>La fonction</b>	<b>La Formule mathématique</b>	<b>Le graphe</b>
<b>seuil</b>	Fonction de Heaviside		$F(Z_j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } Z_j > 0 \\ 0 & \text{Si } Z_j < 0 \end{cases}$	
	Fonction de signe		$F(Z_j) = \begin{cases} 1 & \text{Si } Z_j > 0 \\ -1 & \text{Si } Z_j < 0 \end{cases}$	
<b>Linéaire</b>	Identité		$F(Z_j) = Z_j$	
	Fonction linéaire à seuil ou multi-seuil		$F(Z_j) = \begin{cases} -1 & \text{Si } Z_j \leq -1 \\ Z_j & \text{Si } -1 \leq Z_j \leq 1 \\ 1 & \text{Si } Z_j \geq 1 \end{cases}$	
	Fonction Linéaire positif		$F(Z_j) = \begin{cases} 0 & \text{Si } Z_j < 0 \\ Z_j & \text{Si } Z_j \geq 0 \end{cases}$	
<b>Non Linéaire</b>	<b>Les fonctions sigmoïdes (logistique)</b>	Logsig	$F(Z_j) = \frac{1}{1 + \exp(-Z_j)}$	
		Tansig	$F(Z_j) = \frac{1 - \exp(-Z_j)}{1 + \exp(-Z_j)}$	

**Tableau 2.2 : Différentes fonctions d'activation les plus utilisées**

Les fonctions d'activation mentionnées précédemment représentent généralement une forme de non-linéarité. Son rôle est de réduire l'activité des neurones. Les catégories présentées dans le tableau sont la catégorie seuil, linéaire et non linéaire. [13]

### 2.4.3 Fonction de sortie :

Elle calcule la sortie d'un neurone en fonction de son état d'activation. En général, cette fonction est considérée comme la fonction identité. [13]

Elle peut-être :

Binaire (0, 1) ou bipolaire (-1, 1), Réelle

## 2.5 Réseaux de neurones artificiels :

### 2.5.1 Définition :

Un réseau de neurones artificiels (RNA) est un système informatique avec des caractéristiques similaires aux réseaux de neurones biologiques. Il est constitué de plusieurs unités (neurones) organisées en différentes couches appelées couches réseau. Les neurones appartenant à une même couche ont les mêmes caractéristiques et utilisent le même type de fonction d'activation. Entre deux couches adjacentes, des connexions s'établissent grâce à des poids qui agissent comme des synapses. Les informations sont portées par leurs valeurs de poids et la structure d'un réseau de neurones n'est utilisée que pour traiter les informations et les acheminer vers la sortie. La structure ou la topologie d'un réseau de neurones est la façon dont les neurones sont connectés. Les structures résultantes peuvent être variées, mais elles sont généralement regroupées en deux grandes familles, à savoir : les réseaux de neurones non bouclés (Acycliques "feed-forward") et les réseaux de neurones bouclés (Récurents "feed-back"). [15]

### 2.5.2 Composition d'un réseau de neurones :

Un RNA est constitué généralement de trois couches, à savoir :

- Une couche d'entrée :  
Elle se compose de tous les neurones du réseau qui reçoivent les données du problème. Par conséquent, sa taille est directement déterminée par le nombre de variables d'entrée.
- Une couche de sortie :  
Elle est constituée de l'ensemble des neurones de sortie du réseau. C'est cette couche-là qui fournit les résultats du problème.
- Une ou plusieurs couches cachées :  
Ce sont les couches qui se trouvent entre la couche d'entrée et la couche de sortie. Elles déterminent l'activité interne du réseau.

En général, les fonctions d'activation sont non linéaires sur ces couches.

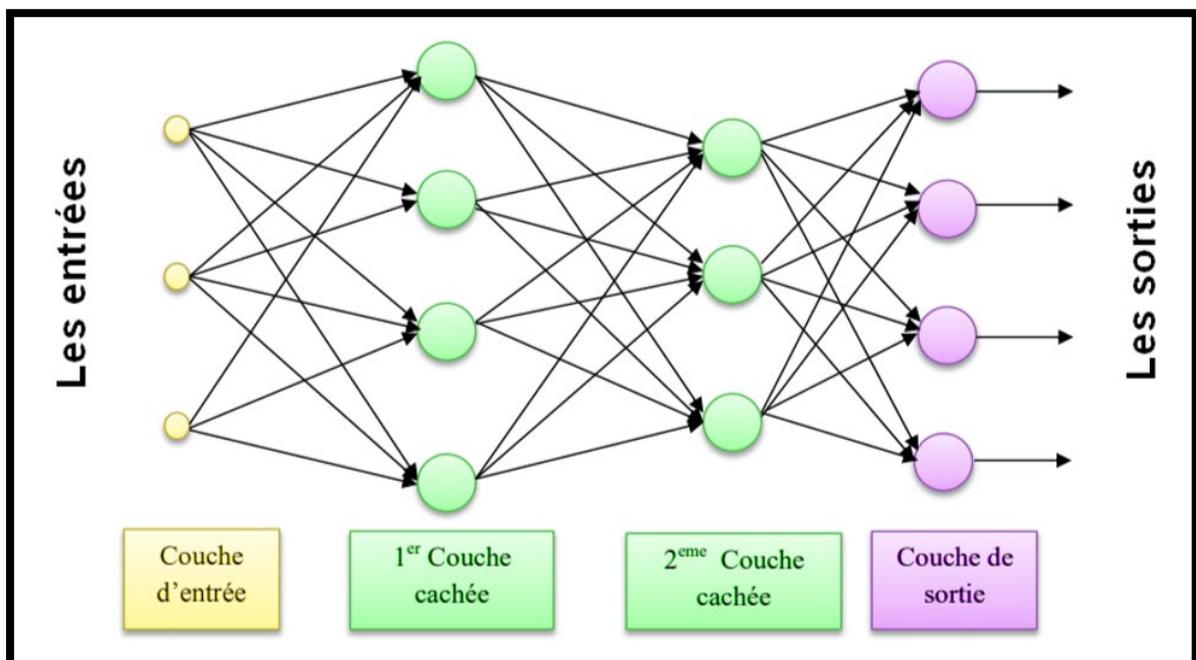


Figure 2.3 : Composition d'un réseau de neurones.

### 2.5.3 Architecture (topologie) des réseaux de neurones :

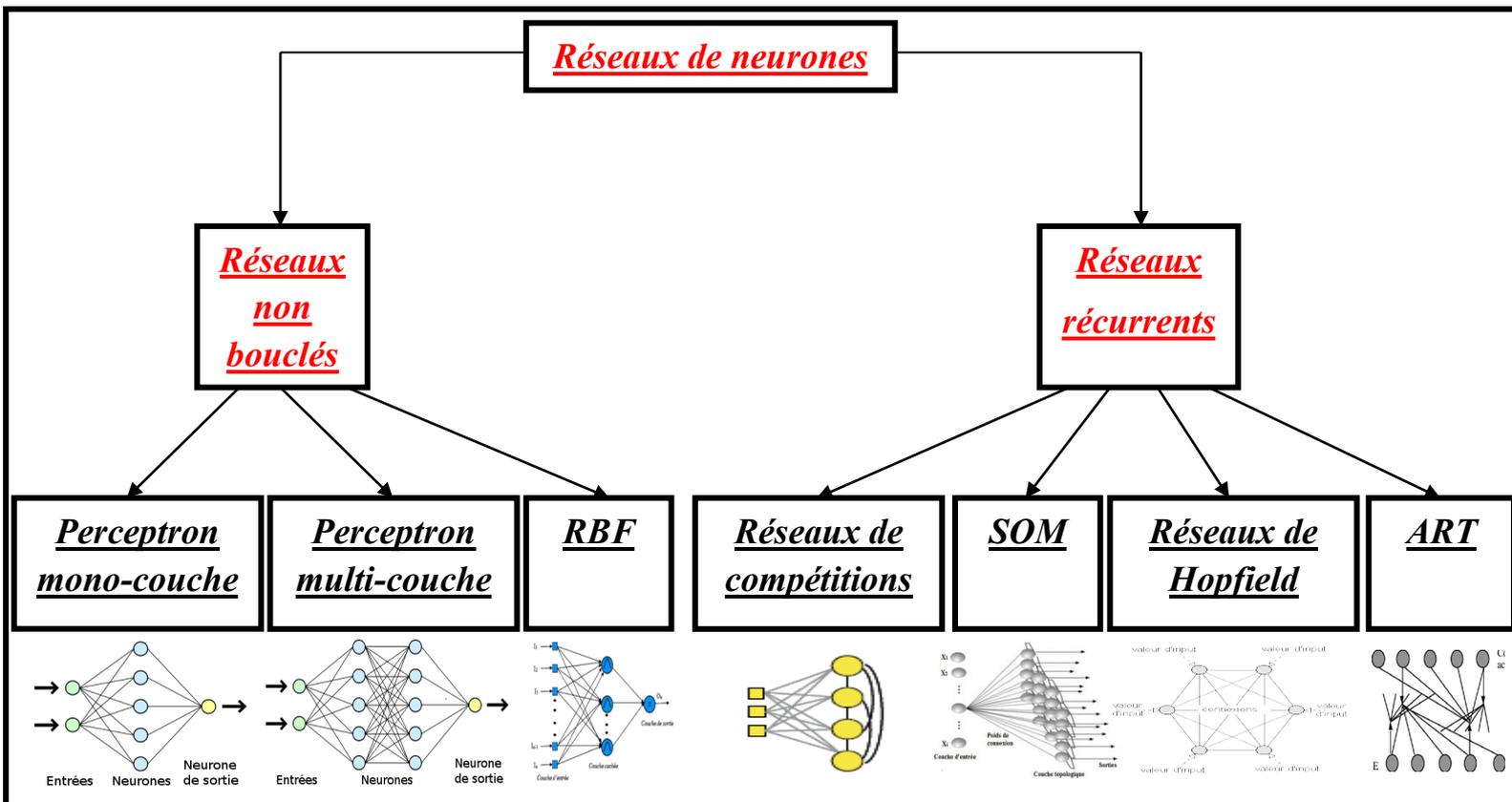
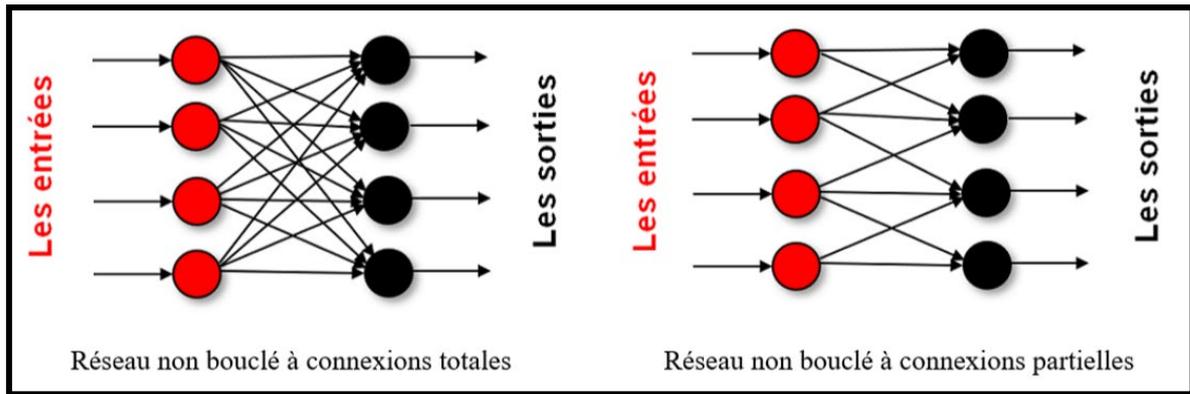


Figure 2.4 : Les différentes topologies de réseaux de neurones artificiels.

### 2.5.3.1 Les réseaux de neurones statiques (Non Boucles) :

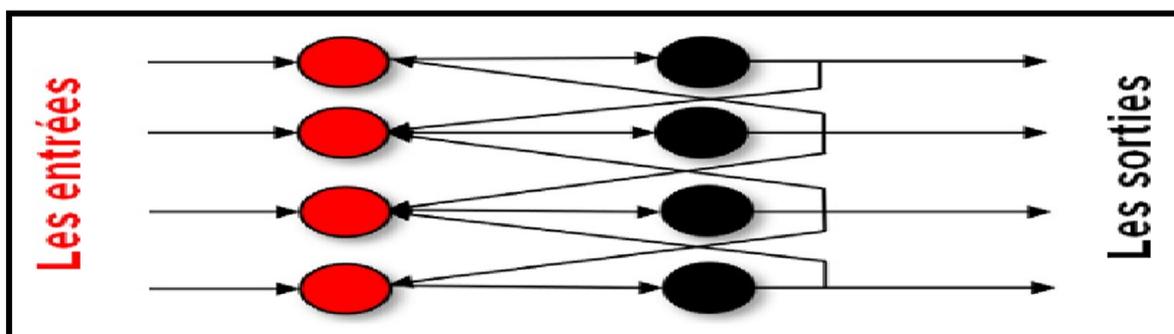
Les informations dans ces réseaux circulent directement de l'entrée vers la sortie, pas de boucles, on utilise une structure à couches pour que les neurones appartenant à une même couche ne soient pas connectés les uns aux autres... Chacune des couches recevant des signaux de la couche précédente et transmettant le résultat de ces traitements à la couche suivante. La première couche reçoit l'entrée, la dernière couche fournit les résultats du traitement et les couches intermédiaires sont appelées couches cachées et leur nombre est variable. [9]



**Figure 2.5 : Structure d'un réseau de neurones non bouclé (feed-forward).**

### 2.5.3.2 Réseau de neurones bouclé (feed-back) :

Ce sont des réseaux qui ont un ou plusieurs rebouchages internes, leurs sorties à un instant  $t$  dépendront des entrées aux mêmes instants, et aux instants antérieurs. Ces connexions récurrentes ramènent l'information en arrière par rapport au sens de propagation. Les rebouchages rajoutent donc un effet de mémorisation du passé. Ces réseaux de neurones bouclés constituent un système dynamique "à temps discret", régi par une (ou plusieurs) équation(s) aux différences non-linéaires, résultant de la composition des fonctions réalisées par chacun des neurones et des retards associés à chacune des connexions. Ils sont utilisés pour effectuer des tâches de modélisation et d'adaptation de systèmes dynamiques, de commande de processus, ou de filtrage. [3]



**Figure 2.6 : Structure d'un réseau de neurones dont les connexions sont bouclées (feed-back).**

### 2.5.4 Propriétés des réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones comportent de multiples avantages, ce qu'explique leur utilisation à grande échelle dans le domaine de l'intelligence artificielle. Un réseau de neurones possède les propriétés suivantes :

- Le Parallélisme :

C'est la base sur laquelle repose l'idée de construire de tels réseaux, où les entités élémentaires travaillent en même temps (simultanément).

- La mémoire distribuée :

Ces réseaux sont caractérisés par le fait qu'il stocke l'information en petites quantités dans différents emplacements pour ensuite rassembler l'information pour une utilisation bien plus importante.

- La Structure de connexion :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la "topologie" du modèle. Elles sont très variées, le nombre de connexions étant énorme. Cette topologie fait apparaître une certaine régularité de l'arrangement des neurones.

- La résistance aux pannes :

Un résultat immédiat découle de la caractéristique précédente qui permet de distinguer le comportement d'un tel réseau parmi d'autres dans un environnement où la panne est susceptible de se produire. En effet, la défaillance d'une partie d'un tel réseau ne nuit en aucun cas à son bon fonctionnement, car la collection de l'information presque complètement et efficacement.

- La généralisation :

C'est la capacité du réseau et l'aptitude à donner une réponse à une entrée qui ne fait pas partie des exemples appris.

- La capacité d'adaptation :

C'est la capacité d'apprentissage qui permet au réseau de compter des nouvelles contraintes ou des nouvelles données de l'environnement. De plus, il se caractérise par sa capacité d'auto organisation qui assure sa stabilité en tant que système dynamique. [22]

### 2.5.5 Quelques modèles des réseaux de neurones :

#### ➤ Perceptron simple :

Le perceptron est le premier modèle de réseau de neurones inventé en 1957 par Frank Rosenblatt<sup>1</sup>. Le but du perceptron est d'associer des formes en entrée à des réponses. Le perceptron se compose de deux couches : la couche d'entrée et la couche de sortie qui donne la réponse correspondant à la stimulation présente en entrée. Les cellules de la première couche répondent en oui/non. La réponse « oui » correspond à une valeur « 1 » et la réponse « non » correspond à une valeur « 0 » à la sortie du neurone. Les cellules d'entrée sont reliées aux cellules de sortie grâce à des synapses d'intensité variable. L'apprentissage du perceptron s'effectue en modifiant l'intensité de ces synapses. Les cellules de sortie évaluent l'intensité de la stimulation en provenance des cellules de la couche d'entrée en effectuant la somme des intensités des cellules actives. [18]

Le perceptron doit trouver l'ensemble des valeurs à donner aux synapses pour que les configurations d'entrée se traduisent par des réponses voulues. Pour cela, on utilise la règle d'apprentissage de Windrow-Hoff (Correction d'erreur).

Pour apprendre, le perceptron simple doit savoir qu'il a commis une erreur, et doit connaître la réponse qu'il aurait dû donner. De ce fait, on parle d'apprentissage supervisé, La règle d'apprentissage est locale dans ce sens que

---

<sup>1</sup> : Frank Rosenblatt : était un psychologue américain qui travaille sur l'intelligence artificielle.

chaque cellule de sortie apprend sans avoir besoin de connaître la réponse des autres cellules. La cellule ne modifie l'intensité de ses synapses (apprend) que lorsqu'elle se trompe.

Marvin Lee Minsky<sup>2</sup> a montré qu'une forme toute simple (le XOR) ne peut être apprise par un neurone de type perceptron. Un neurone ne peut séparer que deux régions séparables par un hyper plan, avec plusieurs neurones, ça va déjà mieux mais il est vite clair qu'une seule couche de perceptron ne peut pas apprendre des figures complexes.

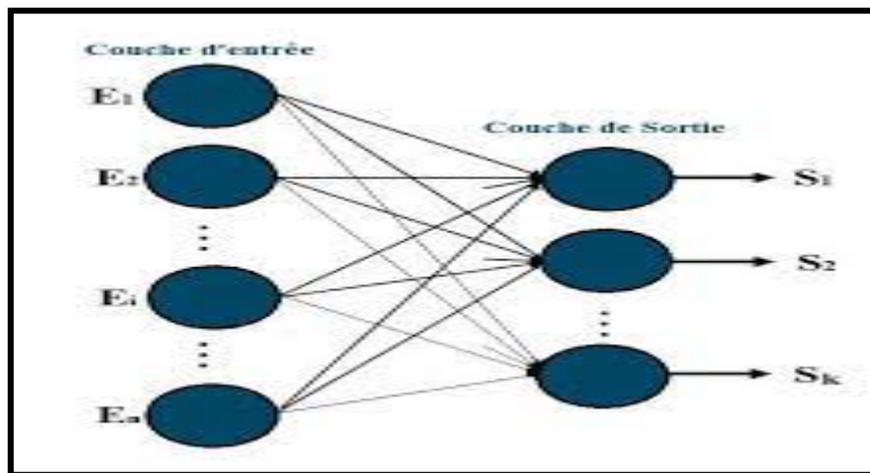


Figure 2.7 : Schéma général de perceptron simple.

➤ **Réseau auto-organisateur (réseau de Kohonen) :**

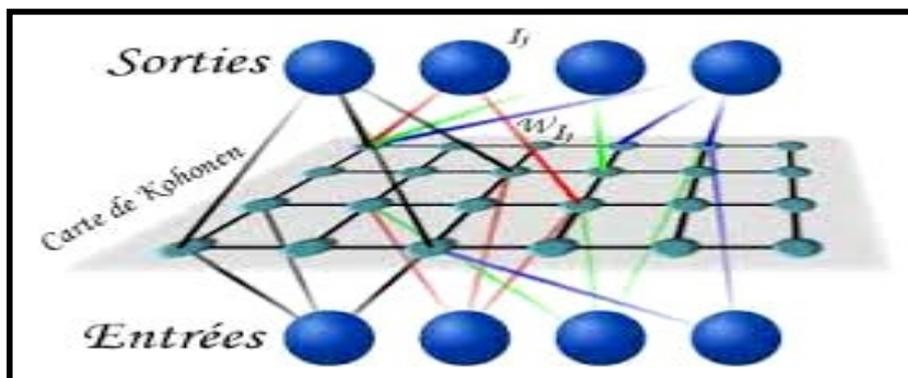
Les cartes topologiques ou cartes autos-organisatrices ont été introduites pour la première fois par T. Kohonen en 1981. Les premiers modèles cherchaient tout particulièrement à représenter des données multidimensionnelles. La particularité la plus importante des cartes auto-organisatrices est qu'elles rendent possible la comparaison des groupements qui ont réalisé directement à partir des données. Une observation est affectée à un groupe qui est projeté en un nœud de la carte. La comparaison des

<sup>2</sup> : **Marvin Lee Minsky** : est un scientifique américain, il a travaillé dans le domaine de l'intelligence artificielle, a montré en 1969 quelques limitations théoriques du perceptron simple.

projections liées à deux observations distinctes permet d'apprécier la proximité des groupes dont elles sont issues. [12]

Dans la plupart des applications, les neurones d'une carte de Kohonen sont disposés sur une grille 2D. Chaque neurone  $i$  de la carte effectue un calcul de la distance euclidienne entre le vecteur d'entrée et le vecteur poids  $W_i$ , dans les réseaux de Kohonen, la mise à jour des paramètres des neurones s'effectue sur tout un voisinage d'un neurone  $i$ , un rayon de voisinage  $r$  représente donc la longueur du voisinage d'un neurone  $i$  en termes de nombre de neurones. On définit alors une fonction  $h(i,k)$  égale à 1 pour tous les neurones  $k$  voisins du neurone  $i$  compris dans le rayon  $r$  et égal à zéro pour tous les autres neurones.

L'algorithme d'apprentissage de la carte de Kohonen se présente comme suit : après un temps très important de convergence, le réseau évolue de manière à représenter au mieux la topologie de l'espace de départ. Il faut noter que la notion de conservation de la topologie est en fait abusive puisqu'en général, la taille du vecteur d'entrée est bien supérieure à la dimension de la carte (souvent égale à 2) et il est donc impossible de conserver parfaitement la topologie. [10]



**Figure 2.8 : Carte topologique auto-adaptative de Kohonen.**

Les avantages de la carte auto-organisatrice sont :

- L'espace de sortie est un espace de représentation donc on peut visualiser les sorties de la carte.
- Représentation des données de grande dimension.

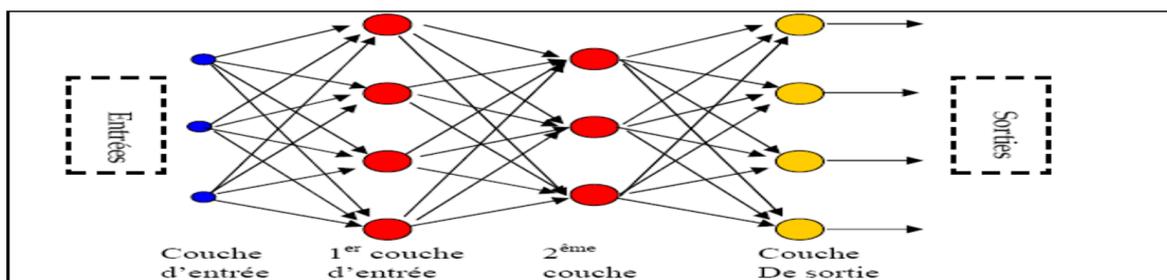
L'un des inconvénients est le temps de convergence qui est très long. Il n'y a pas de preuve de convergence en multidimensionnel et d'unicité de la représentation.

### ➤ Perceptron Multicouches (MLP) :

Le MLP avec son algorithme d'apprentissage, la rétro-propagation des erreurs est l'un des types des réseaux de neurones les plus utilisés pour la résolution de divers problèmes d'intelligence artificielle.

Le MLP ou PMC (perceptron multicouches) est un réseau orienté de neurones artificiels en couches, où l'information circule dans un seul sens, de la couche d'entrée vers la couche de sortie. La (Figure 2.9) donne un exemple d'un réseau contenant une couche d'entrée, deux couches cachées et une couche de sortie. La couche d'entrée présente toujours une couche virtuelle associée aux entrées du système.

Dans l'exemple, il y a 3 neurones d'entrée, 4 neurones sur la première couche cachée, trois sur la deuxième couche cachée et 4 neurones sur la couche de sortie, dans le cas général, un MLP peut posséder un nombre de couches quelconque et un nombre de neurones (ou d'entrées) par couche également quelconque. [17]

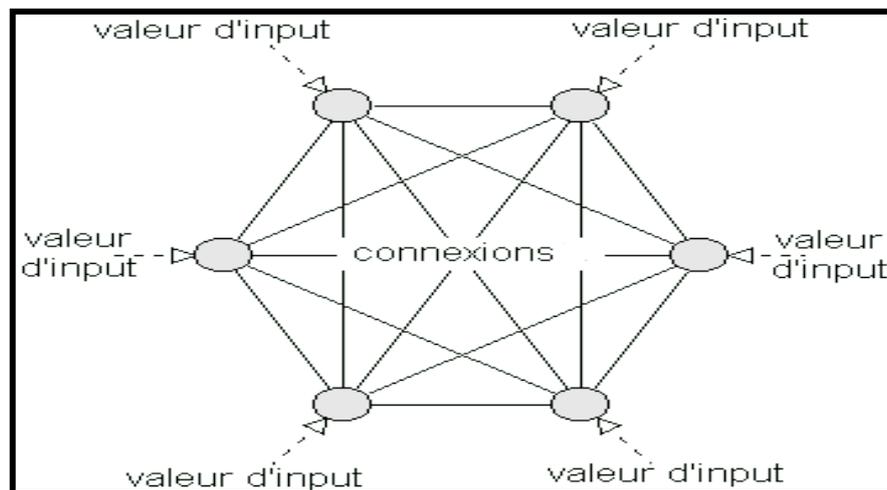


**Figure 2.9 : Exemple de réseau de type perceptron Multicouche.**

### ➤ Le modèle de Hopfield :

Le modèle de Hopfield fut présenté en 1982. Ce modèle très simple est basé sur le principe du mémoire associatif. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle ce type de réseau est dit associatif (par analogie avec le pointeur qui permet de récupérer le contenu d'une case mémoire).

Le modèle de Hopfield utilise l'architecture des réseaux complètement connectés et récurrents (dont les connexions sont non orientées et où chaque neurone n'agit pas sur lui-même). Les sorties sont en fonction des entrées et du dernier état pris par le réseau. [17]



**Figure 2.10 : Le modèle de Hopfield.**

### 2.5.6 Apprentissage des réseaux de neurones :

Pour les réseaux de neurones, l'apprentissage peut être considéré comme le problème de mise à jour des poids des connexions au sein du réseau pour accomplir avec succès la tâche souhaitée. L'apprentissage est la principale caractéristique des réseaux de neurones, et il peut se faire de différentes manières et selon différentes règles.

#### 2.5.6.1 Les types d'apprentissage :

➤ **Apprentissage supervisée :**

Dans ce type d'apprentissage, le réseau s'adapte par comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies, et la réponse attendue en sortie, ainsi, le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie, c'est-à-dire celle attendue, correspondant à une entrée donnée. Cet apprentissage est appliqué généralement pour les réseaux non bouclés.

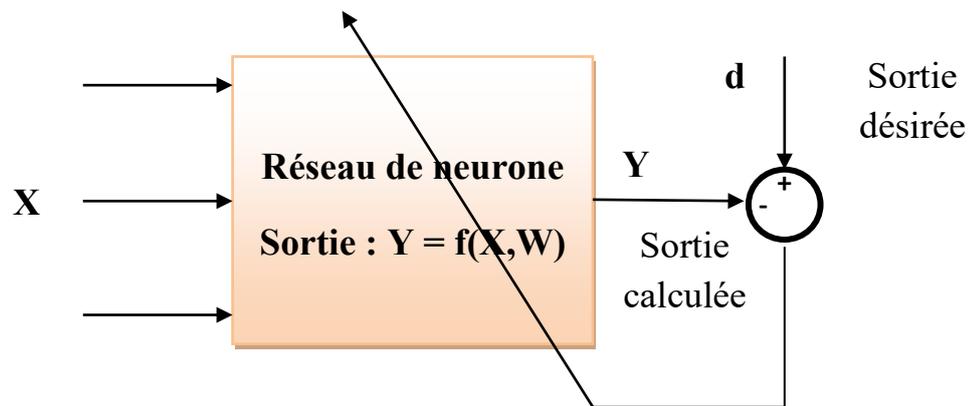


Figure 2.11 : Apprentissage supervisée.

➤ **Apprentissage non supervisé :**

Dans ce type d'apprentissage, l'adaptation des coefficients synaptiques n'est pas basée sur la comparaison avec une certaine sortie désirée, (Ce type d'apprentissage est choisi lorsqu'il n'y pas de connaissances à priori des sorties désirés pour des entrées données), mais c'est le réseau qui organise lui-même les entrées qui lui sont présentées de façon à optimiser une certaine fonction de coût, sans lui fournir d'autres éléments de réponses désirées. Cette propriété est dite Auto organisation (self organisation).

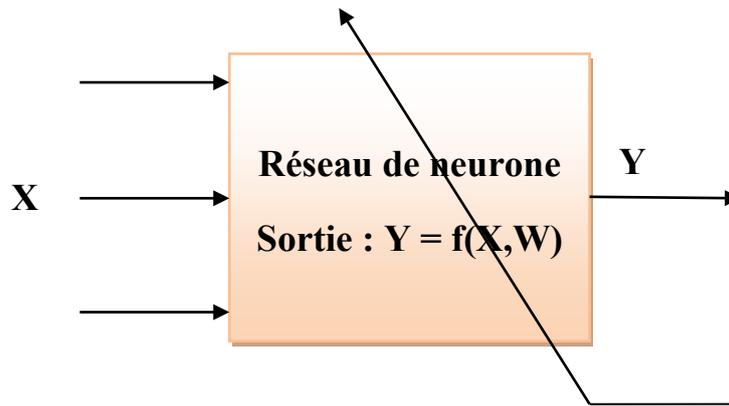


Figure 2.12 : Apprentissage non supervisé.

➤ **Apprentissage Renforcé :**

Ce mode suppose qu'un comportement de référence n'est pas disponible. Mais en revanche, il est possible d'obtenir des indications qualitatives (Exemple : correctes/incorrectes), sur les performances du réseau.

**2.5.7 Règles d'apprentissage :**

Les stratégies de modification des poids synaptiques sont dérivées des règles générales suivantes : [13]

➤ **Règle de correction d'erreur (règle de Widrow-Hoff) :**

Où le poids synaptique est adapté pour obtenir la diminution de l'erreur entre la sortie réelle du processeur élémentaire et la sortie désirée jusqu'à ce que la sortie réelle soit égal à la sortie désirée.

➤ **Règle de Boltzmann :**

Les réseaux de Boltzmann sont des réseaux symétriques récurrents. Ils possèdent deux sous-groupes de cellules, le premier étant relié (cellules dites visibles) et le second ne l'étant pas (cellules dites cachées). Cette règle d'apprentissage stochastique consiste à ajuster les poids des connexions, de telle sorte que l'état des cellules visibles satisfasse une distribution probabiliste souhaitée.

➤ **Règle de Hebb :**

Règle de Hebb : la règle de Hebb ou le poids des connexions entre deux processeurs élémentaires est renforcé, si les deux processeurs élémentaires (neurones) sont activés simultanément (de façon synchrone et répétée) ; la force de connexion synaptique va aller croissant. Il est à noter ici que si l'apprentissage est localisé, c'est-à-dire que la modification d'un poids synaptique ne dépend que de l'activation d'un neurone  $i$  et d'un autre neurone  $j$ .

➤ **Règle d'apprentissage par compétitions :**

L'apprentissage ne concerne qu'un seul neurone. Le principe de cet apprentissage est de regrouper les données en catégories. Les patrons similaires vont donc être rangés dans une même classe, en se basant sur les corrélations des données, et seront représentés par un seul neurone. Dans un réseau à compétition simple, chaque neurone de sortie est connecté aux neurones de la couche d'entrée, aux autres cellules de la couche de sortie et elle-même. La sortie va donc dépendre de la compétition entre les connexions inhibitrices et excitatrices.

➤ **La règle de rétro-propagation :**

La règle inventée par Rumelhart, Hinton et Williams en 1986. Elle est actuellement l'outil le plus utilisé dans le domaine des réseaux de neurones. L'objectif de la méthode de rétro-propagation est d'adapter les poids de la couche d'entrée à la couche cachée de façon à minimiser la valeur moyenne de l'erreur sur l'ensemble d'entraînement. L'erreur se rétro-propage à travers les couches du réseau, elle peut être appliquée à n'importe quel système composé de plusieurs sous-systèmes élémentaires qui peuvent être représentés par des fonctions connues, continues et dérivables.

## 2.6 Domaine d'application des réseaux de neurones :

Les propriétés d'apprentissage et d'approximation des réseaux de neurones, ont permis une importante application de ces derniers dans les différents domaines pratiques, notamment les domaines suivants : [10]

### 2.6.1 Classification des signaux :

Le classement des signaux dans des catégories différentes en fonction des caractéristiques de forme. (Amplitude, fréquences, phase) etc. Peut-être réalisé aisément par l'utilisation d'un réseau de neurones.

### 2.6.2 Identification des processus :

Identifier un processus, c'est d'essayer de donner un modèle plus proche ou processus réelle qui permet de reproduire avec la précision voulue, la sortie en fonction des entrées du processus, c'est typiquement un problème d'approximation qui peut être résolu un réseau de neurones.

### 2.6.3 Contrôle de système :

Contrôler un système, c'est donner un ensemble d'entrées adéquates qui permettant d'avoir la sortie désiré (position, vitesse, etc.) et comme étant la fonction liant la sortie du système avec l'ensemble de commandes est non linéaire, cette fonction peut être approché avantageusement par réseau de neurones.

### 2.6.4 Problèmes de diagnostic :

Les réseaux de neurones sont bien adaptés à la résolution des problèmes de diagnostic, utilisant la classification automatique des signaux et des formes. Dans ce contexte, on distingue plusieurs applications des réseaux de neurones pour le diagnostic des défaillances et en particulier, pour le diagnostic des pannes des machines électriques.

- Vision, parole.
- Prévision et modélisation.
- Aide à la décision.
- Robotique.

Ces quelques domaines possèdent pratiquement toutes les caractéristiques exposées précédemment, c'est pourquoi ils constituent le cœur des applications des réseaux de neurones.

Il ne faut cependant pas oublier le rôle que peuvent jouer les réseaux de neurones formels dans l'étude du cerveau en tant qu'instrument de simulation.

## **2.7 Test et évaluation :**

Une fois le réseau de neurones entraîné (après apprentissage et validation), il est nécessaire de le tester sur une base de données différente de celle utilisée pour l'apprentissage (souvent appelée la base de test). Ce test permet d'évaluer les performances du système neuronal en calculant différentes métriques d'évaluation telles que la précision, le rappel, le taux de réussite, etc. [10]

## **2.8 Avantages plus inconvénient et limites des réseaux de neurones :**

### **2.8.1 Les Avantages :**

- Réutilisabilité : Un réseau de neurones n'est pas programmé pour une application, mais pour une classe de problèmes : après une phase d'apprentissage adéquate, il peut traiter de nombreuses tâches.
- Robustesse : Les couches cachées du réseau de neurones forment une représentation abstraite des données (concepts), qui permettent de savoir catégoriser des données non traitées lors de l'apprentissage (non prévues).

- **Parallélisme** : L'architecture des réseaux permet théoriquement à un grand nombre d'éléments de calculs simples de travailler d'une façon concurrente, ce qui facilite l'obtention des résultats très rapides et aide à l'implantation des applications ayant notamment des contraintes temps-réel.
- **Logique floue** : Les réseaux de neurones se sont inspirés du fonctionnement du cerveau humain, ils savent utiliser des notions imprécises, modélisent des systèmes dynamiques et non-linéaires, le réseau établit lui-même ses connaissances, à partir d'exemples.

### **2.8.2 Les inconvénients :**

La difficulté d'interpréter le comportement d'un réseau de neurones est un inconvénient pour la mise au point d'une application. Il est également hasardeux de généraliser à partir d'expériences antérieures et de conclure ou de créer des règles sur le fonctionnement et le comportement des réseaux de neurones. [11]

### **2.8.3 Limites :**

- **Choix des attributs** : Pour permettre de travailler avec les réseaux de neurones, il est nécessaire de choisir soigneusement la représentation des données. Les attributs ne peuvent être que numériques.
- **Processus d'apprentissage** : Lorsque la durée d'apprentissage est très longue, la possibilité de perdre la capacité de généralisation par le réseau de neurones augmente, c'est-à-dire apprentissage au détriment de la généralisation (le problème du sur-apprentissage).
- **Architecture du réseau** : Le nombre de nœuds dans les couches d'entrée et de sortie sont généralement fixés par l'application, mais comment

optimiser le nombre de niveaux cachés et le nombre de nœuds dans ces niveaux ? Il n'existe pas des règles claires dans ce sens.

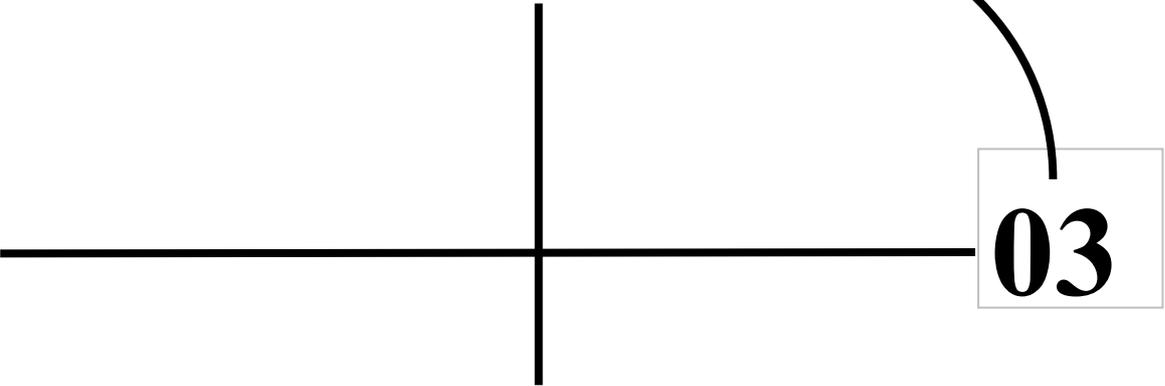
- **Exploitabilité** : Il existe une grande difficulté pour expliquer les résultats obtenus par le réseau de neurones, car ce dernier fonctionne comme une boîte noire et peut découvrir des règles et l'exploitent pour résoudre des problèmes, mais il ne permet pas la possibilité d'extraire des lois ou des formules depuis ces règles. [14]

## **2.9 Conclusion :**

Dans ce deuxième chapitre, nous avons présenté en premier lieu une introduction et historique au domaine de commande de réseau de neurones avec des notions principales relatives aux réseaux de neurones : architecture, principe de fonctionnement, apprentissage et leurs applications. En plus, nous avons notamment distingué entre les réseaux de neurones non bouclés (statiques), qui réalisent des fonctions non-linéaires, et ceux bouclés (dynamiques) qui réalisent des équations aux différences non-linéaires.

Enfin, les réseaux de neurones artificiels fournir une solution intéressante pour la modélisation et la commande des systèmes non-linéaires grâce à leurs capacités de mémorisation, d'apprentissage et de généralisation, propriétés d'approximations universelles, d'adaptation et le parallélisme du calcul.

**Chapitre**



**03**

*Modélisation de la  
chaîne de conversion  
éolienne*

### 3.1 Introduction :

Le principe de la production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique utilisable. Cette opération se déroule en deux étapes, d'abord en convertissant l'énergie du vent en énergie mécanique qui alimente le rotor d'un générateur pour produire de l'électricité. Autrefois, cette énergie était directement utilisée pour moulin à eau ou pour actionner les "pompes à eau". Mais aujourd'hui, elle est convertie en énergie électrique par l'emploi d'aérogénérateurs.

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné pour en comprendre le fonctionnement et faciliter son dimensionnement et éventuellement utiliser un logiciel pour simuler son évolution dans le temps. La modélisation de la chaîne de conversion de l'éolienne donne tous les éléments qui la représentent à partir du modèle de profil de vent, du comportement aérodynamique des pales, de l'aérogénérateur, et des convertisseurs de puissance du système de commande.

Dans ce chapitre, une modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) sera détaillée. Il est composé de trois parties :

- Une première partie est consacrée à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillée.
- La deuxième partie est consacrée à la modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent.
- Dans la troisième et dernière partie, nous présenterons la modélisation de la commande vectorielle.

## 3.2 Modélisation de la partie mécanique du système éolienne :

### 3.2.1 Conversion de l'énergie éolienne :

#### 3.2.1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

Une éolienne est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Nous pouvons écrire l'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée par la vitesse  $v$ , comme suit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dx \cdot v^2 \quad (3.1)$$

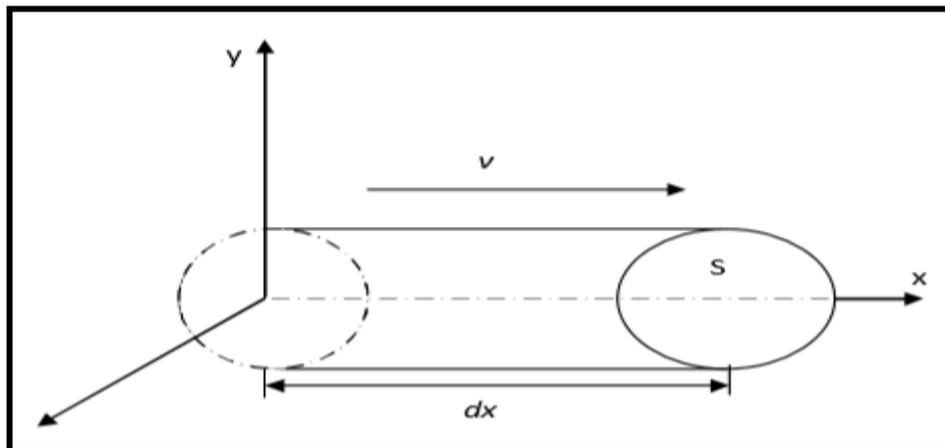


Figure 3.1 : Colonne d'air animée d'une vitesse  $v$ .

La puissance de vent  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant  $dx = vdt$ , on déduit l'expression de  $P_v$  :

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (3.2)$$

$E_c$  : énergie cinétique.

$v$  : vitesse instantanée du vent en (m/s).

$\rho$  : masse volumique de l'air, ( $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$  au niveau de la mer).

$S = \pi \cdot R^2$  : la surface de l'arbre de turbine en ( $m^2$ ).

La masse volumique peut être exprimée en fonction de l'altitude ' $H$ ' de la turbine au niveau de la mer par : [1]

$$\rho = 1.225 - 1.194 \cdot 10^{-4} \cdot H \quad (3.3)$$

### 3.2.1.2 Loi de Betz :

Plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus remarquable sera le ralentissement du vent sortant par le côté droit de l'éolienne. Si nous tentions d'extraire toute l'énergie contenue dans le vent, l'air continuerait son chemin à une vitesse nulle, ce qui en réalité signifierait qu'il n'arriverait pas à abandonner le rotor. Le résultat serait dans ce cas tout le contraire de ce que nous aurions cherché à obtenir : aucune énergie ne serait extraite du vent, l'entrée de l'air dans le rotor étant évidemment également empêchée. L'autre cas extrême serait que le vent passerait à travers le tube ci-dessus sans aucune perturbation, mais avec le même résultat : l'énergie extraite serait absolument nulle. [4]

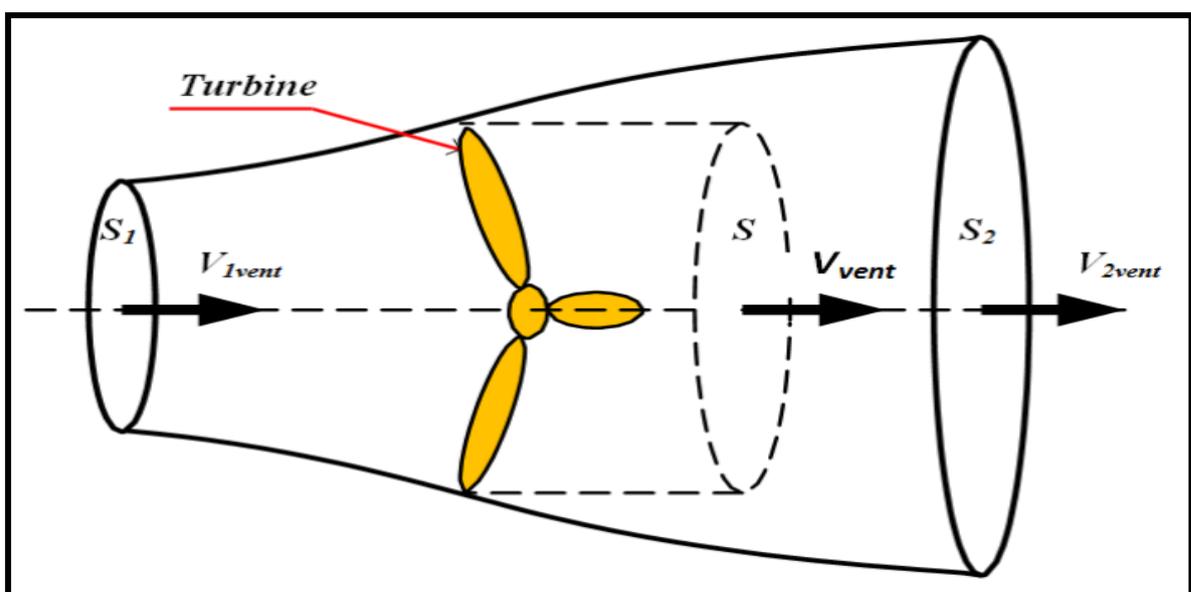


Figure 3.2 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Nous pouvons donc assumer qu'il doit y avoir une manière de freiner le vent qui se trouve entre ces deux extrémités et qui permette de façon bien plus efficace de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique. Il y a en fait une réponse très simple à cette question : une éolienne idéale freinerait le vent à 1/3 de sa vitesse originale. Afin de bien comprendre pourquoi, nous devons utiliser la loi physique fondamentale de l'aérodynamique des éoliennes.

➤ **Démonstration de la loi de BETZ :**

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et à l'infini aval d'une vitesse  $V_2$  ». [8]

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (**Figure 3.2**) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

Désignant par  $V$ , la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par  $S_1$  et  $S_2$ , les sections amont et aval du tube d'air et par  $S$  la surfacette balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 = S \cdot V \quad (3.4)$$

Avec la vitesse moyenne du vent égale à :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.5)$$

Si nous déterminons la masse «  $m$  » et que nous avons la vitesse, nous pouvons trouver la puissance pour la quantité d'air qui est entrée dans ce cylindre :

$$m = \rho \cdot \text{volume} = \rho \cdot S \cdot l = \rho \cdot S \cdot V \quad (3.6)$$

$m$  : La masse d'air.

$\rho$  : masse volumique de l'air.

$l$  : Longueur d'admission d'air.

**S** : la surface balayée par l'hélice.

**V** : la vitesse du vent en 1 sec

De la deuxième loi de Newton :

$$\mathbf{F} = \mathbf{m} \cdot \mathbf{a} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2) \quad (3.8)$$

Si nous trouvons l'expression de "la puissance absorbé par l'aérogénérateur" :

$$\mathbf{P}_{\text{aero}} = \mathbf{F} \cdot \mathbf{V} \quad (3.9)$$

En remplaçant l'expression de  $\mathbf{m}, \mathbf{a}$  et  $\mathbf{V}$  dans les l'équation (3.9) on obtient :

$$\mathbf{P}_{\text{aero}} = \rho \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V} \cdot (\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_2) \cdot \left( \frac{\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2}{2} \right) \quad (3.10)$$

Donc :

$$\mathbf{P}_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{V} \cdot (\mathbf{V}_1^2 - \mathbf{V}_2^2) \quad (3.11)$$

### 3.2.1.3 La vitesse spécifique ou normalisée :

On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t \cdot R_t$  sur la vitesse instantanée du vent  $V$ . Elle est donnée par l'expression suivante : [3]

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (3.12)$$

$R_t$  : Rayon des pales ou de la surface balayée en m.

$V$  : Vitesse de vent en m/s.

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation de la turbine (avant multiplicateur) en rad/s.

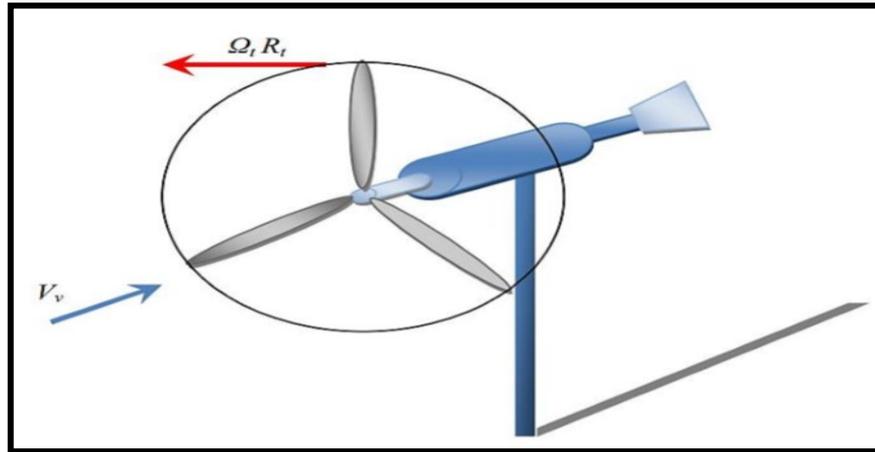


Figure 3.3 : Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle ( $\Omega_t R_t$ ).

### 3.2.1.4 Coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance est désigné comme le rapport entre la puissance extraite du vent (récupérable) et la puissance totale théoriquement disponible. [5]

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_v} = \frac{\left(1 + \left(\frac{v_2}{v_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)}{2} \quad (3.13)$$

Le coefficient  $C_p$  est variable, il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega t$  et des paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage  $\beta$ . Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de BETZ, est de  $16/27$ , soit  $0.593$ . Cette limite n'est en réalité jamais atteinte. Pour les meilleures machines à axe horizontal, bipales ou tripales, elles se situent à  $60-65\%$  de la limite de BETZ en ne récupérant globalement que  $40\%$  de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} \cdot C_{p \max} \quad (3.14)$$

$C_{p \text{ max}}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{\text{opt}}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse du vent nominale  $V_{\text{net}}$  une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{\text{tur}_n}$ . [6]

L'angle de calage  $\beta$  : est un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation par conséquent, l'apparence de la courbe  $C_p$  change pour chaque angle de calage  $\beta$ . [6]

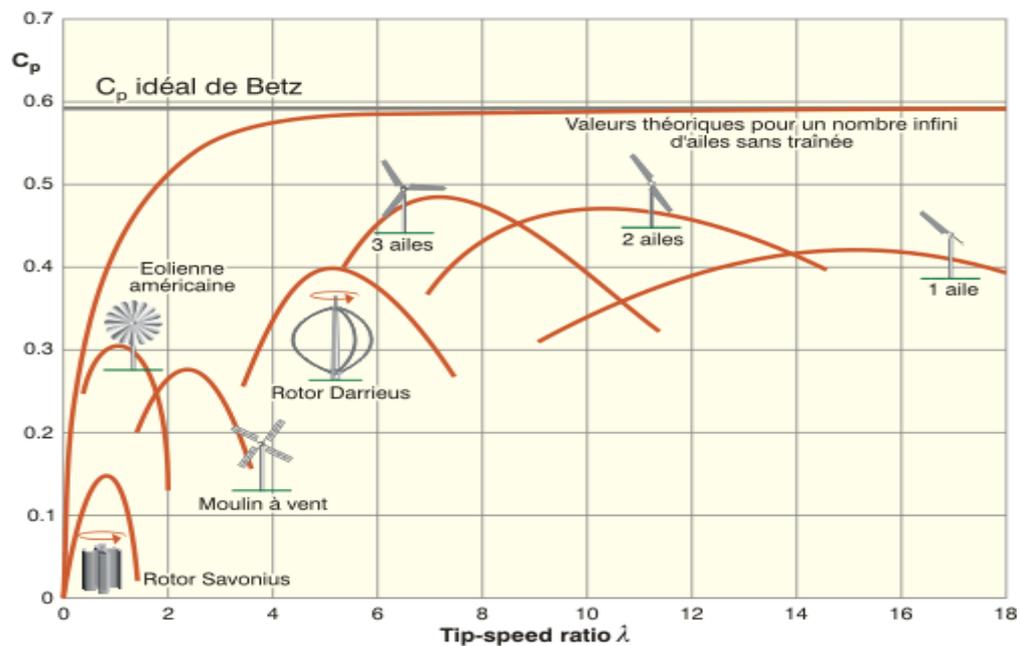


Figure 3.4 : Coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes.

### 3.2.1.5 La production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (3.2) et (3.13), la puissance mécanique  $P_{\text{aero}}$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{\text{aero}} = C_p \cdot P_v \quad (3.15)$$

En remplaçant l'expression de  $P_v$  dans l'équation (3.15) :

$$P_{\text{aero}} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (3.16)$$

### 3.2.2 Modélisation du système éolienne :

#### 3.2.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes : [8]

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottement des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

On obtient alors un modèle mécanique simple :

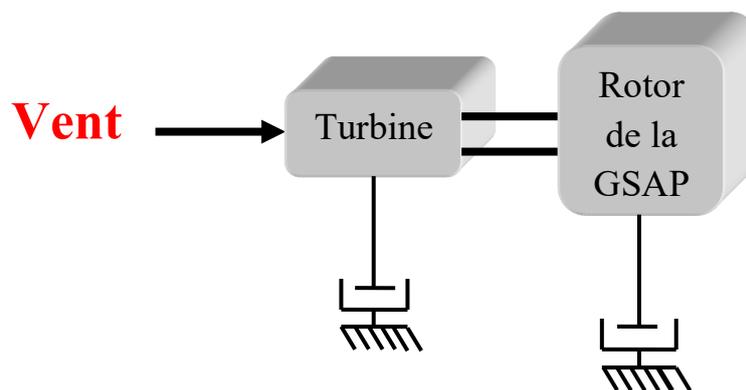


Figure 3.5 : Modèle mécanique simplifié de la turbine.

### 3.2.2.2 Modèle du vent :

L'énergie cinétique du vent est transformée par la turbine en énergie mécanique pour alimenter le générateur qui transforme cette énergie sous forme électrique. Pour obtenir des mesures du vent plus exactes au niveau de la hauteur de turbine est complexe, à cause de la rapidité de changement à ses paramètres (la vitesse, la direction) en fonction du temps. Parce que la direction de vecteur de vent dans l'axe horizontal d'une éolienne est importante au point de vue de voilure éolienne. [19]

Donc la variation de la vitesse du vent est une fonction scalaire évolue selon le temps comme suite :

$$V_v(t) = 10 + 0.2\sin(0.1047t) + 2\sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(3.6645t) \quad (3.17)$$

### 3.2.2.3 Modélisation des pales :

La section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur : [2]

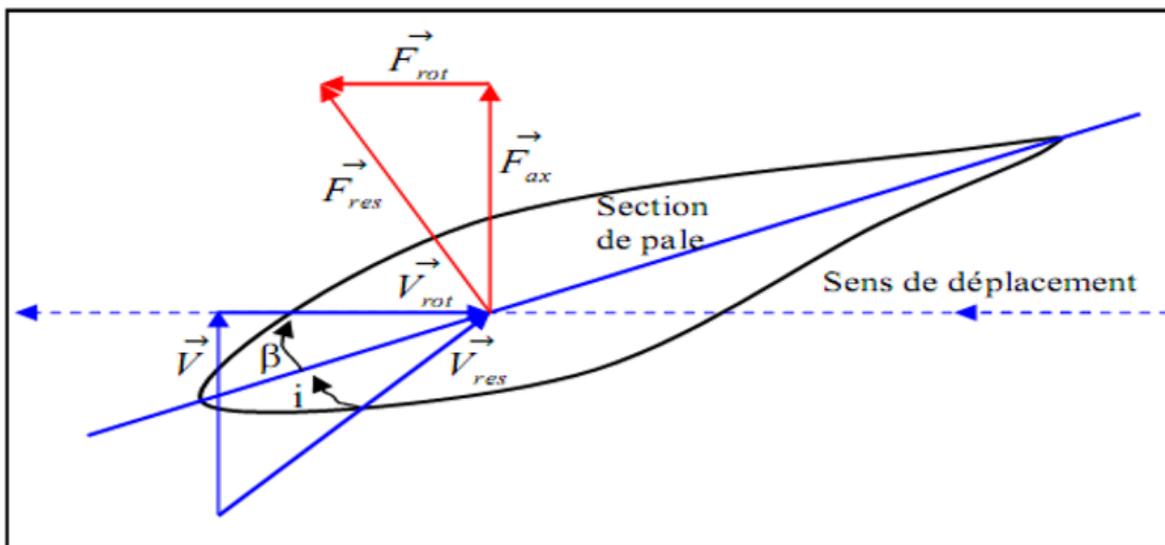


Figure 3.6 : Bilan des forces.

La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation

de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop levée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par éolienne doit être limitée à sa valeur nominale.  $\beta$  et  $i$  sont respectivement l'angle de calage et angle d'incidence. Lorsque la vitesse du vent devient trop levée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par éolienne doit être limitée à sa valeur nominale. [3]

#### **3.2.2.4 Les étapes de la modélisation du système éolienne :**

Dans cette partie traitant le côté mécanique d'un système éolien, nous allons modéliser la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission :

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables.
- Le multiplicateur ajuste la vitesse de l'éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre relie la partie mécanique à la partie électrique, autrement dit la turbine au générateur.

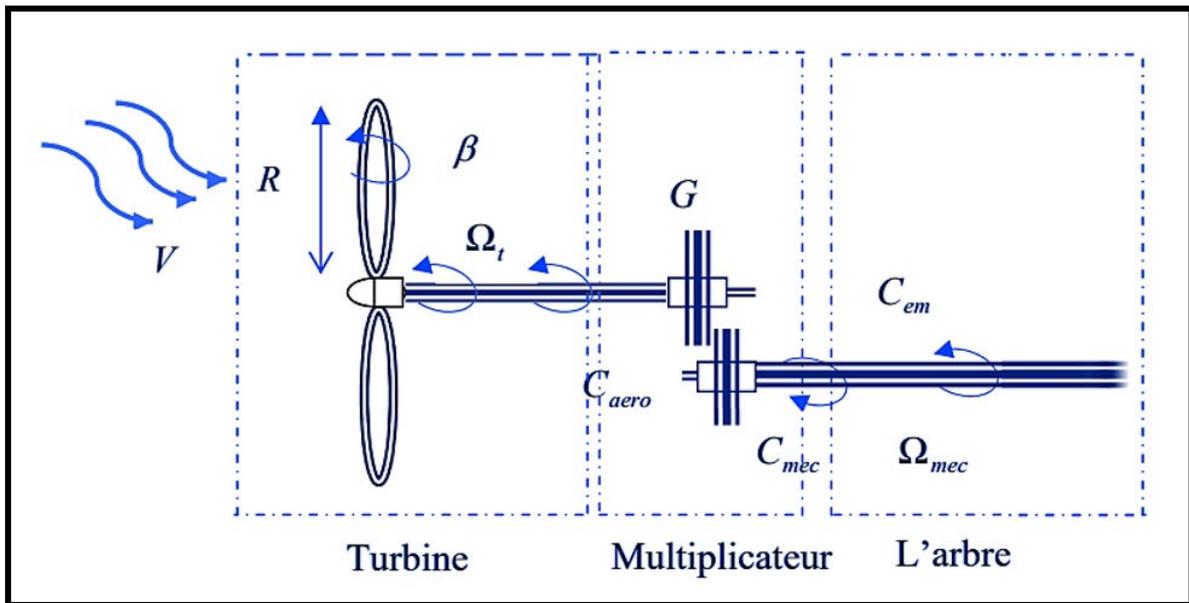


Figure 3.7 : Différentes parties mécaniques de l'éolienne.

➤ **Modélisation de la turbine :**

La turbine assure la transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales qui pivotent sur les axes selon un angle  $\beta$ . Le vent de vitesse  $V$ , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine. L'expression de la couple  $C_T$  est donnée de la manière suivante :

De l'équation (3.16) on déduit :

$$C_T = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} \quad (3.18)$$

Le coefficient de puissance  $C_P$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine.

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine sont :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.

- Les quantités spécifiques de la machine, résultant particulièrement de la géométrie du rotor et de la surface balayée par les pales de la turbine.
- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

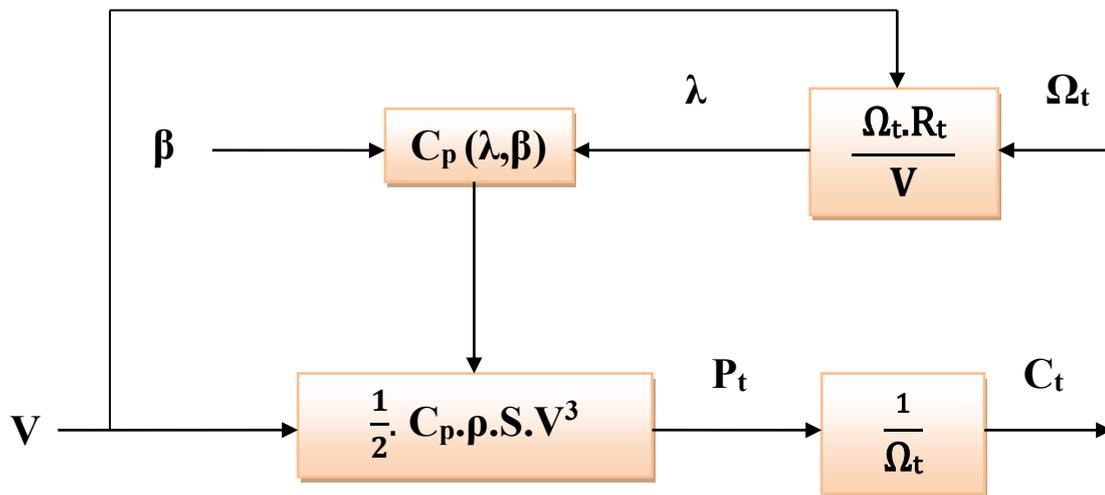


Figure 3.8 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

$V$  : La vitesse du vent (m/s).

$\beta$  : L'angle de calage ( $^{\circ}$ ).

$\lambda$  : La vitesse spécifique.

$P_t = P_{aero}$  : La puissance de la turbine (W).

➤ **Modèle de multiplicateur :**

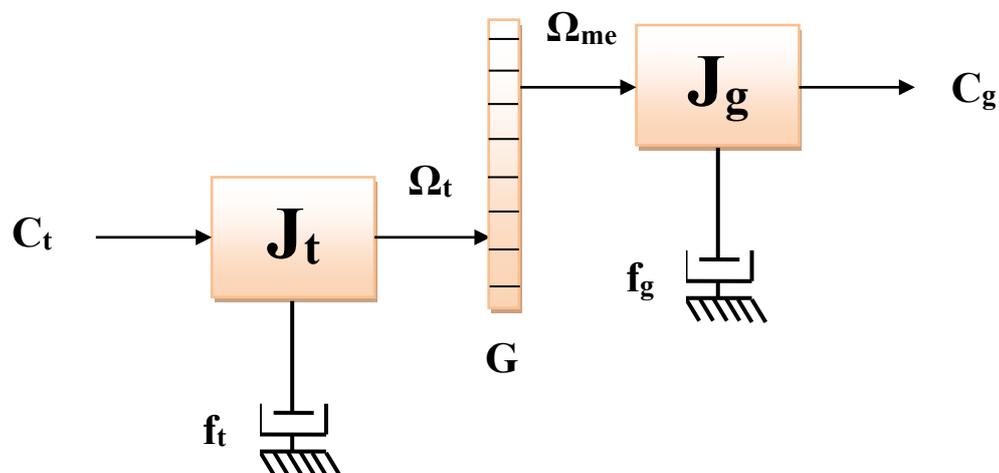


Figure 3.9 : Modèle simplifié de multiplicateur.

Le multiplicateur de vitesse transforme l'énergie aérodynamique de l'arbre mécanique de l'éolienne (vitesse lente) à l'arbre mécanique du rotor de la génératrice (vitesse rapide) avec un rapport de vitesse  $G$ . Cela se traduit mathématiquement par les équations :

L'équation du couple :

$$C_g = \frac{1}{G} \cdot C_t \quad (3.19)$$

L'équation de vitesse :

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \cdot \Omega_{mec} \quad (3.20)$$

$C_g$  : Couple de la génératrice.

$C_t$  : Couple de la turbine.

$\Omega_t$  : Vitesse de la turbine.

$\Omega_{mec}$  : La vitesse mécanique en (rad/s).

$G$  : Gain de multiplication.

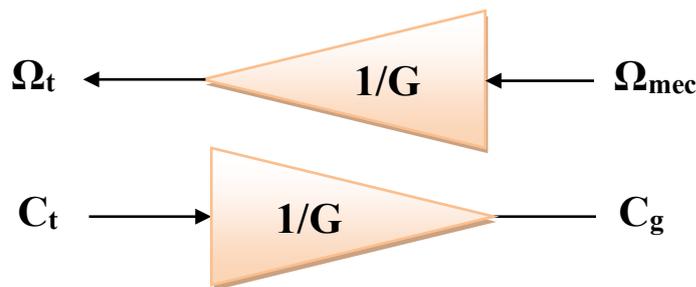


Figure 3.10 : Schéma bloc du Modèle de multiplicateur.

➤ **Modèle de l'arbre de transmission :**

De la deuxième loi de Newton :

$$\sum C = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (3.19)$$

Alors :

$$C_{\text{Total}} = J_{\text{Total}} \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} \quad (3.20)$$

Et :

$$J_{\text{total}} = J_g + G^2 \cdot J_t \quad (3.21)$$

L'expression de couple total devient la forme :

$$C_{\text{Total}} = C_g - C_{\text{em}} - C_f = J_{\text{Total}} \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} \quad (3.22)$$

$C_g$  : Couple de la turbine (N.m).

$C_{\text{em}}$  : Couple électromagnétique (N.m).

$C_f$  : Couple de frottement (N.m).

$J_{\text{Total}}$  : Moment d'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice (Kg.m<sup>2</sup>).

$$C_f = \Omega_{\text{mec}} \cdot f \quad (3.23)$$

$f$  : Coefficient de frottement.

La transformation de Laplace de  $\frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt}$  :

$$\frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = S \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (3.24)$$

En combinant les équations (3.23) et (3.24) dans l'équation (3.22) :

$$C_{\text{Total}} = C_g - C_{\text{em}} - \Omega_{\text{mec}} \cdot f = J_{\text{Total}} \cdot S \cdot \Omega_{\text{mec}} \quad (3.25)$$

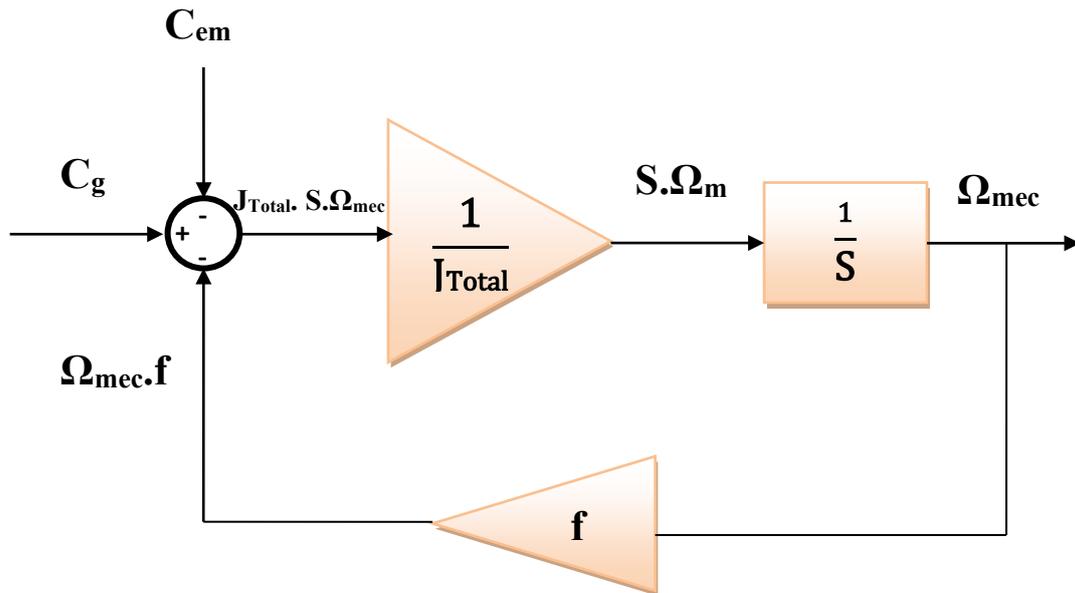


Figure 3.11 : Schéma bloc du Modèle de l'arbre de transmission.

On peut trouver l'équation de transfert à partir de l'équation (3.25) :

$$C_g - C_{em} = J_{Total} \cdot S \cdot \Omega_{mec} + \Omega_{mec} \cdot f \quad (3.26)$$

$$C_g - C_{em} = (J_{Total} \cdot S + f) \cdot \Omega_{mec} \quad (3.27)$$

$$\Omega_{mec} = (C_g - C_{em}) \cdot \frac{1}{J_{Total} \cdot S + f} \quad (3.28)$$

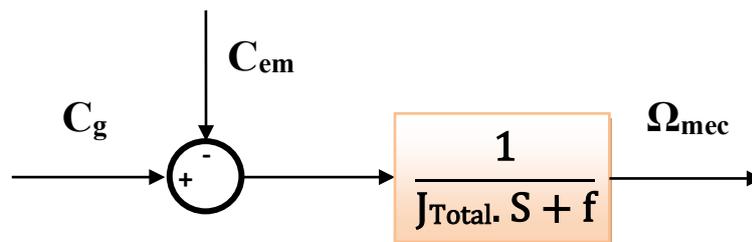


Figure 3.12 : Modèle de l'arbre de transmission sous forme d'équation de transfert.

➤ **Le schéma bloc de la turbine :**

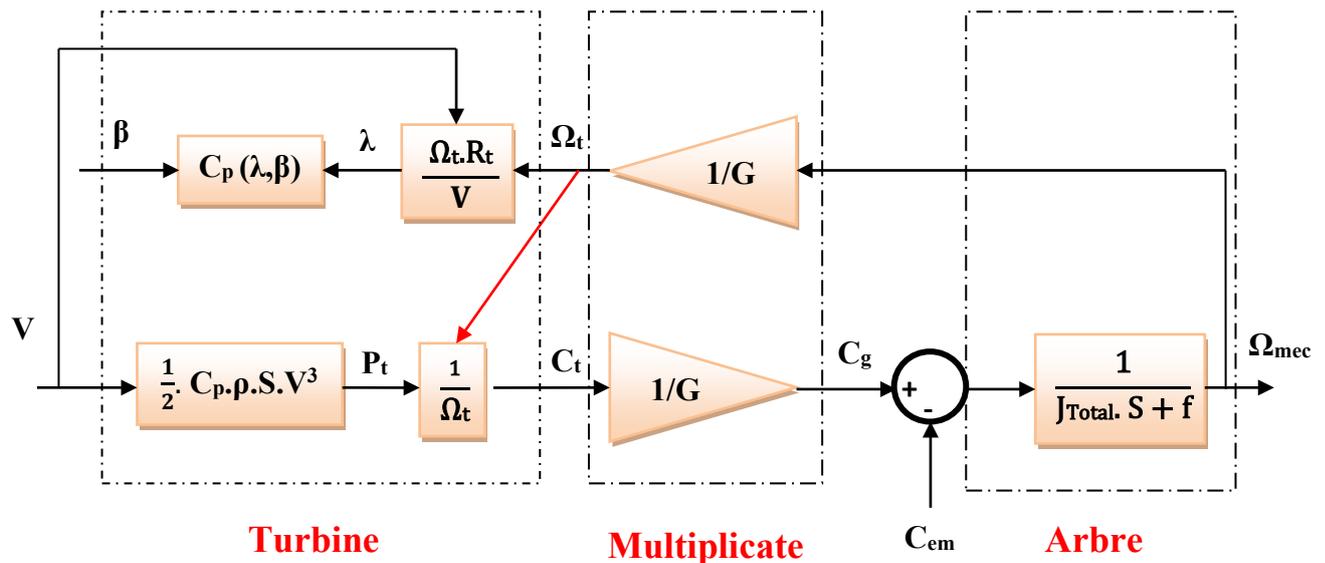


Figure 3.13 : schéma bloc de la turbine.

### 3.2.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne :

Une turbine éolienne est un dispositif qui capte une partie de l'énergie du vent et la convertit en un travail utile. En particulier, un système de conversion d'énergie éolienne relié à un réseau d'énergie électrique doit être conçu pour réduire au maximum le coût de production et d'assurer une exploitation sûre en respectant les normes de la qualité d'énergie. [1]

#### 3.2.3.1 Objectifs de la commande :

La minimisation du coût d'énergie implique une série d'objectifs étroitement liés et parfois en conflit. Par conséquent, ils ne devraient pas être poursuivis séparément. La question est de trouver un compromis bien équilibré entre eux. Ces objectifs peuvent être arrangés de la manière suivante : [12]

- Capture de l'énergie : maximisation de la capture d'énergie en tenant compte des restrictions d'exploitation sûre telles que la puissance nominale et la vitesse nominale.

- Charges mécaniques : protection du système éolien des charges mécanique excessives.
- Qualité de l'énergie : production de l'énergie conformément aux normes d'interconnexion (même tension, même fréquence, et même puissance).

### 3.2.3.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) : [5]

Est le point pour lequel on obtiendra la puissance maximale de la turbine.

Afin de pouvoir obtenir ce point, Nous devons modifier certaines des données de cette turbine, en modifiant ces données selon les techniques de maximisation de puissance.

Il y a deux techniques de maximisation de puissance sont :

- MPPT sans asservissement de vitesse.
- MPPT avec asservissement de vitesse.
- MPPT sans asservissement de vitesse :

Parmi ces variables qui influencent la maximisation de puissance dans cette technique sont :

- $\lambda_{opt}$  : Lambda optimal : est la vitesse spécifique à laquelle nous obtenons  $C_{p_{max}}$

Si nous obtenons  $\lambda_{opt}$ , nous pouvons obtenir  $C_{p_{max}}$ .

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est le couple  $C_{em}$  appliqué à cette turbine qui affecte ce modèle, que ce soit mathématiquement ou physiquement.

Lorsque nous appliquons ce couple  $C_{em\_opt}$  à cette turbine, la vitesse résultante de la turbine  $\Omega_{mec}$  sera effectuée, et si la vitesse  $\Omega_{mec}$  est effectuée, la valeur de  $\lambda$  aussi effectuée.

Si le couple appliqué à cette turbine affecte la valeur de  $\lambda$  et  $C_p$  en plus de  $P_t$  jusqu'à la vitesse  $\Omega_{mec}$  autre fois, nous devons changer toutes les équations pour obtenir  $C_{em\_opt}$ , et pour pouvoir obtenir la Maximisation de la puissance, il faut chercher le couple  $C_{em\_opt}$  en fonction de  $\lambda_{opt}$  et  $C_{p\_max}$  à travers les équations suivantes :

De l'équation précédente (3.20) on déduit la valeur du vent estimée :

$$V_{est} = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{\lambda_{opt}} \quad (3.29)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{est}$  dans l'équation (3.16), on trouve :

$$P_{t\_max} = \frac{1}{2} \cdot C_{p\_max} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{est}^3 \quad (3.30)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda$  sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p\_max}$ .

Il s'appelait  $P_{t\_max}$  parce que nous utilisons  $C_{p\_max}$  et  $\lambda_{opt}$

Et :

$$C_t = \frac{P_{t\_max}}{\Omega_t} \quad (3.31)$$

Le couple de la turbine est décrit donc par l'équation :

$$C_{g\_ref} = \frac{1}{G} \cdot C_t \quad (3.32)$$

Dans ce cas, il n'y a pas de différence entre  $C_{em}$  et  $C_g$ , car le lien entre eux est l'équation mécanique (3.28) et On considère que le coefficient de frottement est nul on trouve :

$$f \approx 0 \tag{3.33}$$

$$\Omega_{mec} = (C_g - C_{em}) \cdot \frac{1}{J_{Total} \cdot S} \tag{3.34}$$

$$(C_g - C_{em}) = J_{Total} \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} \tag{3.35}$$

Ceci, nous conduit à déduire à partir de l'équation (3.35) que la dérivée de  $\Omega_{mec}$  égale à 0 en régime permanent :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = 0 \tag{3.36}$$

Et on déduit :

$$C_{g\_ref} = C_{em\_opt} \tag{3.37}$$

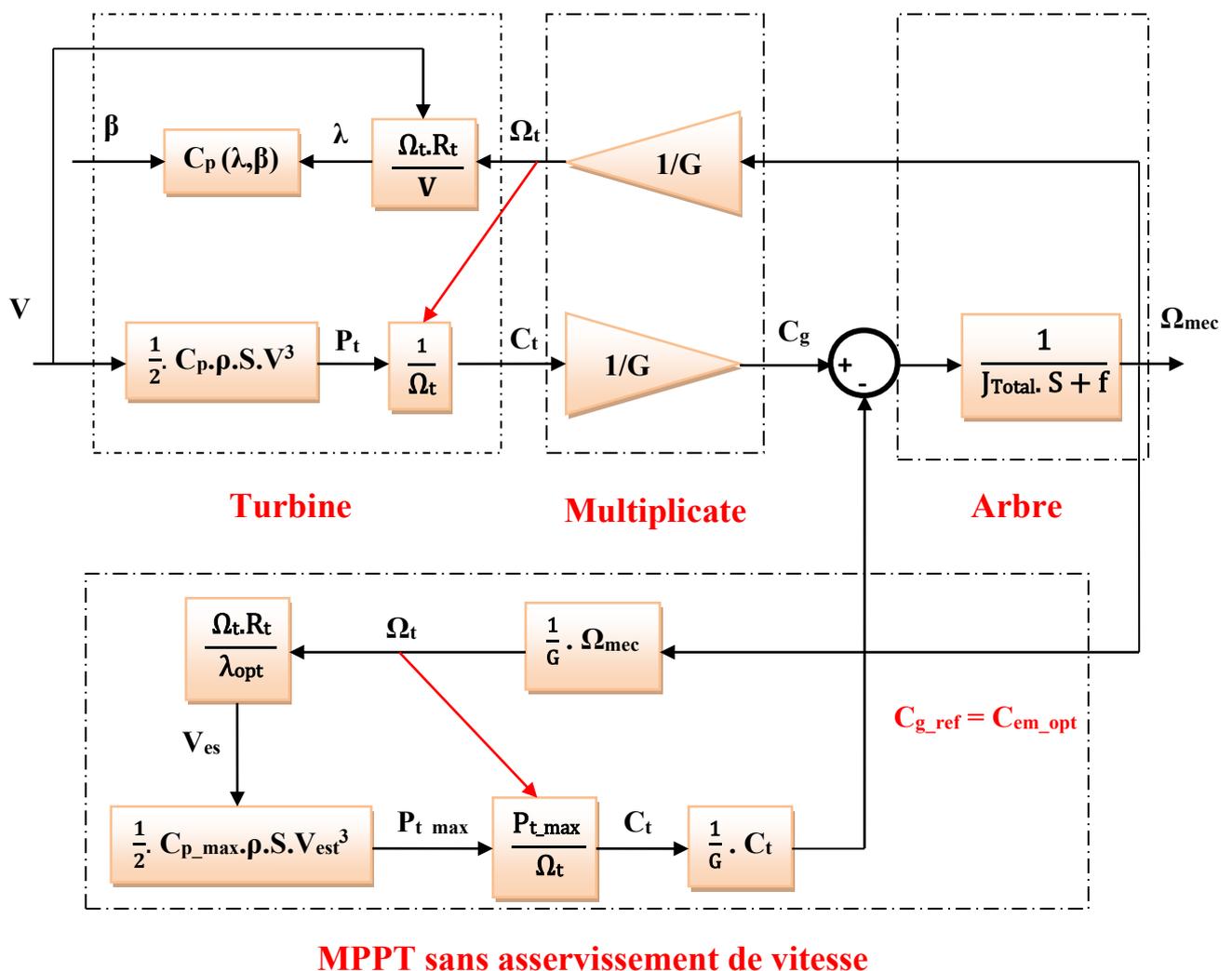


Figure 3.14 : schéma bloc de MPPT sans asservissement de vitesse.

Cette technique est une commande en boucle ouverte, afin d'améliorer la dynamique de la réponse, on fait recours à la commande MPPT avec asservissement de vitesse (en boucle fermée).

➤ MPPT avec asservissement de vitesse :

Dans cette technique, on suppose que le couple électromagnétique produit par la machine est égal à sa valeur de référence, quelle que soit la puissance générée, et malgré les perturbations causées par le caractère fluctuant du vent. [7]

$$C_{em} = C_{em\_ref} \quad (3.38)$$

La vitesse est affectée par trois couples : le couple de vent, le couple électromagnétique et le couple de résistance de frottement (en supposant zéro). En regroupant les actions de ces trois couples, la vitesse mécanique est contrôlée par les actions de seulement deux couples,  $C_g$  et  $C_{em}$ , et l'évolution de la vitesse peut être déterminée à partir des équations fondamentales de la dynamique : [5]

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = (C_g - C_{em}) \cdot \frac{1}{J_{Total}} \quad (3.39)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir de couple totale appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence. [7]

$$C_{em\_ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{mec\_ref} - \Omega_{mec}) \quad (3.40)$$

$C_{ass}$  : régulateur de vitesse.

$\Omega_{mec\_ref}$  : vitesse mécanique de référence (rad/s).

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ( $\Omega_{t\_ref}$ ) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc : [5]

$$\Omega_{mec\_ref} = G \cdot \Omega_{t\_ref} \tag{3.41}$$

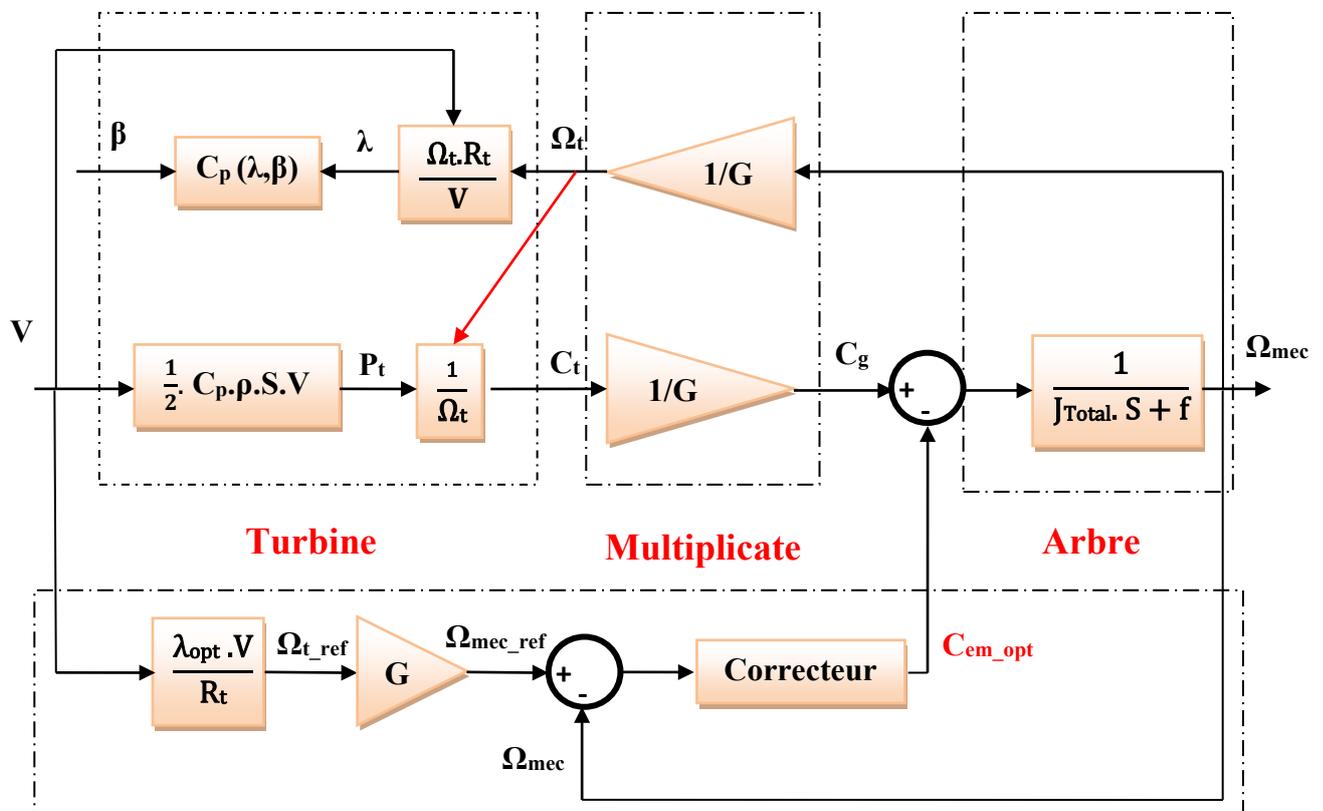
D'après l'équation (3.12), la vitesse de la turbine est égale à :

$$\Omega_t = \frac{\lambda \cdot V}{R_t} \tag{3.42}$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$ , le coefficient de puissance maximum  $C_p \max$  (lorsque l'angle de calage  $\beta$  est égale à  $2^\circ$ ) peut être déduit de l'équation (3.42) : [5]

$$\Omega_{t\_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R_t} \tag{3.43}$$

L'efficacité de cette commande est assurée par le régulateur de vitesse qui doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence. [7]



**MPPT avec asservissement de vitesse**

Figure 3.15 : schéma bloc de MPPT avec asservissement de vitesse.

Dans notre cas, le correcteur utilisé est le réseau de neurones, plus détails dans le 4ème chapitre.

### **3.3 Modélisation de la partie électrique du système éolienne :**

Grâce aux nombreux avantages qu'elle présente comparativement aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante en ce qui concerne son utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Les machines à courant alternatif sont en général modélisées par des équations différentielles non-linéaires. Cette non-linéarité est due aux inductances et aux coefficients des équations dynamiques qui dépendent du temps et de la position rotorique. Une transformation triphasée-biphasée est nécessaire pour simplifier le modèle. Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine l'établissement de son modèle mathématique sera développer sur la base des hypothèses simplificatrices. [5]

#### **3.3.1 Hypothèses simplificatrices :**

Certaines hypothèses classiques sont admises pour la modélisation des machines électriques. Elles permettent d'avoir un modèle simplifié en vue de leurs commandes : [11]

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme.
- Les aimants permanents sont rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.
- Les résistances des enroulements ne varient pas en fonction de la température.
- La F.M.M créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

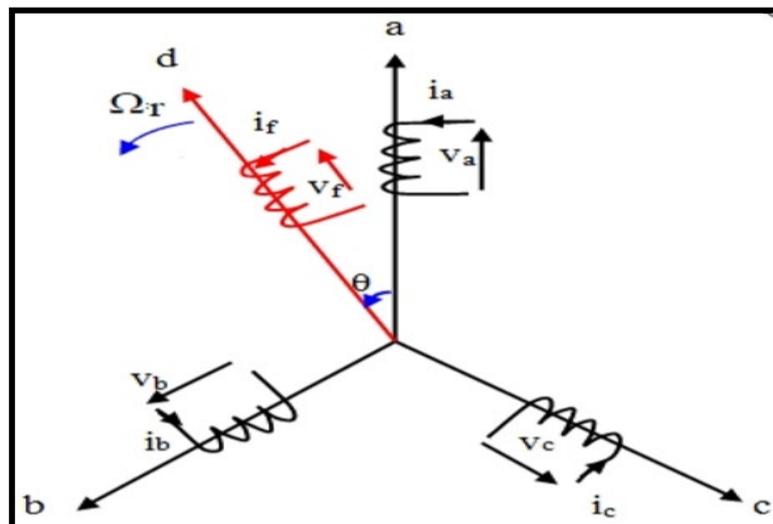
On néglige :

- La saturation du circuit magnétique.
- Le courant de Foucault.
- L'effet de peau.
- L'hystérésis.

### 3.3.2 Description :

Dans la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), l'inducteur est remplacé par des aimants permanents. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. [10]

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte trois enroulements statoriques triphasés (a, b, c) décalés entre eux par un angle de  $(2\pi/3)$ . L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ils sont modélisés par un enroulement alimenté par une source du courant continu ' $i_f$ ' qui produit un champ magnétique constant.



**Figure 3.16 : Représentation de la machine synchrone à aimants permanents.**

La position du rotor est repérée par l'angle électrique :

$$\theta = \theta_0 + \omega t \quad (3.44)$$

$$\omega = p \cdot \Omega_r \quad (3.45)$$

Où :

$\theta_0$  : Angle électrique initial.

$\omega$  : Pulsation des grandeurs électriques.

$P$  : Nombre de paires de pôles. [5]

### 3.3.3 Mise en équation de la machine synchrone à aimants permanents :

#### 3.3.3.1 Les équations dans le système triphasé (a, b, c) :

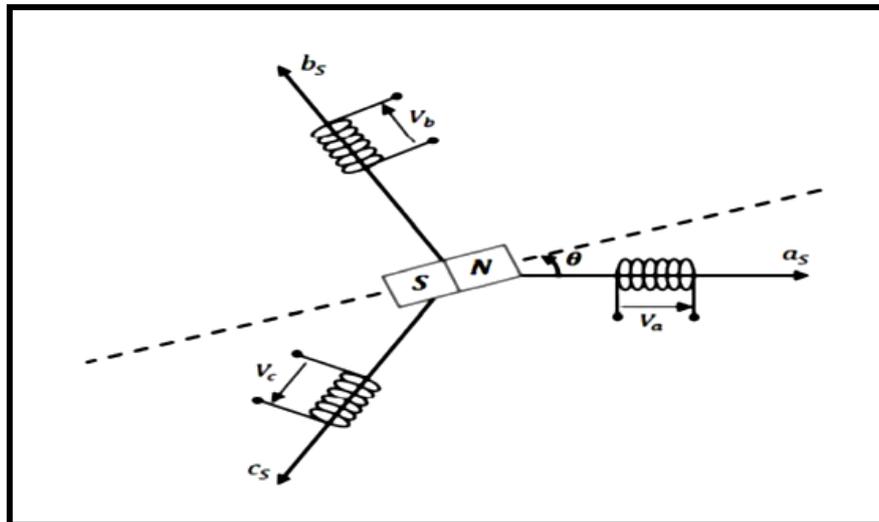


Figure 3.17 : Représentation d'une MSAP dans le repère (abc).

#### ➤ Equations électriques :

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{aligned}
 V_{as} &= R_s i_{as} + \frac{d\varphi_{as}}{dt} \\
 V_{bs} &= R_s i_{bs} + \frac{d\varphi_{bs}}{dt} \\
 V_{cs} &= R_s i_{cs} + \frac{d\varphi_{cs}}{dt}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

En écrivant (3.46) sous forme matricielle, on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \tag{3.47}$$

On note :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}$$

En modèle matriciel réduit, on obtient :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \tag{3.48}$$

Avec :

$[V_s]$  : Vecteur tension des phases statoriques.

$[i_s]$  : Vecteur courant des phases statoriques.

$[R_s]$  : Résistances des enroulements statoriques.

$[\varphi_s]$  : Vecteur des flux traversant les enroulements statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où une somme instantanée des courants statoriques nulle. [5]

### ➤ Equations des flux (magnétique) :

Les flux induits par les aimants permanents dans les trois phases statoriques 'a, b, c' sont respectivement donnés par : [5]

$$\begin{aligned}
\varphi_{af} &= \mathbf{M}_{af} \mathbf{i}_f = \varphi_{\max} \cos(\theta) \\
\varphi_{bf} &= \mathbf{M}_{bf} \mathbf{i}_f = \varphi_{\max} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\
\varphi_{cf} &= \mathbf{M}_{cf} \mathbf{i}_f = \varphi_{\max} \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)
\end{aligned} \tag{3.49}$$

Le flux produit de chaque enroulement statorique est la somme de quatre termes. Par exemple, pour la phase 'a', le flux ' $\varphi_a$ ' est la somme des quatre termes suivants :

$$\varphi_a = \varphi_{aa} + \varphi_{ab} + \varphi_{ac} + \varphi_{af} \tag{3.50}$$

Où :

$\varphi_{aa} : \mathbf{L}_a \mathbf{i}_a$  : Flux propre de la phase 'a'.

$\varphi_{ab} : \mathbf{M}_{ab} \mathbf{i}_b$  : Flux mutuel de la phase 'b' sur 'a', ( $\mathbf{M}_{ab}$  : inductance mutuelle entre les phases 'a' et 'b').

$\varphi_{ac} : \mathbf{M}_{ac} \mathbf{i}_c$  : Flux mutuel de la phase 'c' sur 'a', ( $\mathbf{M}_{ac}$  : inductance mutuelle entre les phases 'a' et 'c').

$\varphi_{af} : \mathbf{M}_{af} \mathbf{i}_f$  : Flux mutuel de l'aimant sur la phase 'a'.

$\mathbf{M}_{af}$  : inductance mutuelle entre la phase 'a' et l'enroulement d'inducteur.

L'expression du flux dans les phases 'a, b, c' est donnée par :

$$\begin{aligned}
\varphi_a &= \mathbf{L}_a \mathbf{i}_a + \mathbf{M}_{ab} \mathbf{i}_b + \mathbf{M}_{ac} \mathbf{i}_c + \mathbf{M}_{af} \mathbf{i}_f \\
\varphi_b &= \mathbf{L}_b \mathbf{i}_b + \mathbf{M}_{ba} \mathbf{i}_a + \mathbf{M}_{bc} \mathbf{i}_c + \mathbf{M}_{bf} \mathbf{i}_f \\
\varphi_c &= \mathbf{L}_c \mathbf{i}_c + \mathbf{M}_{ca} \mathbf{i}_a + \mathbf{M}_{cb} \mathbf{i}_b + \mathbf{M}_{cf} \mathbf{i}_f
\end{aligned} \tag{3.51}$$

Pour un réseau symétrique on a :  $\mathbf{L}_a = \mathbf{L}_b = \mathbf{L}_c = \mathbf{L}$  donc On écrit la formule des flux totalisés des phases statoriques comme suit :

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \varphi_{\max} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

Sous forme :

$$[\varphi_s] = [L_{ss}] [i_s] + [\varphi_f] \quad (3.53)$$

$M$  : Mutuelle inductance entre phases du stator.

$\varphi_{\max}$  : Flux constant dû aux aimants permanents.

$L$  : Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_{ss}]$  : Est constante dans la MSAP à pôles lisses (ne dépend pas de  $\theta$ ).

En remplaçant (3.53) dans (3.48), on obtient finalement :

$$[V_s] = [R_s][i_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [i_s] + [\varphi_f] \quad (3.54)$$

### 3.3.3.2 Les équations dans le système biphasé (d, q) :

Est Passage du repère triphasé (a, b, c) au repère biphasé (d, q).

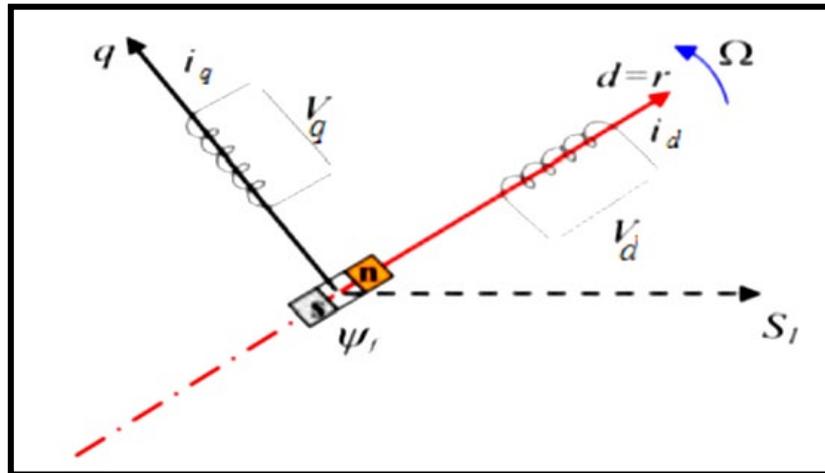
#### ➤ Transformation de Park : [5]

Les modèles des machines électriques sont basés sur une théorie unifiée ; cette théorie est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations d'un système triphasé (a, b, c) au système biphasé (d, q).

Dans le repère classique, il y a trois axes ( $a_s, b_s, c_s$ ) orientés suivant trois enroulements statoriques de la machine ; l'axe «  $a_s$  » est considéré comme l'origine. En ce qui concerne le rotor, on aura un seul axe (f correspondant à la direction de l'aimantation pour la MSAP).

On applique la transformation de Park pour simplifier les équations et pour réduire la complexité du système, par conséquent le modèle et les

repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et ceux des grandeurs rotoriques doivent coïncider. [12]



**Figure 3.18 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.**

Pour passer du système triphasé au système biphasé, il faut utiliser les transformations suivantes :

$$[V_{abc}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{dq}] \quad (3.55)$$

$$[V_{dq}] = [P(\theta)][V_{abc}] \quad (3.56)$$

Tel que :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

L'équation qui traduit ce passage est donnée par :

$$[\mathbf{X}_{dq}] = [\mathbf{P}(\theta)][\mathbf{X}_{abc}] \quad (3.59)$$

Où X représente le courant, la tension ou le flux.

La matrice de Park modifiée repose sur l'invariance de la puissance instantanée dans les deux systèmes de représentation triphasée et biphasée, ce qui conduit à leur équivalence physique.

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{V}_a \mathbf{i}_a + \mathbf{V}_b \mathbf{i}_b + \mathbf{V}_c \mathbf{i}_c = \mathbf{V}_{ds} \mathbf{i}_{ds} + \mathbf{V}_{qs} \mathbf{i}_{qs} + \mathbf{V}_0 \mathbf{i}_0 \quad (3.60)$$

➤ **Equation des flux au système biphasé (d, q) :** [5]

À partir des expressions des flux ( $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ ,  $\varphi_c$ ) citées précédemment (3.52), on obtient :

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L} & \mathbf{M} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{L} & \mathbf{M} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & \mathbf{L} \end{bmatrix} [\mathbf{P}(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_d \\ \mathbf{i}_q \\ \mathbf{i}_0 \end{bmatrix} + \varphi_f \quad (3.61)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix}$$

En multipliant (3.61) par  $[\mathbf{P}(\theta)]$  et après développement, on aura :

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_d & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{L}_q & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{L}_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_d \\ \mathbf{i}_q \\ \mathbf{i}_0 \end{bmatrix} + \varphi_f \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Où :  $\mathbf{L}_d = \mathbf{L}_q = \mathbf{L} - \mathbf{M}$  ;  $\mathbf{L}_0 = \mathbf{L} + 2\mathbf{M}$  et  $\varphi_0, \mathbf{i}_0 = 0$

Avec :  $\mathbf{L}_d$  et  $\mathbf{L}_q$   $\mathbf{q}$  : sont les inductances propres des axes d et q respectivement.

Les équations du flux d'axe directe (d) et en quadratique (q) s'écrivent :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d * i_{ds} + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q * i_{qs} \end{cases} \quad (3.63)$$

Le flux  $\varphi_d$  et  $\varphi_q$  respectivement sont fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$  :

➤ **Équation des tensions dans le système biphasé (d, q) :** [5]

Le système (3.46) dans le système (d, q), s'écrit :

$$[P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (3.64)$$

Après développement mathématique, on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_0 \end{bmatrix} + \frac{d\theta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \\ \varphi_0 \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * i_{ds} + \frac{d\varphi_d}{dt} - \frac{d\theta}{dt} * \varphi_q \\ V_{qs} = R_s * i_{qs} + \frac{d\varphi_q}{dt} - \frac{d\theta}{dt} * \varphi_d \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s * i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega * L_q i_{qs} \\ V_{qs} = R_s * i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega (L_d i_{ds} + \varphi_f) \end{cases} \quad (3.67)$$

Avec :

$\varphi_f$  : Flux dû aux aimants.

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$L_d$  : Inductance suivant l'axe d.

$L_q$  : Inductance suivant l'axe q.

Pour retrouver le théorème généralisé de la convention génératrice (GSAP), il suffit d'inverser le sens des courants ; les équations de la GSAP s'écrivent donc comme suit : [12]

Pour le flux :

$$\begin{cases} \varphi_d = -L_d * i_{ds} + \varphi_f \\ \varphi_q = -L_q * i_{qs} \end{cases} \quad (3.68)$$

Pour la tension

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s * i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega * L_q i_{qs} \\ V_{qs} = -R_s * i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega(L_d i_{ds} + \varphi_f) \end{cases} \quad (3.69)$$

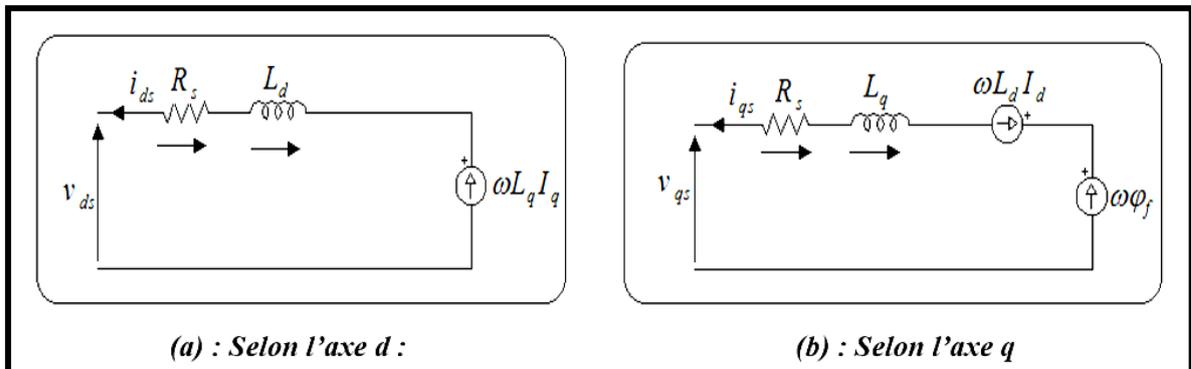


Figure 3.19 : Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q.

➤ Expression de la puissance :

La puissance électrique de la machine dans le repère (abc) est exprimée par :

$$P(t) = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (3.70)$$

En remplaçant les courants et les tensions dans cette expression par leurs similaires dans le système (d, q) sachant que :

$$[\mathbf{i}_{abc}] = [\mathbf{P}(\theta)]^{-1}[\mathbf{i}_{dq0}] \quad (3.71)$$

Après simplification on obtient l'expression de la puissance suivante :

$$\mathbf{P}(t) = \frac{3}{2} (\mathbf{V}_{ds} \mathbf{i}_{ds} + \mathbf{V}_{qs} \mathbf{i}_{qs} + 2\mathbf{V}_0 \mathbf{i}_0) \quad (3.72)$$

Pour un système équilibré on a :  $\mathbf{i}_0 = \mathbf{0}$  ;  $\mathbf{V}_0 = \mathbf{0}$

Alors l'expression de la puissance dans le repère de Park est :

$$\mathbf{P}(t) = \frac{3}{2} (\mathbf{V}_{ds} \mathbf{i}_{ds} + \mathbf{V}_{qs} \mathbf{i}_{qs}) \quad (3.73)$$

En remplaçant  $\mathbf{V}_d$ ,  $\mathbf{V}_q$  par leurs expressions, on aura :

$$\mathbf{P}(t) = \frac{3}{2} \left[ \omega (\varphi_d \mathbf{i}_{qs} - \varphi_q \mathbf{i}_{ds}) - \mathbf{R}_s (\mathbf{i}_{ds}^2 + \mathbf{i}_{qs}^2) - \left( \mathbf{i}_{ds} \frac{d\varphi_d}{dt} + \mathbf{i}_{qs} \frac{d\varphi_q}{dt} \right) \right] \quad (3.74)$$

Telle que :

$$\mathbf{P}_{em} = \frac{3}{2} [\omega (\varphi_d \mathbf{i}_{qs} - \varphi_q \mathbf{i}_{ds})] : \text{Représente la puissance électromagnétique.}$$

$$\mathbf{P}_j = \frac{3}{2} \mathbf{R}_s (\mathbf{i}_{ds}^2 + \mathbf{i}_{qs}^2) : \text{Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.}$$

$$\mathbf{P}_v = \frac{3}{2} \left( \mathbf{i}_{ds} \frac{d\varphi_d}{dt} + \mathbf{i}_{qs} \frac{d\varphi_q}{dt} \right) : \text{Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.}$$

### ➤ Couple électromagnétique :

La connaissance du couple électromagnétique  $C_{em}$  est essentielle pour l'étude et la commande. Il est exprimé par la dérivée partielle du stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor. [5]

$$C_{em} = \frac{\partial W_e}{\partial \theta_{geo}} = P \frac{\partial W_e}{\partial \theta_e} \quad (3.75)$$

Où :

$W_e$  : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$  : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

$\theta_e$  : Angle électrique.

$P$  : Nombre de paires de pôles.

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

Sachant que :

$$P_{em} = C_{em} \Omega \quad (3.76)$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} [\omega (\varphi_{d1qs} - \varphi_{q1ds})] \quad (3.77)$$

Donc :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(\varphi_{d1qs} - \varphi_{q1ds})] \quad (3.78)$$

À partir de l'équation (3.68) et après l'affectation des opérations nécessaires, on peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_{q1qs} i_{ds} - L_{d1qs} i_{ds} + \varphi_{f1qs})] \quad (3.79)$$

### ➤ Equations mécaniques :

La dynamique est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mot} - C_{em} - C_f \quad (3.80)$$

Où :

$$\mathbf{C}_f = \mathbf{f}_c \boldsymbol{\Omega} \quad (3.81)$$

$\mathbf{C}_{\text{mot}}$  : Couple moteur appliqué sur le générateur.

$\mathbf{C}_f$  : Couple de frottement.

$\mathbf{J}$  : Moment d'inertie total de la machine.

$\mathbf{f}_c$  : Coefficient de frottement visqueux.

### 3.4 La commande vectorielle :

Le principe de base de la commande vectorielle a été proposé par BALSCHKE et HASSE dans les années 70. Cette commande consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le but de la commande vectorielle appliquée à la MSAP est d'éliminer le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur. [12]

#### 3.4.1 Principe et structure de la commande vectorielle de la génératrice :

Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il est nécessaire de maintenir le courant  $I_d$  nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant  $i_q$  via la tension  $V_q$ .

Physiquement, cette stratégie revient à maintenir le flux de réaction d'induit en quadrature avec le flux rotorique produit par le système d'excitation.

Dans ce cas le courant  $i_d$  doit être nul, lorsque le système travaille à couple constant. [17]

$$I_d = 0 \quad (3.82)$$

De l'équation (3.79), on obtient :

$$C_{em\_ref} = \frac{3}{2} P (\varphi_f \cdot i_{q\_ref}) \quad (3.83)$$

Nous trouvons :

$$i_{q\_ref} = \frac{3C_{em\_ref}}{2P\varphi_f} \quad (3.84)$$

### 3.4.2 Décomposition des tensions :

Nous allons chercher les valeurs de  $V_d$  et  $V_q$  réelle, à partir de l'équation (3.84) : [5]

$$V_{d\_ref} = (-L_q i_{q\_ref}) \Omega \quad (3.85)$$

$$V_{q\_ref} = (R_s i_{q\_ref}) + \varphi_f \Omega \quad (3.86)$$

$\Omega$  : la vitesse électrique (rad/s)

Nous utilisons la transformation de Park pour obtenir les valeurs de  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  de référence

$$[V_{abc\_ref}] = [P(\theta)]^{-1} [V_{dq\_ref}] \quad (3.87)$$

Puis nous utilisons un onduleur de tension pour changer ces valeurs en des valeurs réelles.

$$[V_{dq\_réelle}] = [P(\theta)] [V_{abc\_réelle}] \quad (3.88)$$

Et enfin, Après avoir obtenu les valeurs réelles de  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ , on a utilisé la transformation de Park autre fois pour obtenir les valeurs réelles de  $V_d$ ,  $V_q$ .

### 3.4.3 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle :

#### ➤ Avantages de la commande vectorielle :

- Elle est basée sur le modèle transitoire (traiter les régimes transitoires ce que ne permettait pas de faire le variateur classique).
- Elle est précise et rapide.

- Il y a un couple de contrôle à l'arrêt.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

➤ **Inconvénients de la commande vectorielle :**

Le contrôle vectoriel par orientation de flux rotorique présente un certain nombre d'inconvénient :

- Très chère (encodeur incrémental ou estimateur de vitesse).
- Présence de transformations de coordonnées dépendant des valeurs estimées. [12]

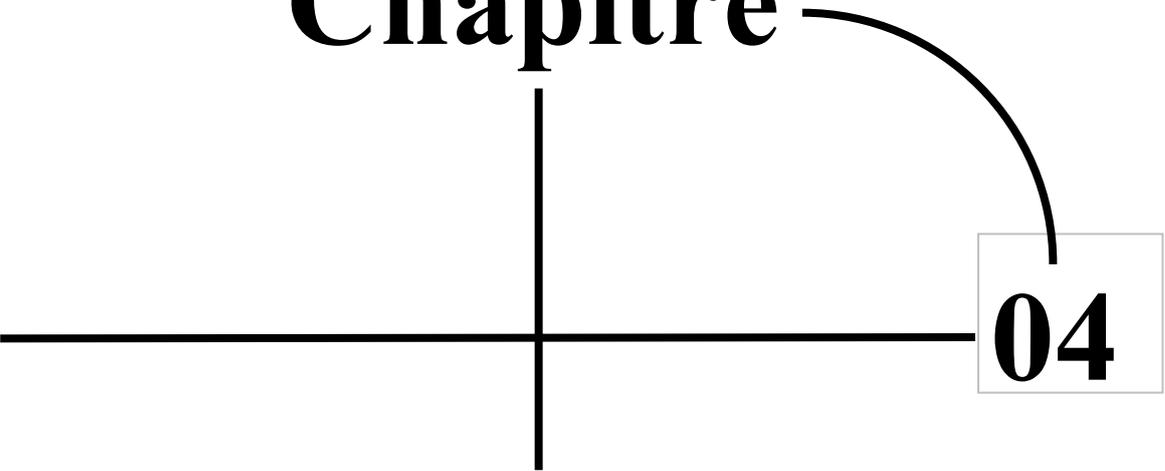
### **3.5 Conclusion :**

Dans ce chapitre, deux modèles principaux ont été créés pour la conversion de l'énergie éolienne, la première partie représente la modélisation de système éolienne qui contient la modélisation du vent, pales, turbine, multiplicateur, et l'arbre de transmission, mais la deuxième partie de système représente la modélisation électrique du système éolienne qui contient la modélisation de GSAP (génératrice synchrone à aimants permanents).

Afin d'améliorer la qualité du système, on a utilisé deux types de commande le premier est commande basée sur réseau de neurones pour la maximisation de la puissance (MPPT avec asservissement de vitesse) et la deuxième est la commande vectorielle, cette commande utiliser pour d'éliminer le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur.

Après avoir obtenu les modèles mathématiques utilisant les lois de la physique, nous allons simuler ce système dans le quatrième chapitre

**Chapitre**



**04**

*Simulation et  
résultats*

## 4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, la simulation des différents composants du système de conversion de l'énergie éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents (PMSM) sera détaillée. Ce système contient de deux parties principales (la partie mécanique et électrique) et de deux commandes (la commande d'un réseau de neurones pour maximiser la puissance et la commande vectorielle qui utilise pour éliminer le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur).

L'environnement MATLAB/Simulink a retenu notre intérêt de part, la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants.

## 4.2 L'outil Matlab :

Diminutif de Matrix Laboratory, Matlab est un environnement de programmation orienté calcul numérique. Articulé autour du langage de script du même nom, il est doté d'un éditeur permettant d'exécuter des séquences de commandes encapsulées dans des fonctions.

Matlab est conçu pour l'analyse de données, la visualisation de graphiques, la génération de matrices, le développement d'algorithmes ou le développement d'applications. Interopérables avec Python, C/C++, Java et Fortran, il est optimisé pour le calcul en parallèle. Ses principaux domaines d'application sont les sciences, l'ingénierie et l'économie. [5]

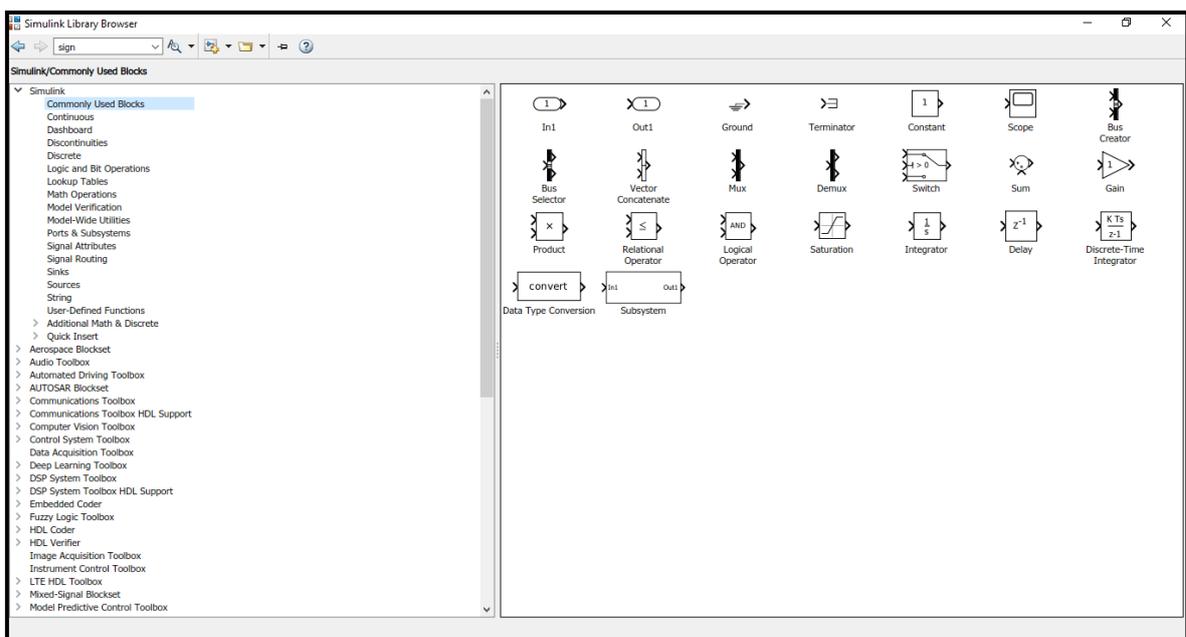
### 4.2.1 Le rôle de Matlab :

Les cas d'usage de Matlab sont nombreux. Le langage de programmation est notamment utilisé dans :

- Les systèmes de contrôle,
- La machine et le deep learning,
- La maintenance prédictive,
- Le traitement du signal et les séries temporelles,
- L'automatisation des tests,
- Les systèmes de télécommunication,
- La robotique. [5]

#### 4.2.2 Simulink :

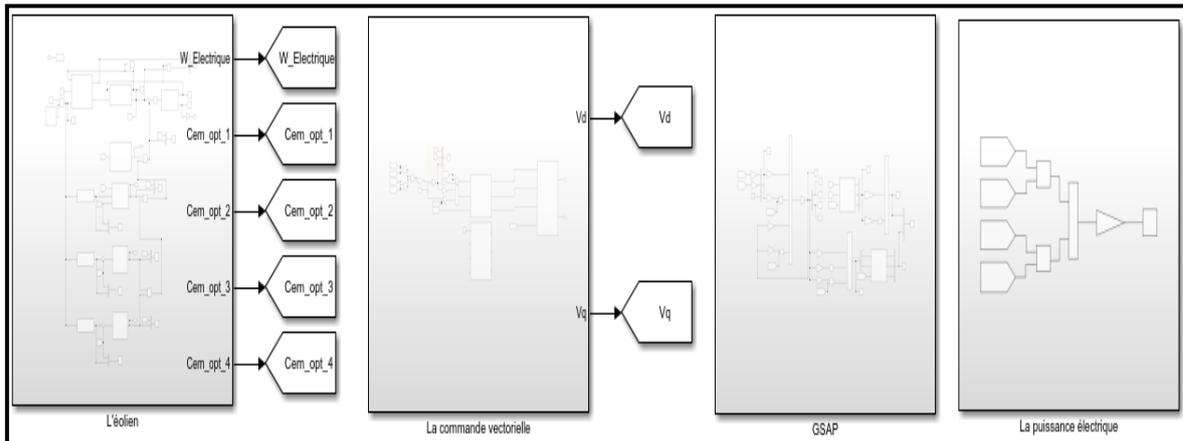
Également développé par Matlab, Simulink est un logiciel dédié à la modélisation, la simulation d'un système dynamique. À partir d'un ensemble de bibliothèques, il permet de réaliser des environnements graphiques, d'intégrer des systèmes de communication ou encore de traiter un signal. Simulink est associé à Matlab, notamment pour utiliser les fonctions de visualisation de données et le développement d'algorithmes. [5]



**Figure 4.1 : Bibliothèque Simulink.**

### 4.3 La simulation :

Le système éolien que nous allons simuler se compose de quatre parties de base (l'éolienne, la commande vectorielle, GSAP et la puissance électrique) comme le montre dans la (Figure 4.2).



**Figure 4.2 : les quatre parties de base de système éolienne.**

Ces parties sont regroupées en deux parties principales (mécaniques et électriques), où est l'éolienne est dans la partie mécanique et les trois autres sont dans la partie électrique, et sur cette base nous allons simuler ce système.

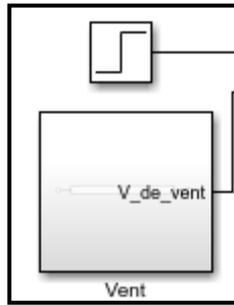
#### 4.3.1 Simulation de la partie mécanique de système éolienne :

Dans cette partie nous allons simuler le modèle du vent, la turbine, le multiplicateur et l'arbre de transmission et la commande de la turbine éolienne (MPPT avec asservissement de vitesse).

##### 4.3.1.1 Le profil du vent :

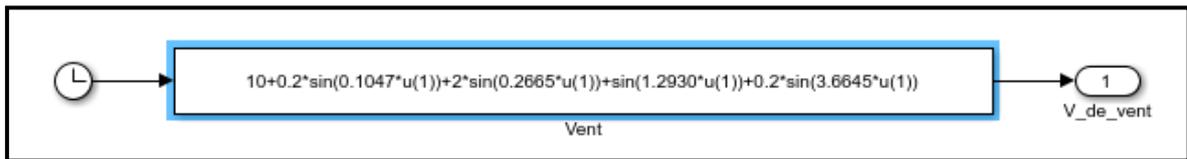
Dans notre système nous allons utilisée deux types de vitesse :

- Le profil du vent à vitesse fixe (**12 m/s**).
- Le profil du vent à vitesse variable.



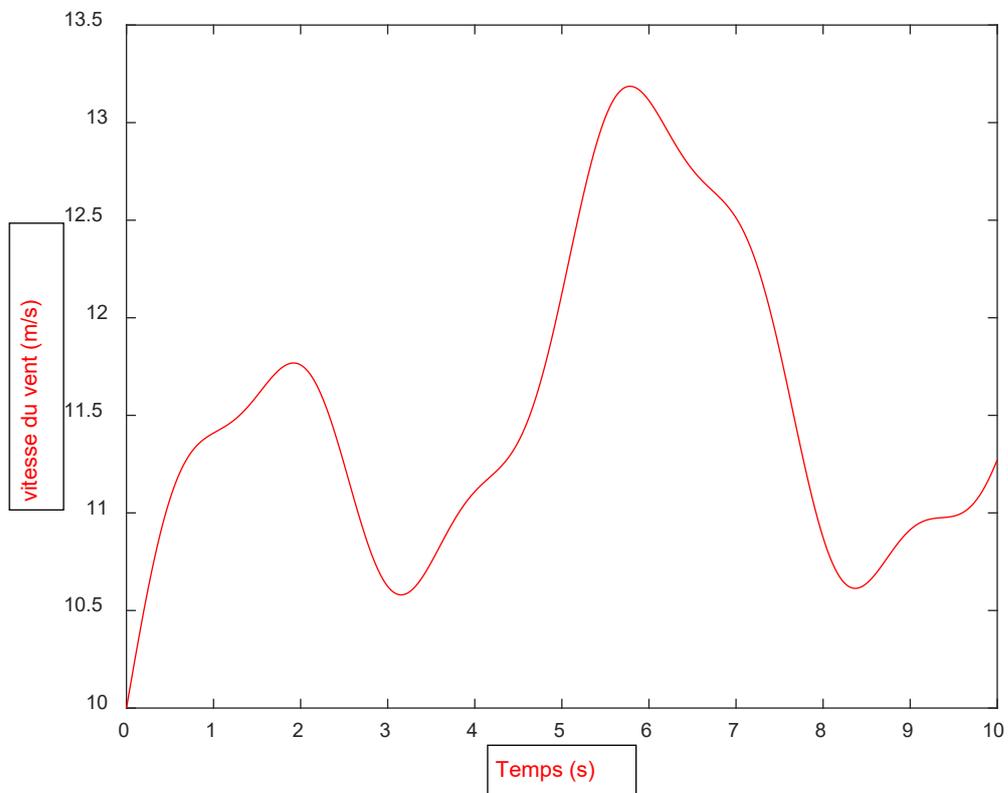
**Figure 4.3 : Le profil de vent à vitesse fixe et à vitesse variable.**

On utilise le block de « step » pour déclarer la valeur de vitesse fixe (12 m/s).



**Figure 4.4 : L'équation de profil du vent.**

La simulation de l'évolution temporelle du vent est représentée par la (Figure 4.5) :



**Figure 4.5 : Allure de la vitesse du vent à vitesse variable.**

4.3.1.2 La turbine :

➤ **Courbes caractéristiques des turbines éoliennes :**

Les courbes essentielles caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ .

La capture d'énergie aérodynamique de la turbine est représentée par le coefficient de puissance  $C_p$ . L'évolution de ce coefficient est une donnée spécifique à chaque éolienne. Dans notre cas l'évolution du coefficient de puissance est en fonction de  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$  est donné par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = A1 \cdot \left[ \left( \frac{A2}{\lambda i} \right) - A3 \cdot \beta - A4 \right] e^{\frac{A5}{\lambda i}} + A6 \cdot \lambda \tag{4.1}$$

Et :

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \tag{4.2}$$

Avec  $A1, A2, A3, A4, A5, A6$  : sont des constantes.

$$A1 = 0.5$$

$$A4 = 5$$

$$A2 = 116$$

$$A5 = -21$$

$$A3 = 0.4$$

$$A6 = 0.0068$$

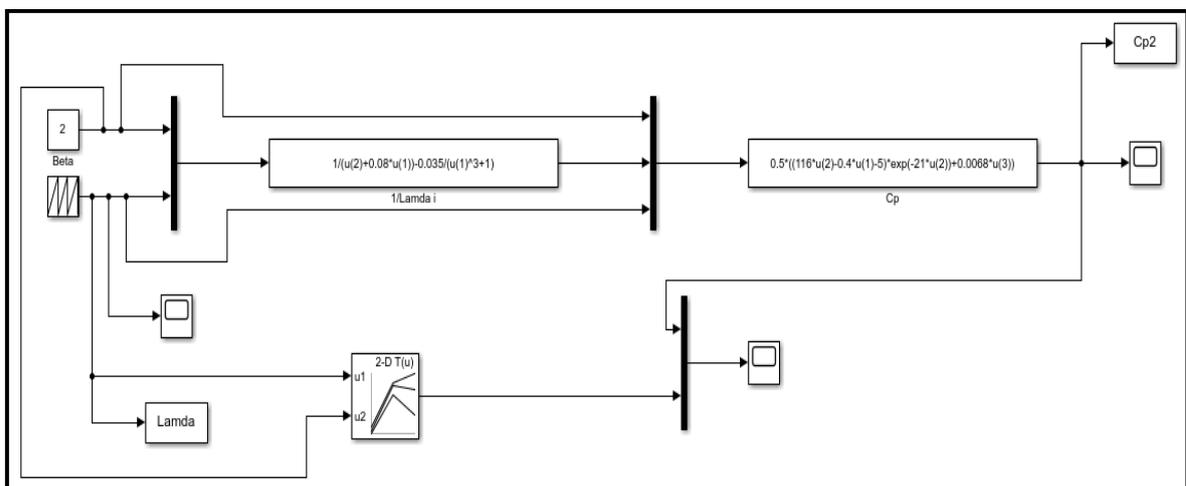
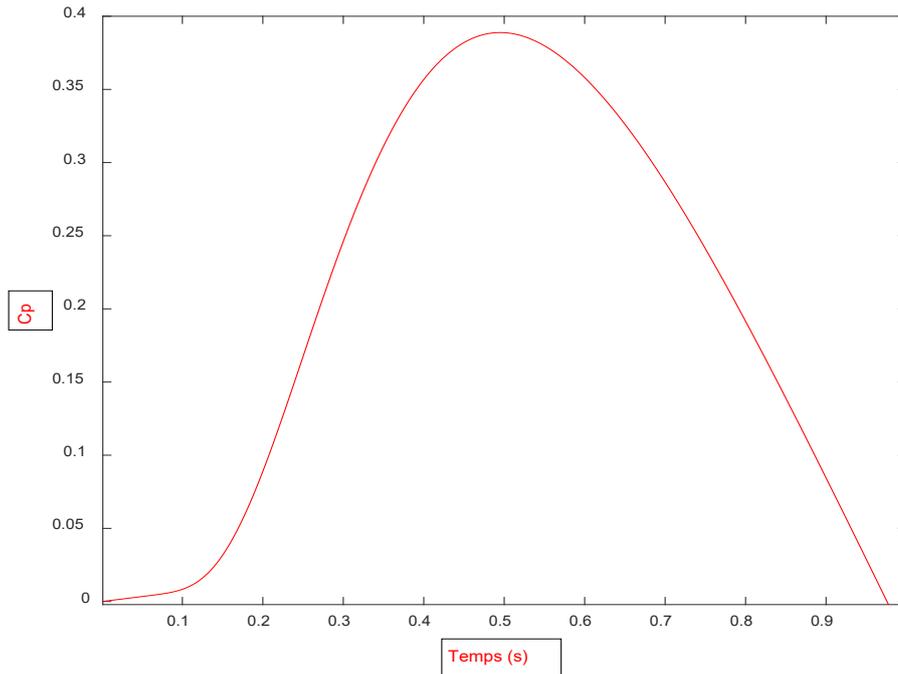


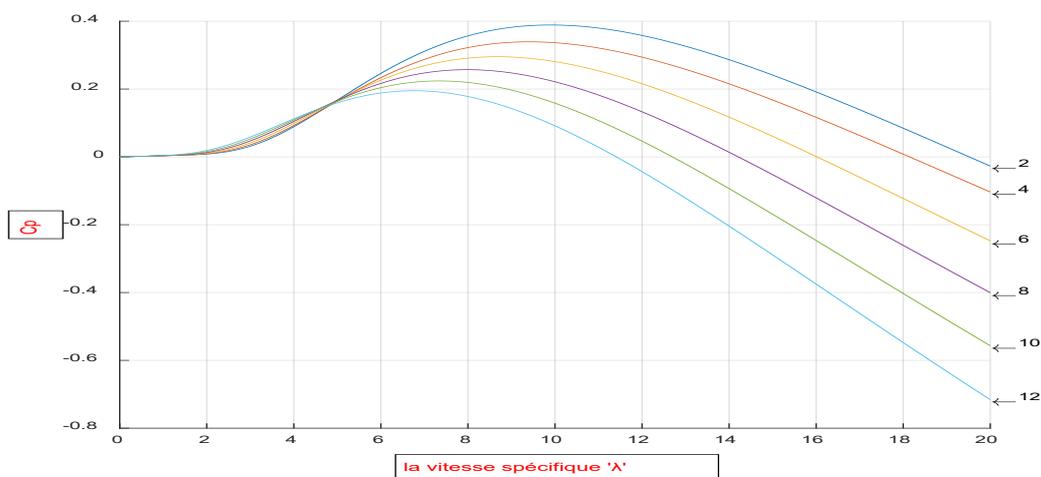
Figure 4.6 : Schéma bloc de la Coefficient de puissance.



**Figure 4.7 : Coefficient de puissance en fonction du temps pour un angle de calage  $\beta = 2^\circ$ .**

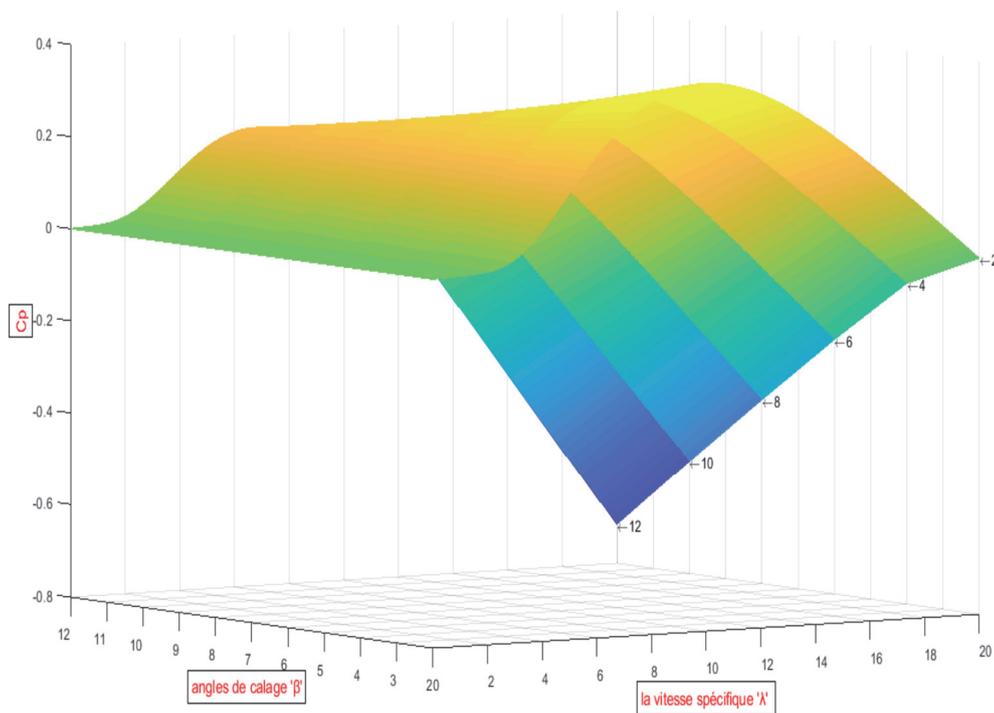
En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales à laide de l'angle de calage  $\beta$  destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients  $C_p$ , change donc pour chaque angle de calage différent.

**$\beta = (2 : 2 : 12)^\circ$  :**



**Figure 4.8 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  pour des différents angles de calage  $\beta$ .**

Nous ne nous soucions que de la partie positive du  $C_p$ , car, en théorie, il y a de l'énergie négative, c'est-à-dire une énergie dans le sens opposée, et nous n'avons pas besoin d'énergie négative, mais nous avons besoin d'énergie positive.



**Figure 4.9 : Le coefficient de puissance dans le repère (X, Y, Z) 3D.**

Après simulation, nous avons trouvé que les valeurs de  $C_{p\_max} = 0.39$  et  $\lambda_{opt} = 10$  pour l'angle de calage  $\beta = 2^\circ$ .

Après avoir simulé le  $C_p$ , nous utiliserons cette valeur avec la vitesse du vent (soit fixe ou variable) pour extraire la valeur de  $P_t$  ( $P_{aero}$ ).

Après avoir extrait la valeur de  $P_t$ , nous l'utiliserons pour connaître la valeur de  $C_t$  qui entre dans la simulation de multiplicateur.

Dans la (**Figure 4.10**) nous allons montrer tous les blocks utilisés pour simuler la turbine.

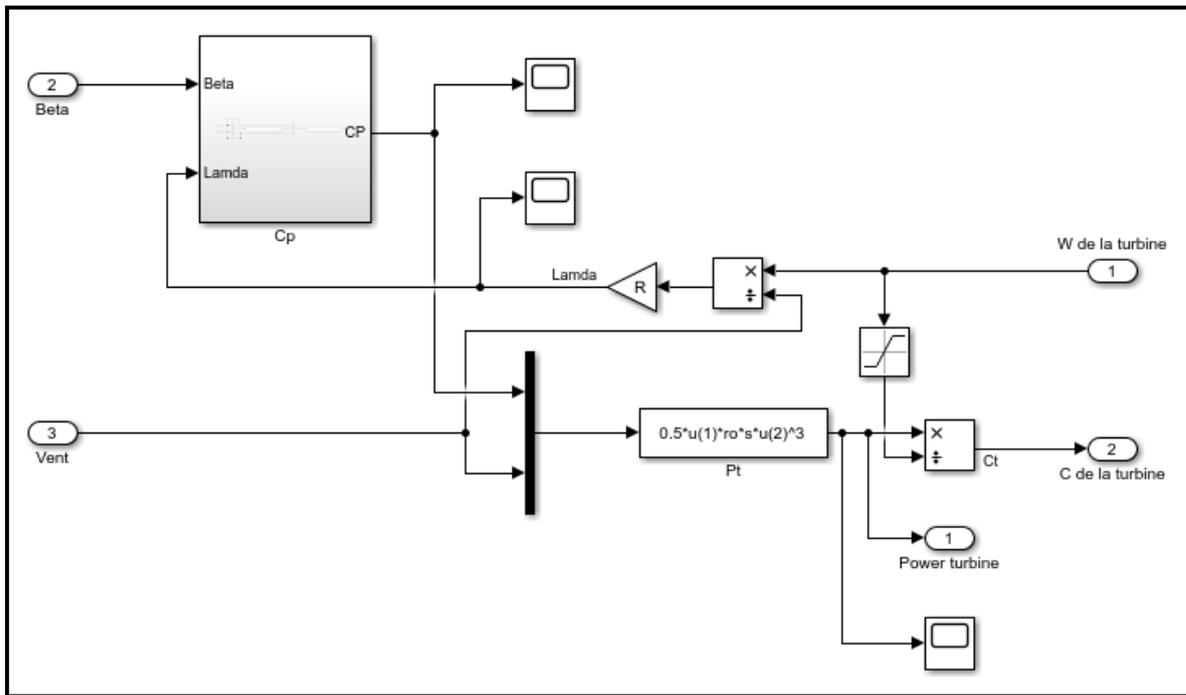


Figure 4.10 : Schéma bloc de la turbine.

4.3.1.3 Le multiplicateur :

Nous exploitons la valeur de  $C_t$  extraite de la turbine pour simuler le multiplicateur, la valeur extraite est multiplié par le gain de multiplicateur, Pour obtenir la valeur  $C_g$  à utiliser pour la simulation de l'arbre de transmission.

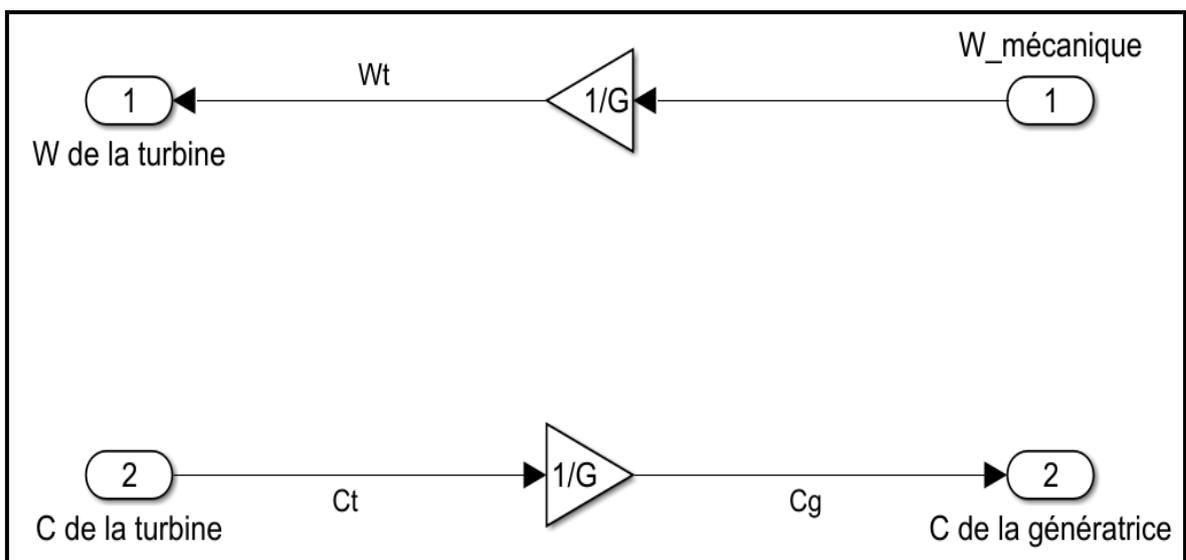


Figure 4.11 : Schéma bloc de multiplicateur.

Quant à  $\Omega_{\text{mec}}$ , c'est le résultat de la l'arbre de transmission que nous simulerons plus tard.

Le multiplicateur dans ce cas, travaillé comme réducteur pour les couples et multiplicateur pour les vitesses.

#### 4.3.1.4 L'arbre de transmission :

Le modèle de l'arbre produit la vitesse mécanique, il a donc deux entrées, le couple de génératrices et le couple électromagnétique optimal fourni par la génératrice après l'utilisation de la technique (MPPT avec ou sans asservissement de vitesse)

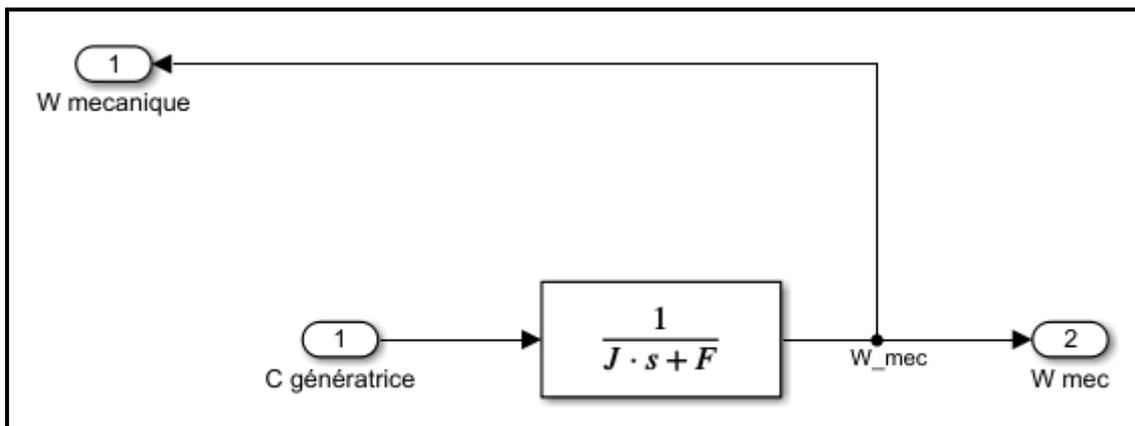


Figure 4.12 : Schéma bloc de l'arbre de transmission.

Ensuite, nous utilisons la valeur de  $\Omega_{\text{mec}}$  pour compléter la simulation de multiplicateur, puis nous utilisons la valeur de  $\Omega_t$  résultant de multiplicateur pour calculer la valeur de  $\lambda$ , où la valeur de  $\lambda$  est à nouveau utilisée pour calculer la valeur de  $C_p$ .

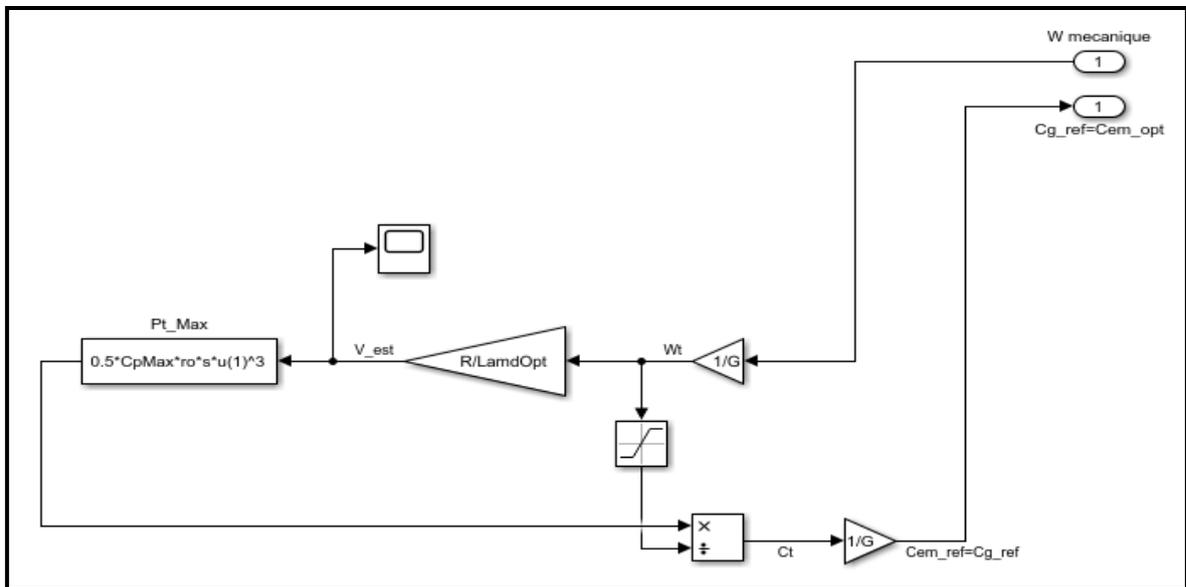
#### 4.3.1.5 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (MPPT) :

Dans cette technique, il sera simulé les deux techniques de maximisation de puissance.

- Simulation de MPPT sans asservissement de vitesse.

- Simulation MPPT avec asservissement de vitesse.

**4.3.1.5 .1 Simulation de MPPT sans asservissement de vitesse :**

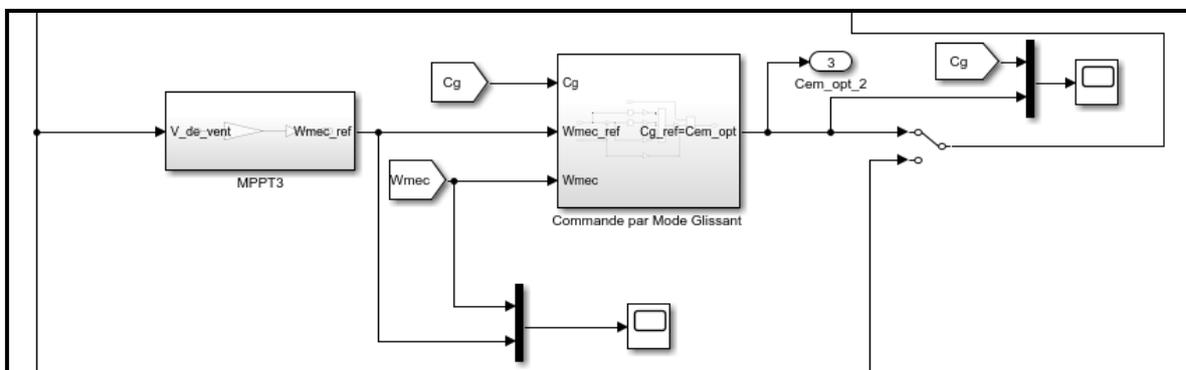


**Figure 4.13 : Schéma bloc de MPPT sans asservissement de vitesse.**

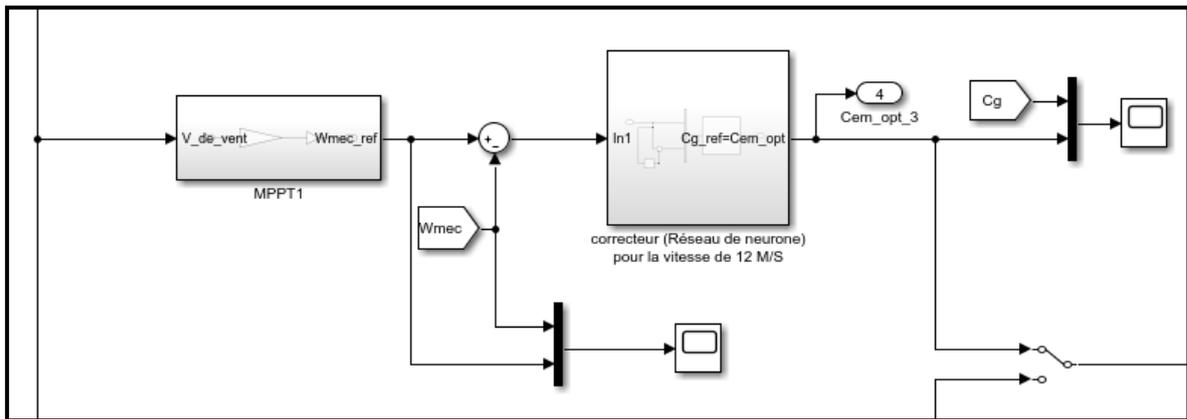
**4.3.1.5 .2 Simulation de MPPT avec asservissement de vitesse :**

Dans cette technique en utilisant trois correcteurs pour la comparaison entre eux :

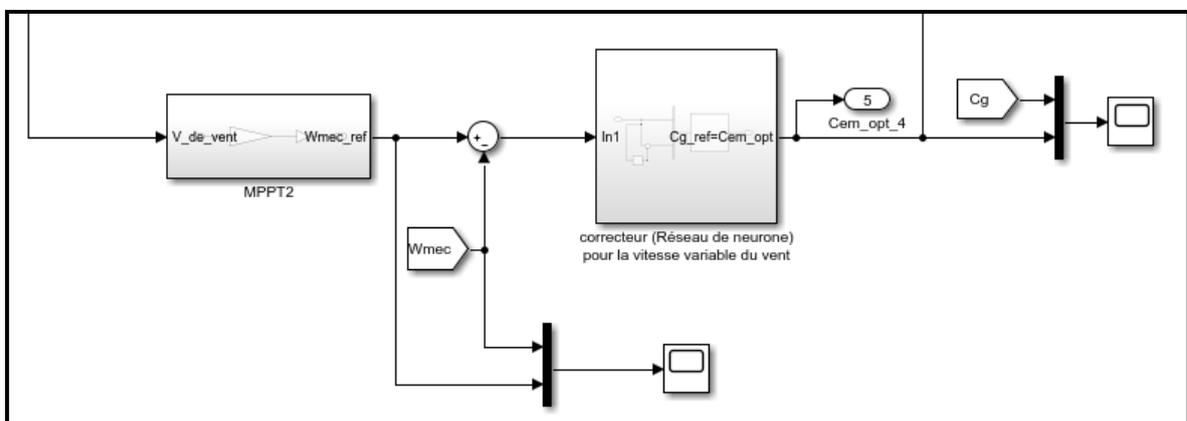
- Correcteur par mode glissement.
- Correcteur (Réseau de neurone) pour la vitesse de (12 m/s).
- Correcteur (Réseau de neurone) pour la vitesse variable du vent.



**Figure 4.14 : Schéma bloc de dehors de la commande MPPT relié par le correcteur de mode glissement.**



**Figure 4.15 : Schéma bloc de dehors de la commande MPPT relié par le correcteur (Réseau de neurone) pour la vitesse de (12 m/s).**



**Figure 4.16 : Schéma bloc de dehors de la commande MPPT relié par le Correcteur (Réseau de neurone) pour la vitesse variable du vent.**

### ➤ Simulation de réseau de neurones :

#### A) Choix du type de réseau de neurones :

Parmi les divers types de RNA existants, nous nous sommes penchés dans notre étude sur le Perceptron Multicouches (MLP) non bouclé, qui s'est avéré très efficace au cours de ces dernières années.

Les (MLP) utilisés contiennent deux couches cachées, la première couche ayant vingt neurones, une fonction d'activation de type « tangente sigmoïde » et le deuxième ayant un neurone, une fonction d'activation de type

« linéaire », et une seule couche de sortie possédant un seul neurone qui a une fonction d'activation « linéaire ».

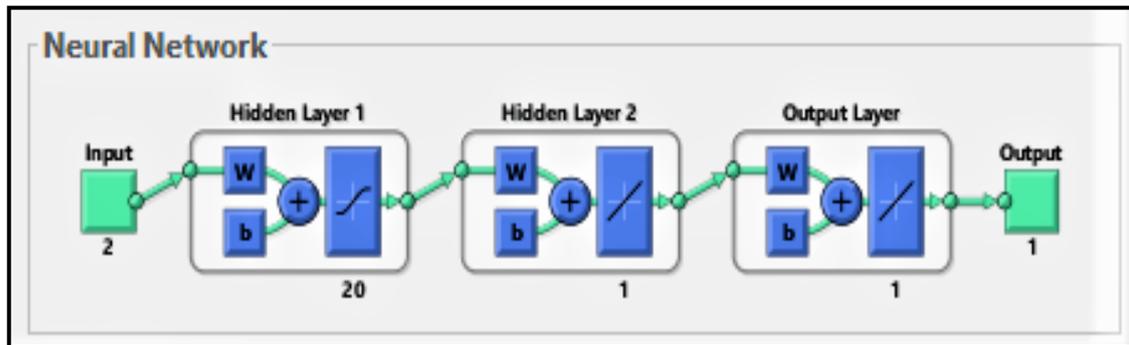


Figure 4.17 : Modèle du réseau de neurones utilisé.

➤ **Réalisation le correcteur de réseau de neurones :**

Une fois le type du réseau de neurones choisi, nous procédons à la création et l'implémentation de notre RNA.

La figure suivante montre les performances de l'apprentissage effectué pour le correcteur RN :

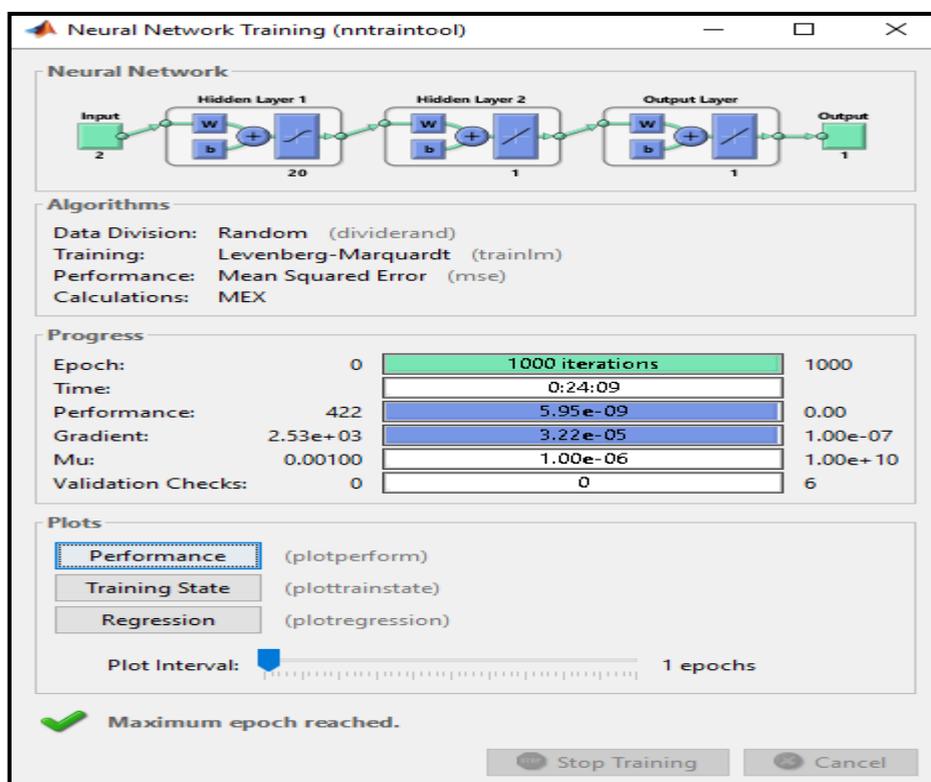
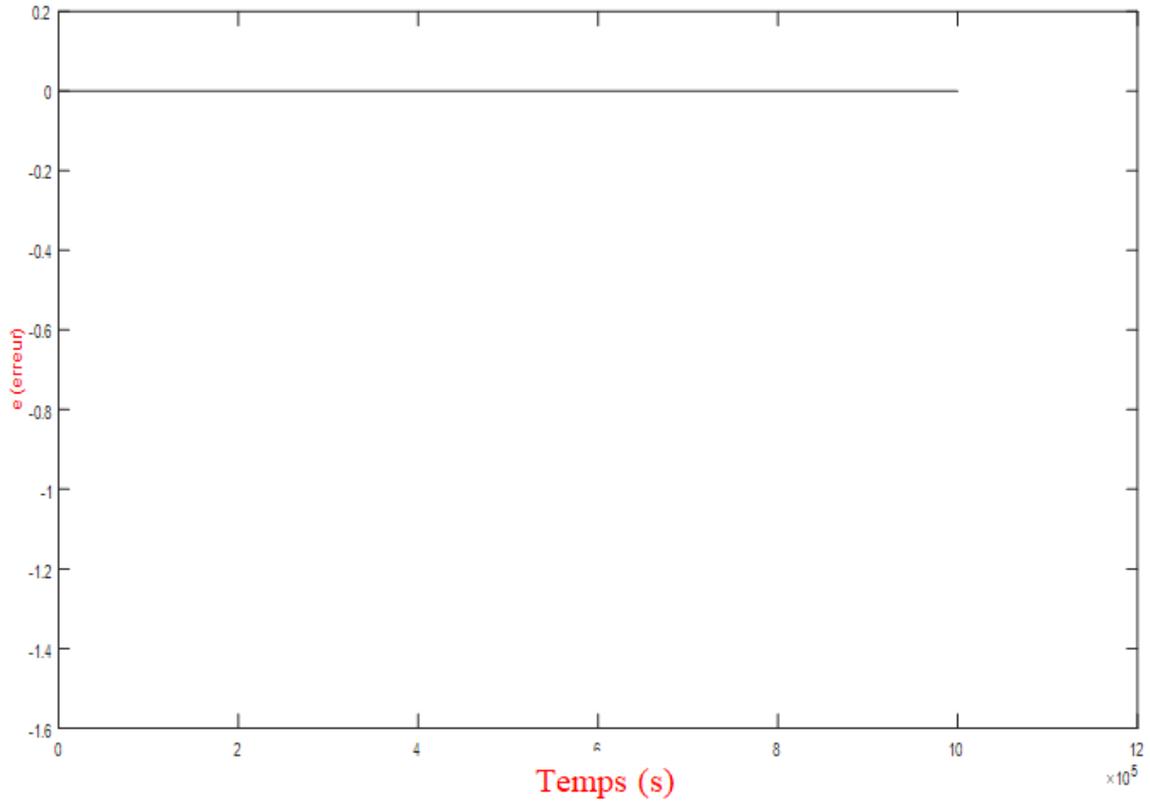
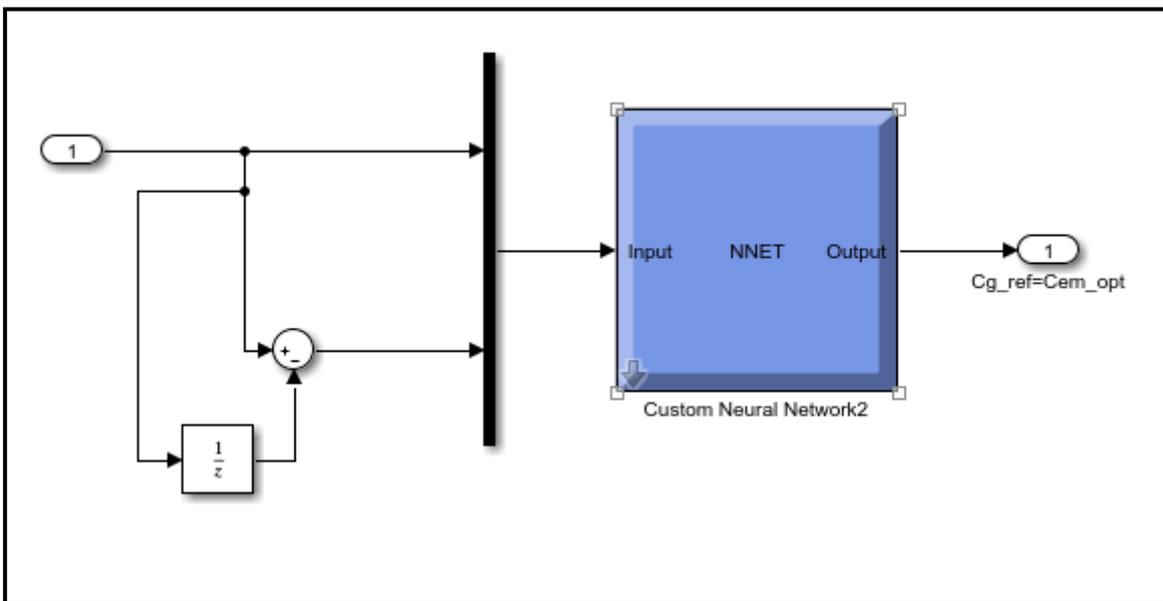


Figure 4.18 : Fenêtre d'entraînement de réseau de neurones.



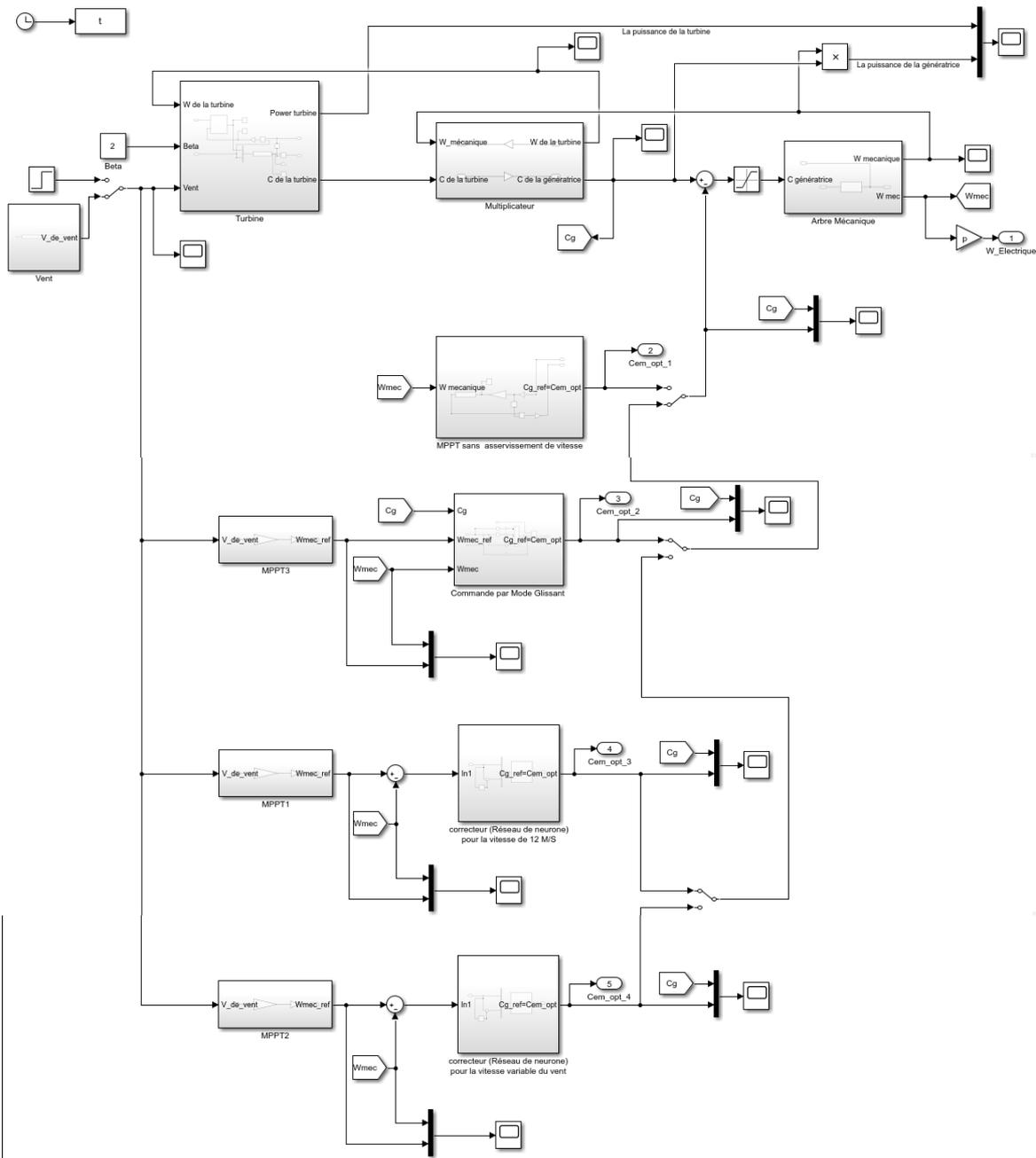
**Figure 4.19 : Courbe affichée la valeur de l'erreur.**

Après la réalisation, il nous montre le block de réseau de neurone, puis nous l'associons au système.



**Figure 4.20 : Le correcteur de réseau de neurones relié au système.**

**4.3.1.6 Schéma de simulation de la partie mécanique :**



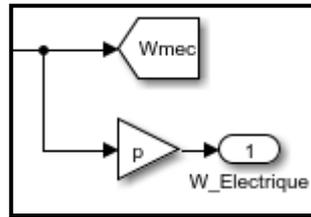
**Figure 4.21 : Schéma block de simulation de la partie mécanique.**

**4.3.2 Simulation de la partie électrique de système éolienne :**

Dans cette partie nous allons simuler le modèle de GSAP, la commande vectorielle et la puissance électrique.

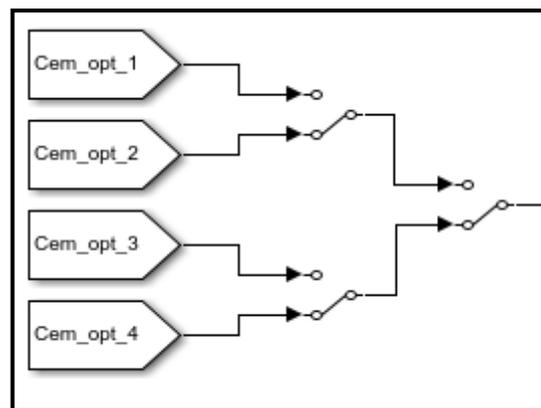
**4.3.2.1 La commande vectorielle :**

À partir à la vitesse mécanique et aux couples extraits des correcteurs, nous allons simuler la commande vectorielle de ce système.



**Figure 4.22 : Schéma block de l'équation électrique.**

La vitesse électrique ( $\Omega_{\text{électrique}}$ ) est une grandeur essentielle pour la simulation de la commande vectorielle, avec des valeurs de couple extraites des correcteurs.



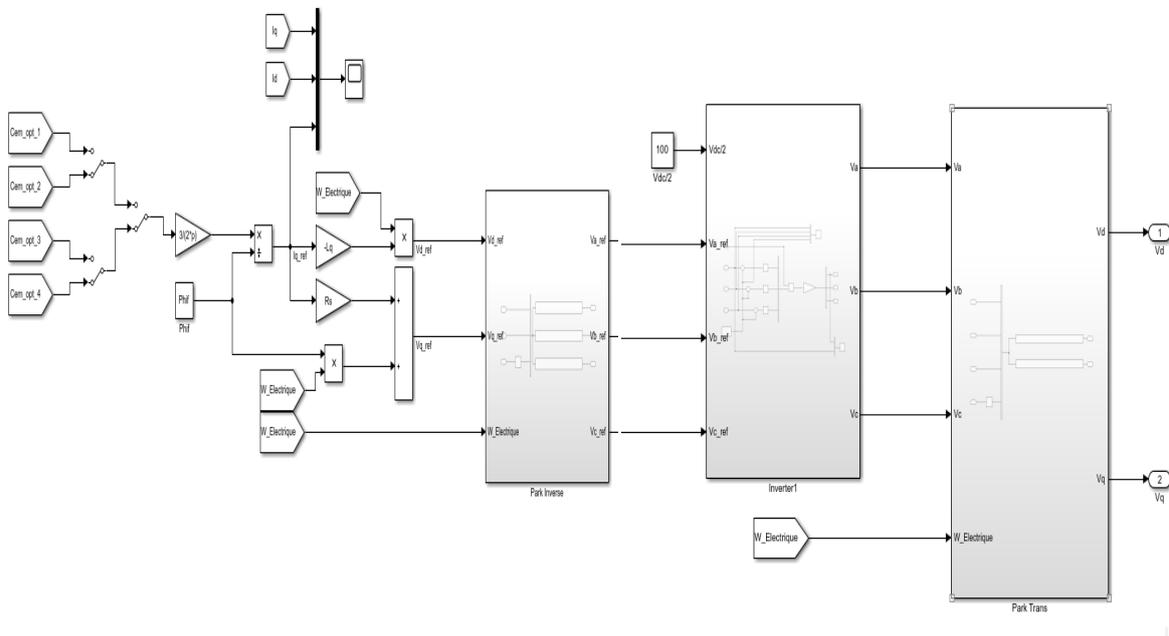
**Figure 4.23 : Les différents couples électromagnétiques optimaux utilisés pour la commande vectorielle.**

**Cem\_opt\_1** : Le couple électromagnétique optimal extrait par la commande MPPT sans asservissement de vitesse.

**Cem\_opt\_2** : Le couple électromagnétique optimal extrait par la commande de mode glissement.

**Cem\_opt\_3** : Le couple électromagnétique optimal extrait par la commande de réseau de neurones de la vitesse (**12 m/s**).

**Cem\_opt\_4** : Le couple électromagnétique optimal extrait par la commande de réseau de neurones de la vitesse variable.



**Figure 4.24 : Schéma block de la commande vectorielle.**

La commande vectorielle utilisée pour création des tensions ( $V_d$ ,  $V_q$ ), que nous utiliserons pour simuler la GSAP.

#### 4.3.2.2 La GSAP :

À partir des tensions ( $V_d$ ,  $V_q$ ), nous allons simuler la GSAP de ce système.

La GSAP de notre système est fonctionnée en trois fonctionnements principaux sont :

- GSAP à vide.
- GSAP en court-circuit.
- GSAP en charge.

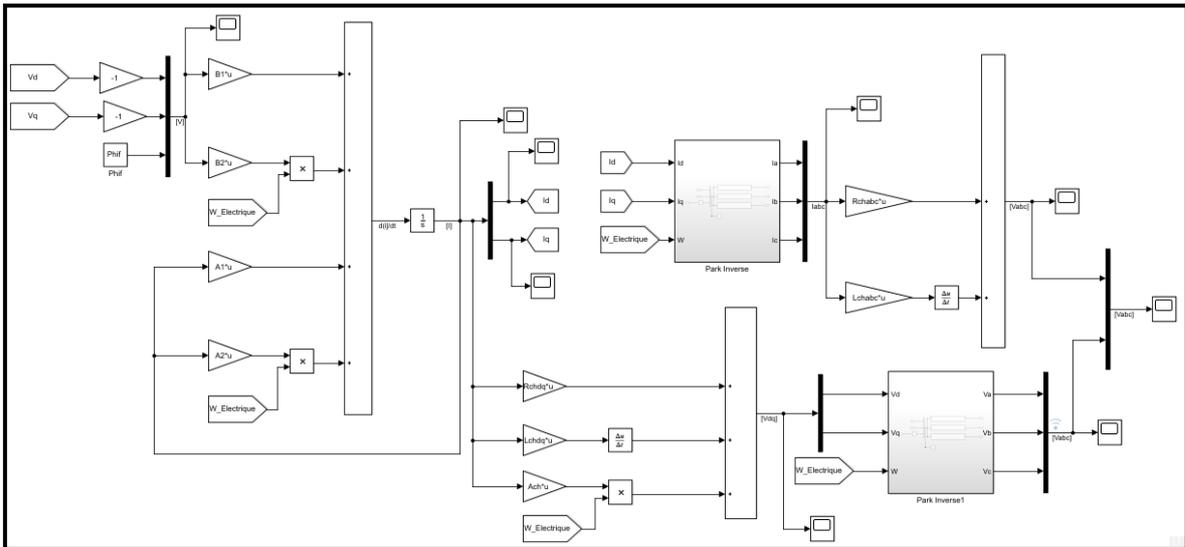


Figure 4.25 : Schéma block de la GSAP.

➤ **GSAP à vide :**

$$I_d = 0 ; I_q = 0$$

➤ **GSAP en court-circuit :**

$$V_d = 0 ; V_q = 0$$

➤ **GSAP en charge :**

C'est le cas entre la GSAP à vide et en court circuit où  $V_d$ ,  $V_q$ ,  $I_d$  et  $I_q$  ont une certaine valeur et dans notre système nous choisissons ce fonctionnement.

4.3.2.2 La puissance électrique :

C'est la simulation de l'équation  $P(t)$  dans le chapitre 3 :

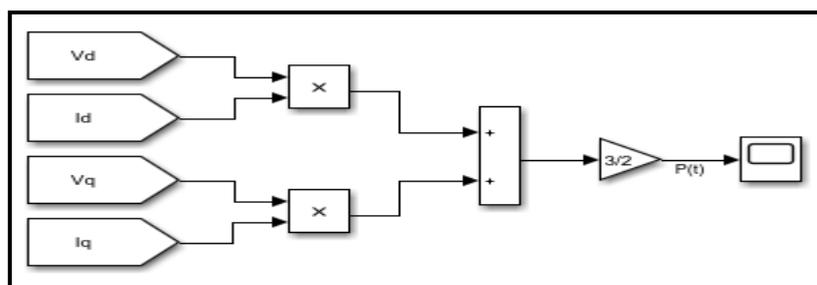


Figure 4.26 : Schéma block de la puissance électrique.

## 4.4 Les résultats :

### 4.4.1 Programmes et paramètre du système :

#### 4.4.1.1 Le programme de réseau de neurones :

```

1 - X=[E';DE'];
2 - y=S';
3 - net = newff(X,y,[20 1],{'tansig','purelin'})
4 - net1=train(net,X,y)
5 - yest=sim(net1,X)
6 - e=y-yest
7 - plot(e)
8 - gensim(net1,-1)

```

Figure 4.27 : Le programme de réseau de neurones.

#### 4.4.1.2 Le programme de système éolien :

```

1 - clc;
2 - clear all;
3 - J=0.21;
4 - F=0.0001;
5 - R=3;
6 - G=6;
7 - ro=1.22;
8 - CpMax=0.39;
9 - LamdOpt=10;
10 - s=pi*R^2;
11 - p=4;
12 - Phif=0.6;
13 - T=[2/3 -1/3 -1/3; -1/3 2/3 -1/3; -1/3 -1/3 2/3]
14 - fpor=5000
15 - Rch=10;
16 - Lch=0.0002;
17 - Rs=0.6+Rch;
18 - Ld=1.4e-3+Lch;
19 - Lq=2.8e-3+Lch;
20 - A1=[-Rs/Ld 0; 0 -Rs/Lq]
21 - A2=[0 Lq/Ld; -Ld/Lq 0]
22 - B1=[-1/Ld 0 0; 0 -1/Lq 0]
23 - B2=[0 0 0; 0 0 1/Lq]
24 - Rchabc=[Rch 0 0; 0 Rch 0; 0 0 Rch]
25 - Lchabc=[Lch 0 0; 0 Lch 0; 0 0 Lch]
26 - Rchdq=[Rch 0; 0 Rch]
27 - Lchdq=[Lch 0; 0 Lch]
28 - Ach=[0 -Lch; Lch 0]

```

Figure 4.28 : Le programme de système éolien.

## 4.4.1.3 Les paramètres de système éolien :

Les parties de système	Les éléments de système	Les valeurs numériques	Signification
<b>Partie mécanique</b>	<b>L'éolienne</b>	$J = 0.21$	Moment d'inertie (Kg*m <sup>2</sup> )
		$F = 0.0001$	Coefficient de frottement
		$R = 3$	Rayon de l'éolienne (m)
		$G = 6$	Gain du multiplicateur
		$\rho = 1.22$	Masse volumique de l'air (Kg/m <sup>3</sup> )
		$C_{p\_max} = 0.39$	Le coefficient de puissance maximale
		$\lambda_{opt} = 10$	la vitesse spécifique
		$s = \pi * R^2$	La surface de la turbine
		$p = 4$	Nombre de paires de pôles
<b>Partie électrique</b>	<b>La commande vectorielle</b>	$\varphi_f = 0.6$	Flux des aimants permanents (Wb)
		$f_{por} = 5000$	La fréquence de la porteuse
	<b>GSAP</b>	$R_{ch} = 10$	La résistance de la charge
		$L_{ch} = 0.0002$	L'inductance de la charge
		$R_s = 0.6 + R_{ch}$	La résistance statorique ( $\Omega$ )
		$L_d = 1.4 * 10^{-3} + L_{ch}$	L'inductance statorique selon l'axe d (H)
		$L_q = 2.8 * 10^{-3} + L_{ch}$	L'inductance statorique selon l'axe q (H)

Tableau 4.1 : Les paramètres de système éolien.

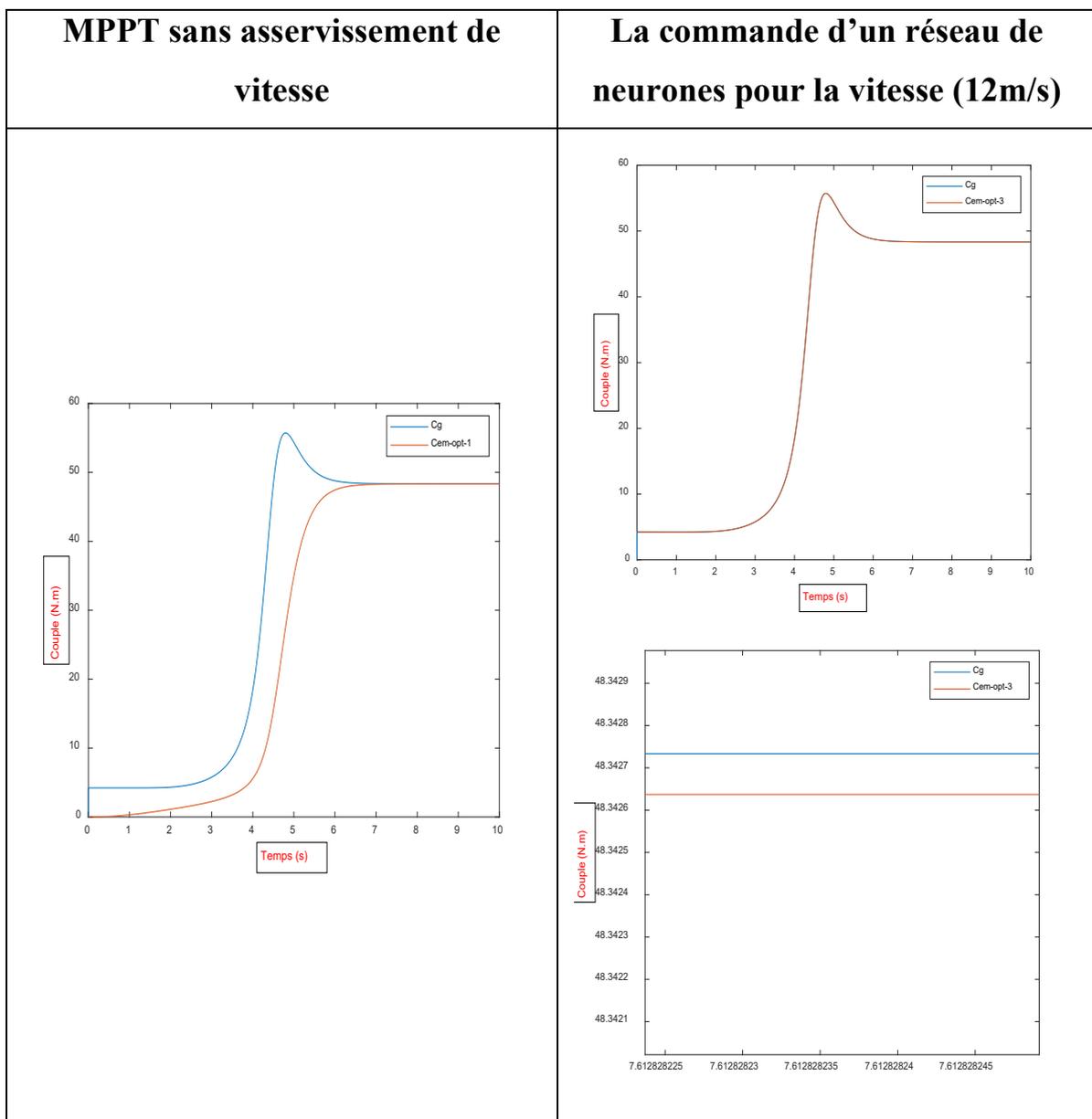
**4.4.1.4 Les résultats après l'exécution :**

**4.4.1.4.1 La comparaison entre les techniques de la maximisation de la puissance :**

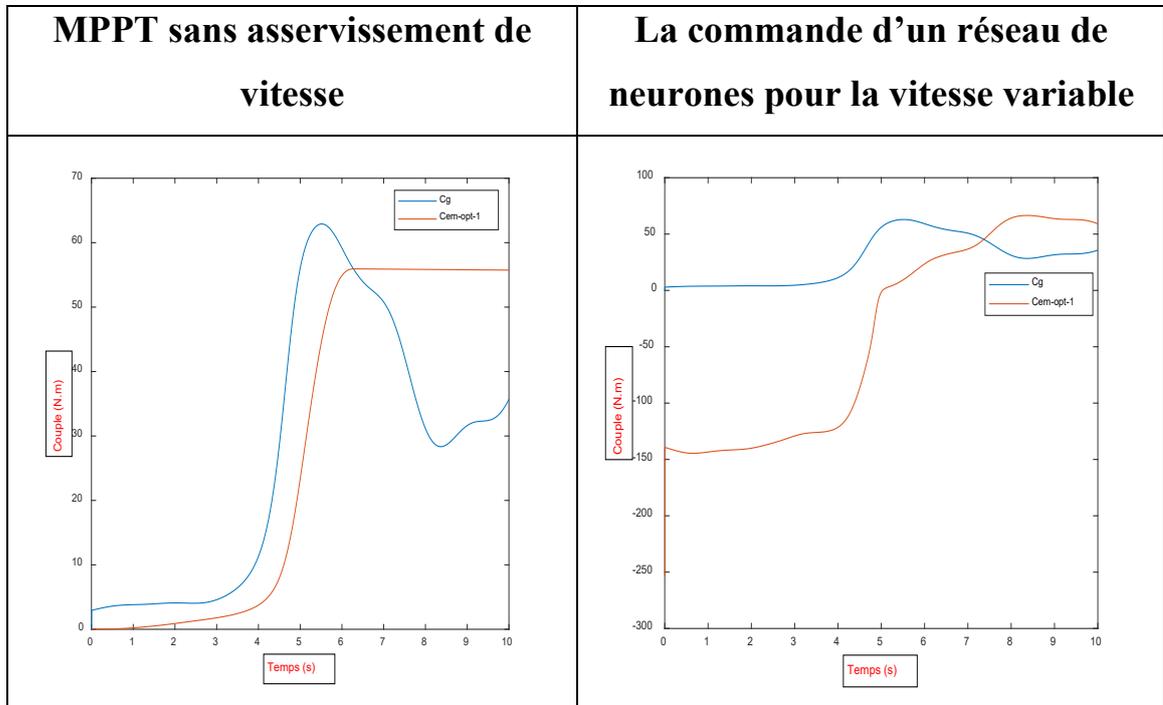
**4.4.1.4.1.1 La partie mécanique :**

➤ **Par rapport à les couples  $C_g$  et  $C_{em\_opt}$  :**

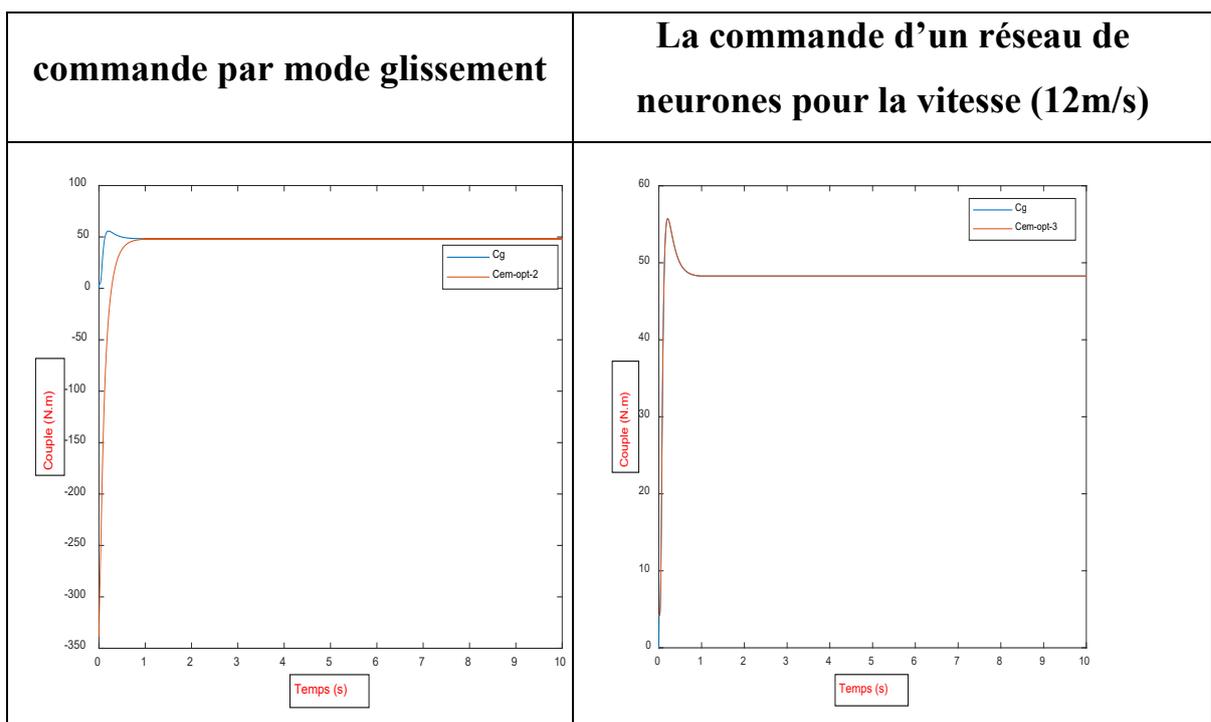
**A) La comparaison entre la commande MPPT sans asservissement de vitesse et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent égale (12 m/s) :**

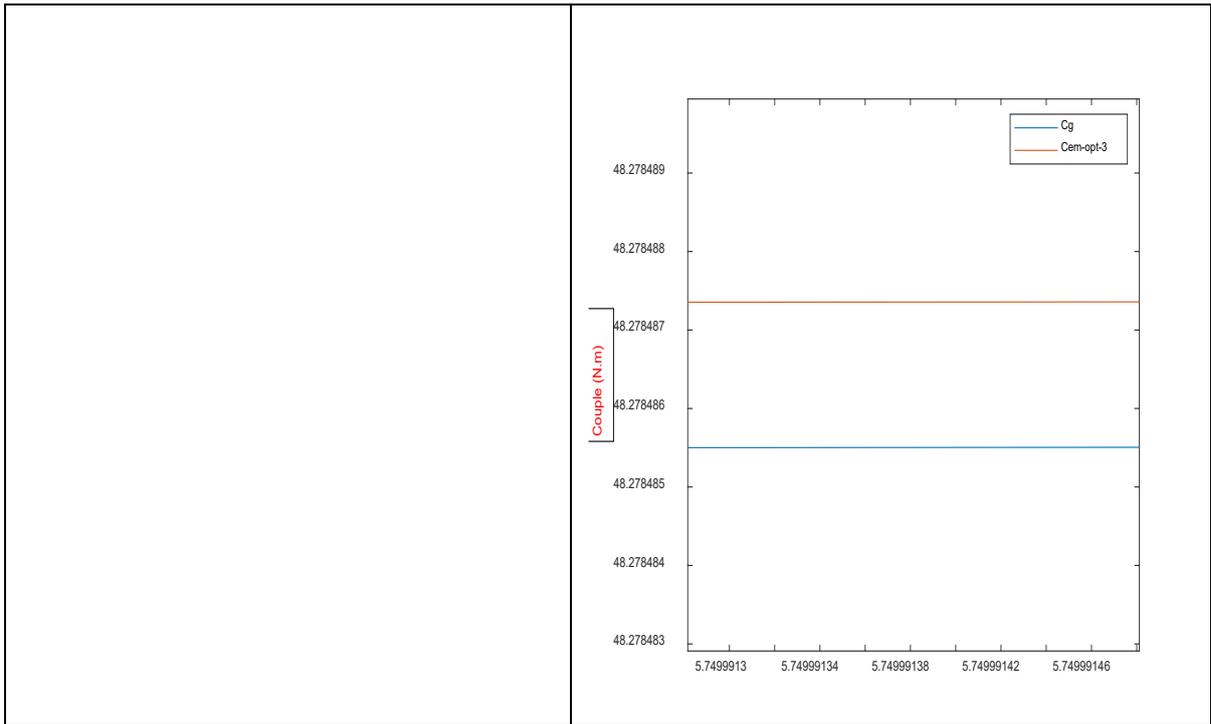


**B) La comparaison entre la commande MPPT sans asservissement de vitesse et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent variable :**

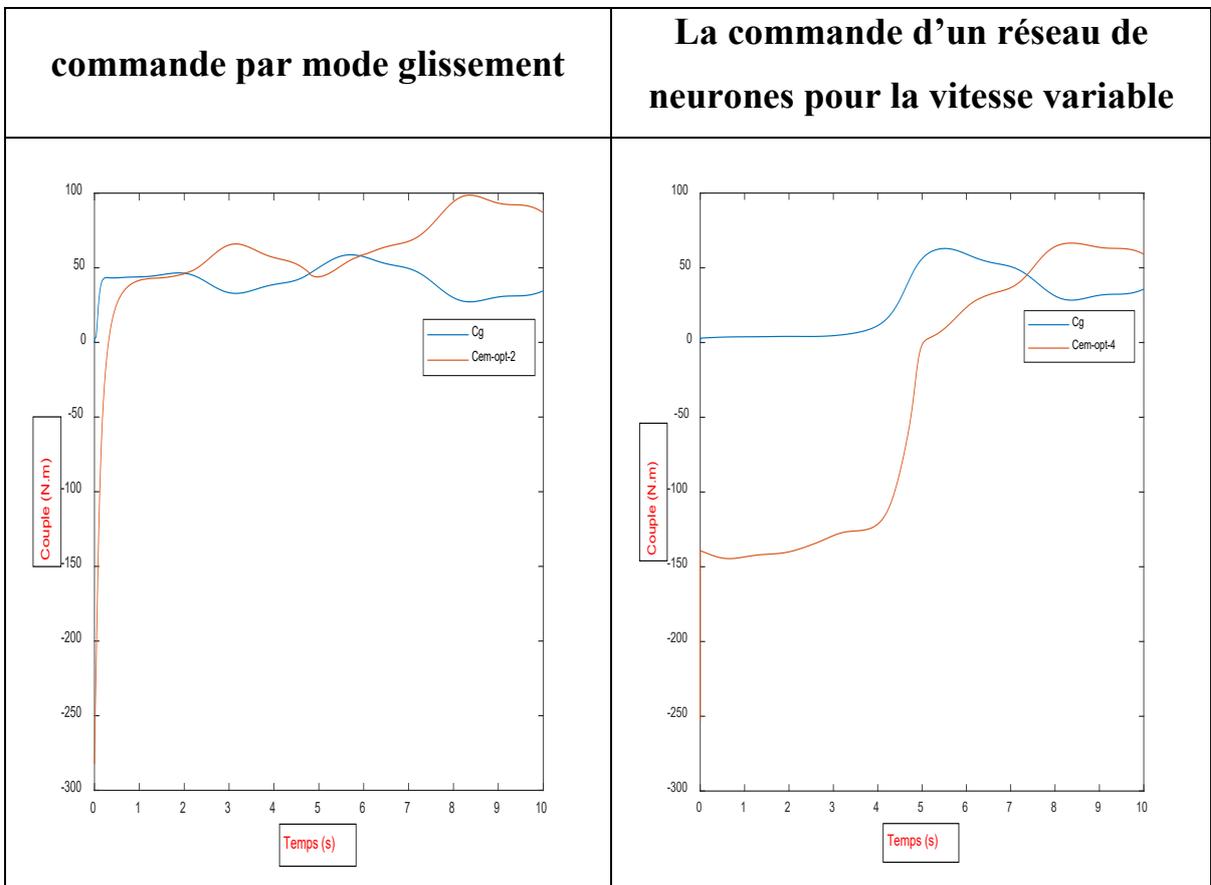


**C) La comparaison entre la commande par mode glissement et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent égale (12 m/s) :**





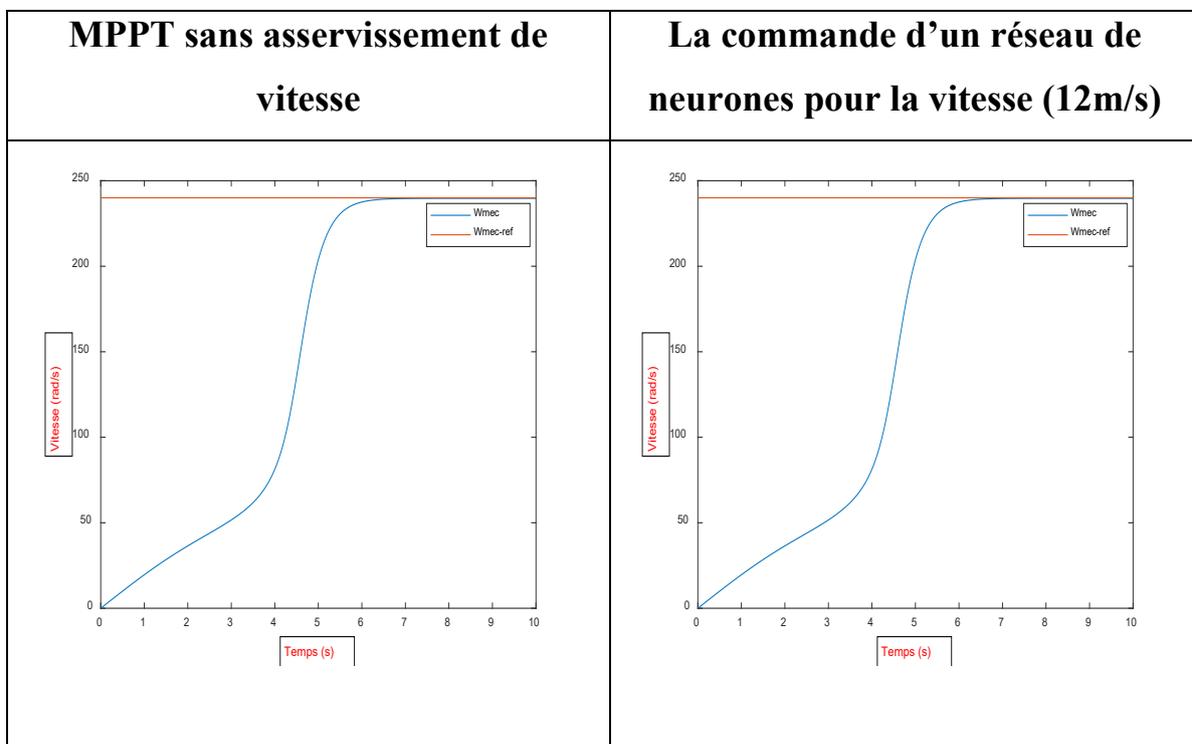
**D) La comparaison entre la commande par mode glissement et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent variable :**



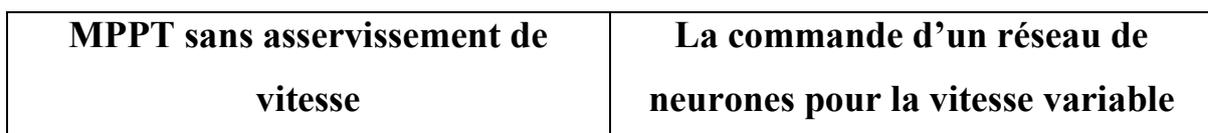
On remarque que la congruence est parfaite pour  $C_g$  et  $C_{em\_opt}$  dans tous les cas lors de l'utilisation de la commande de réseau de neurones. Et les deux systèmes converger, mais l'erreur et le temps de réponse dans la commande par réseau de neurones très peu par rapport à la commande MPPT sans asservissement de vitesse et par mode glissement.

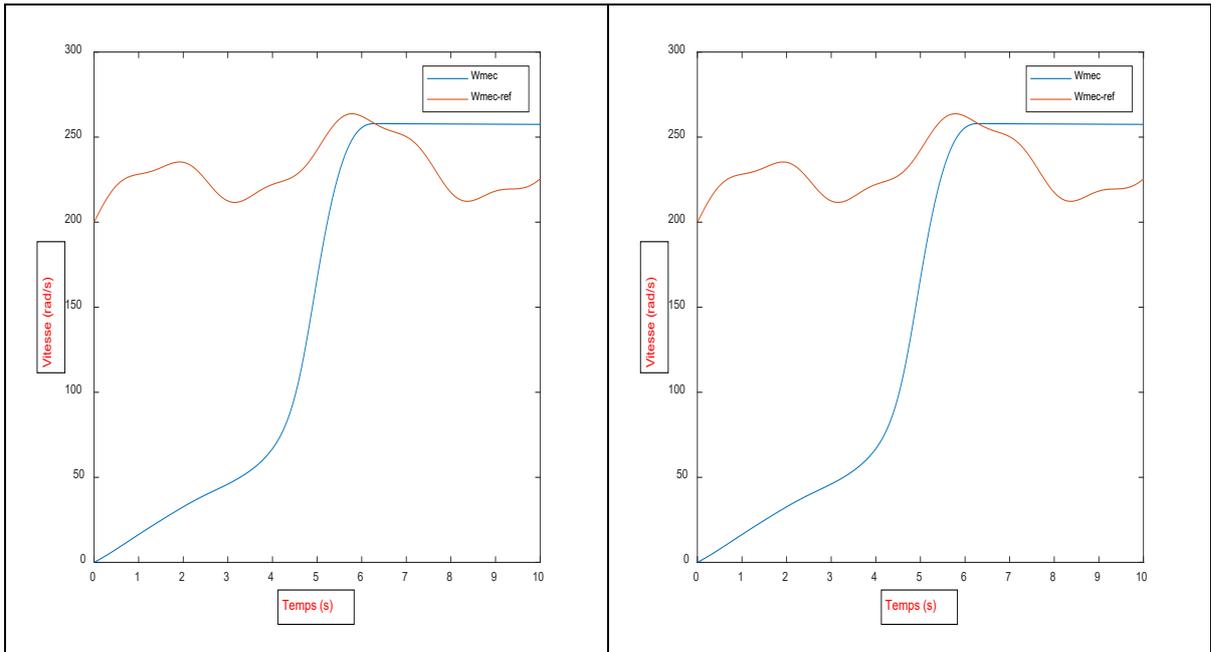
➤ **Par rapport à les vitesses  $\Omega_{mec\_ref}$  et  $\Omega_{mec}$  :**

**A) La comparaison entre la commande MPPT sans asservissement de vitesse et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent égale (12 m/s) :**

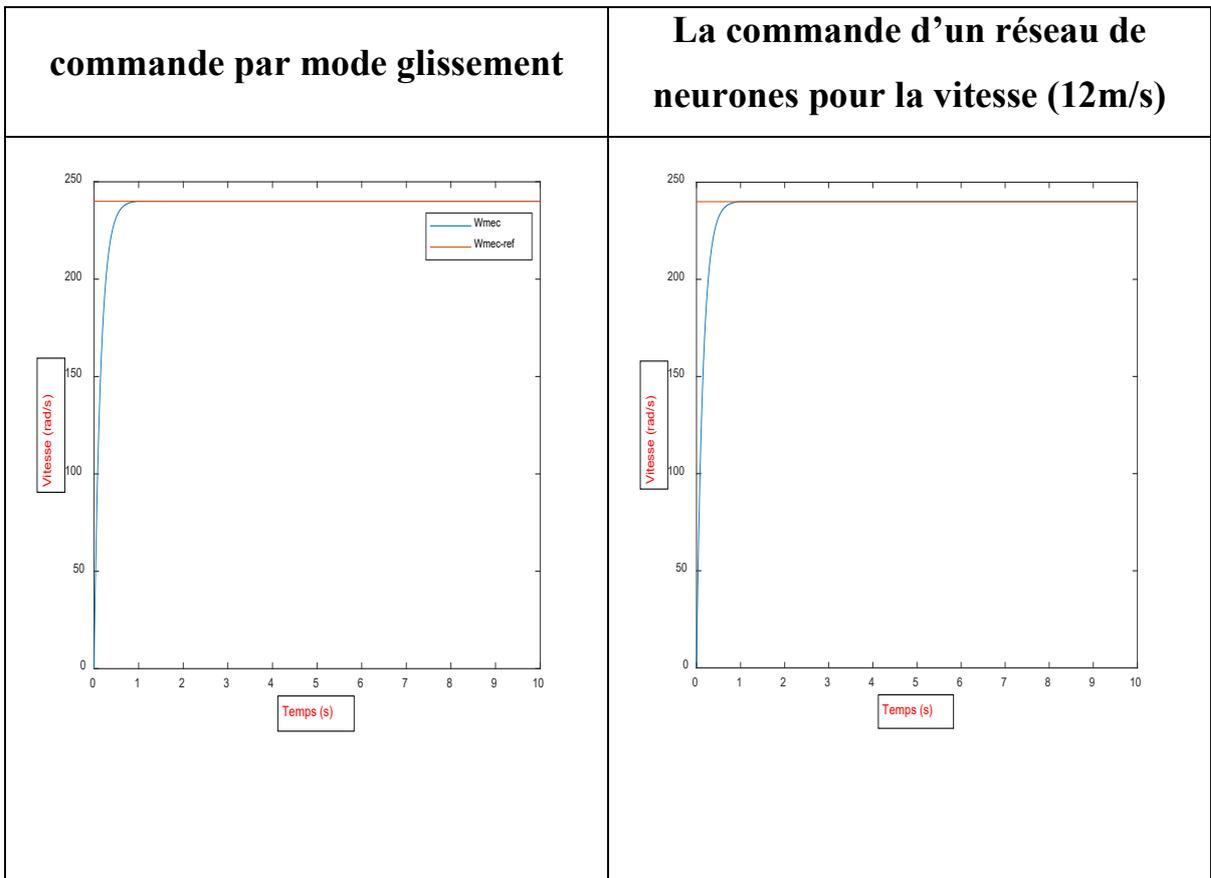


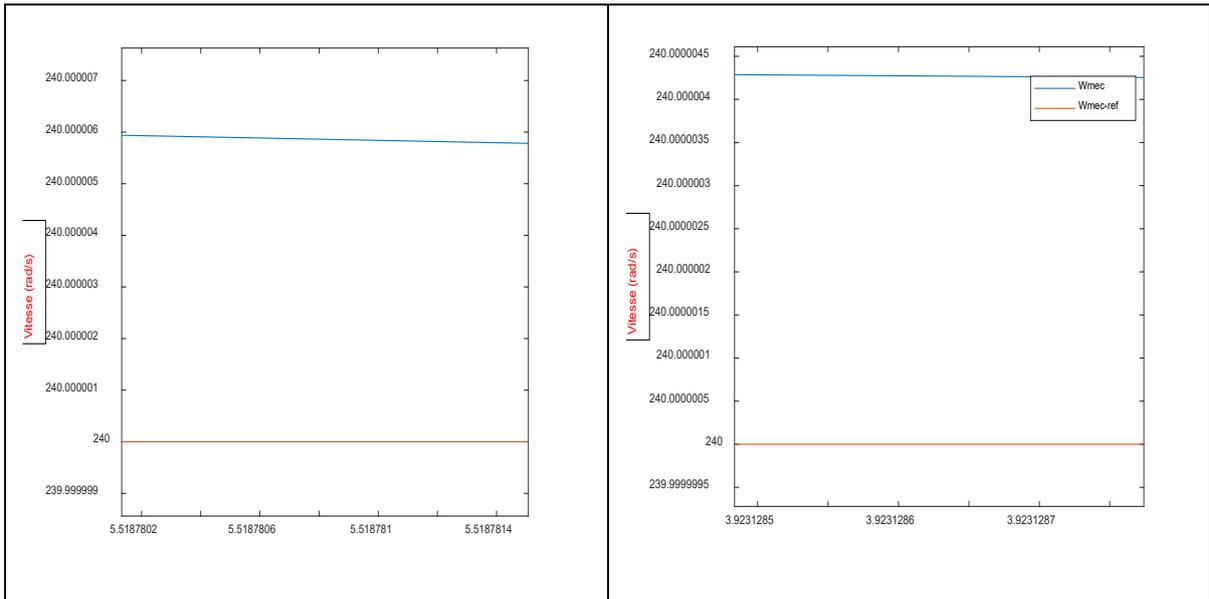
**B) La comparaison entre la commande MPPT sans asservissement de vitesse et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent variable :**



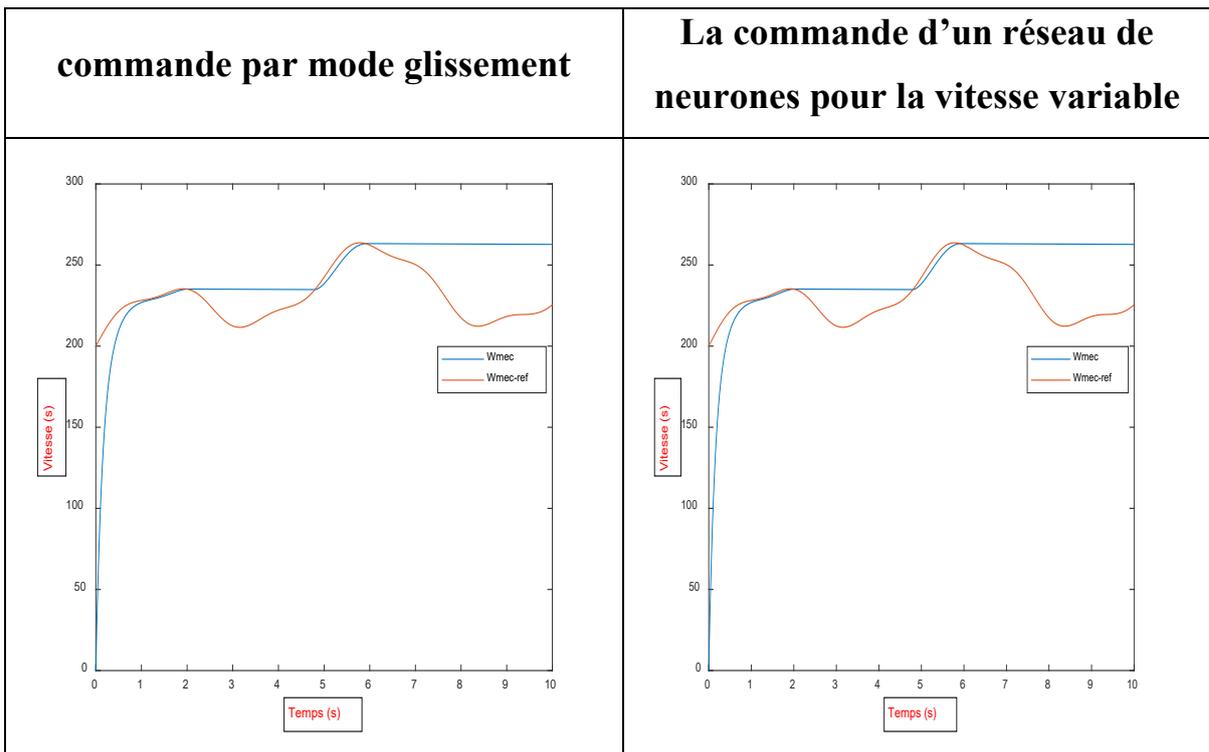


**C) La comparaison entre la commande par mode glissement et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent égale (12 m/s) :**





**D) La comparaison entre la commande par mode glissement et La commande basée sur réseau de neurones pour la vitesse du vent variable :**

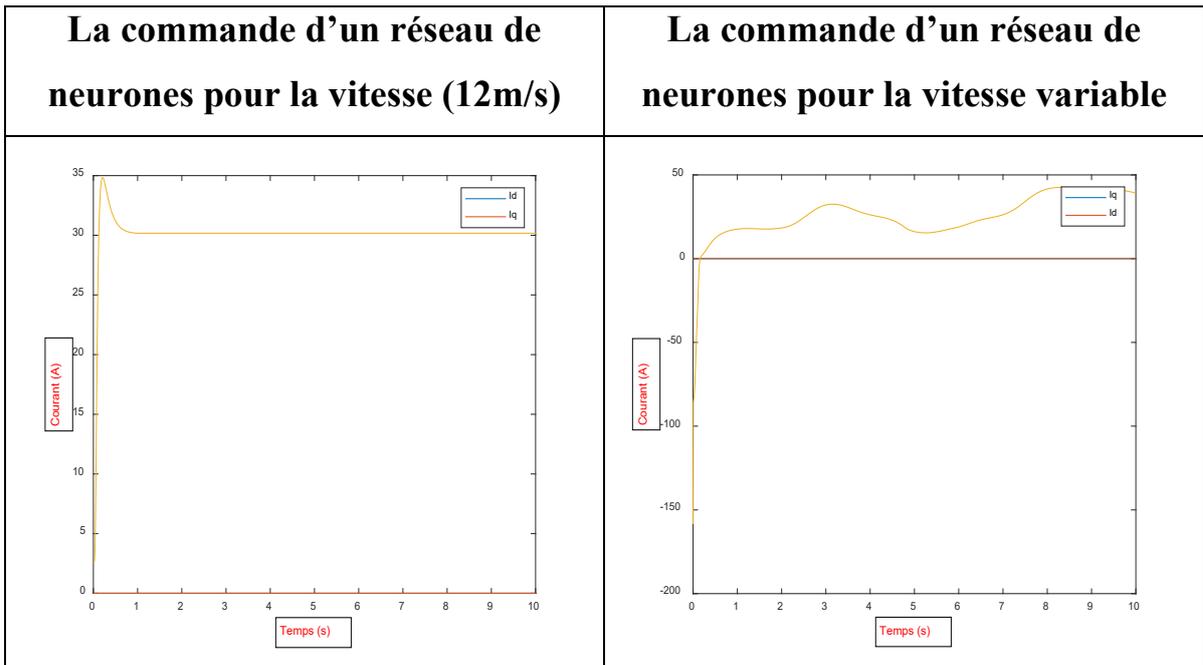


On remarque que la congruence est parfaite pour la vitesse  $\Omega_{mec\_ref}$  et  $\Omega_{mec}$  dans tous les cas mais il y a très peu erreur augmente entre eux par rapport à la commande de réseau de neurones. Où le taux d'erreur augmente pour par rapport à la commande MPPT sans asservissement de vitesse, la

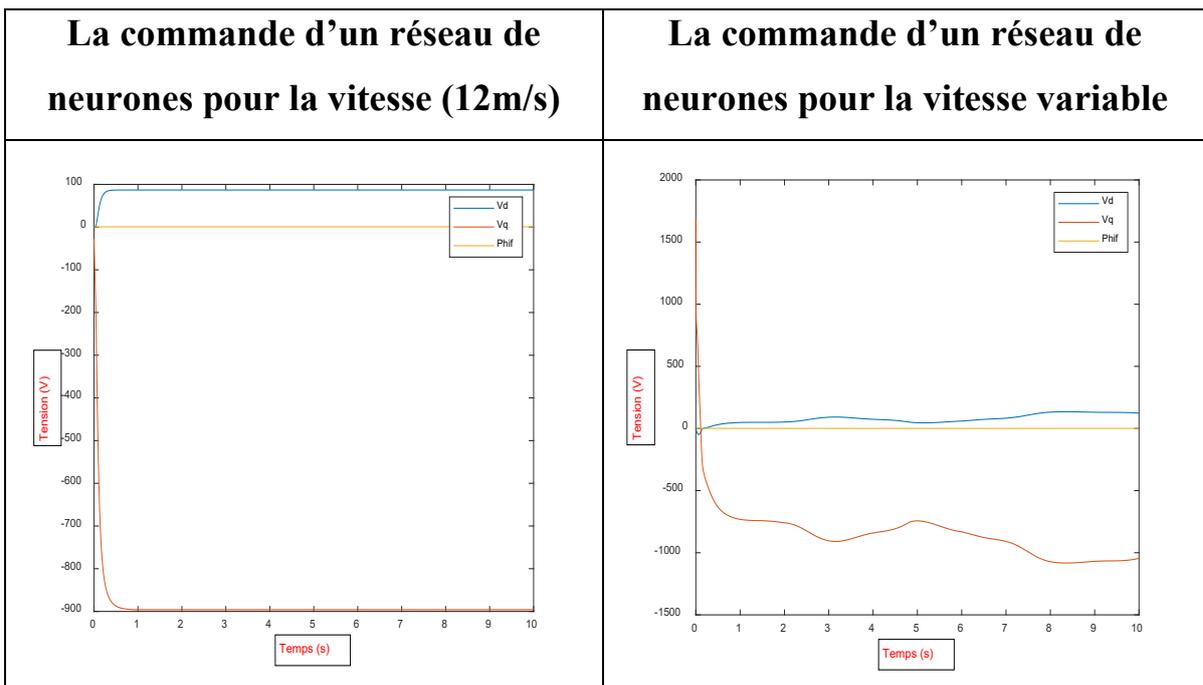
commande par mode glissement et diminue pour la commande de réseau de neurones.

**4.4.1.4.1.2 La partie électrique :**

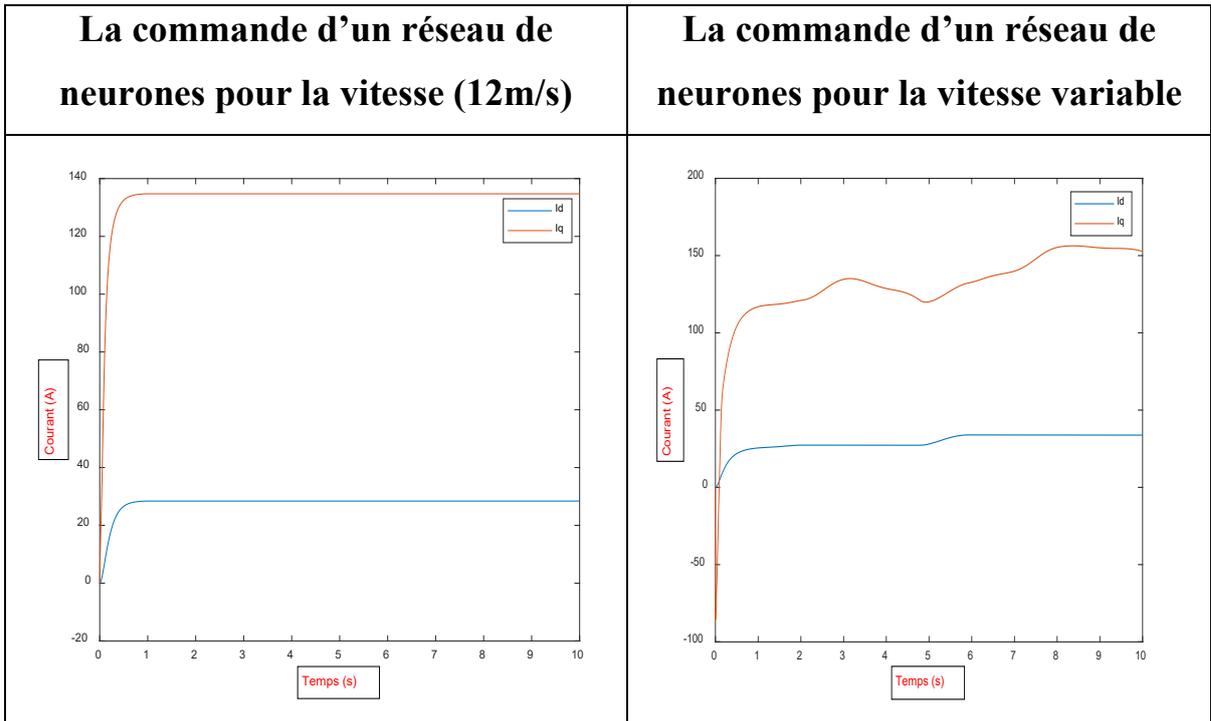
➤ **Par rapport à les composantes  $I_d$  et  $I_q$  au niveau de la commande vectorielle :**



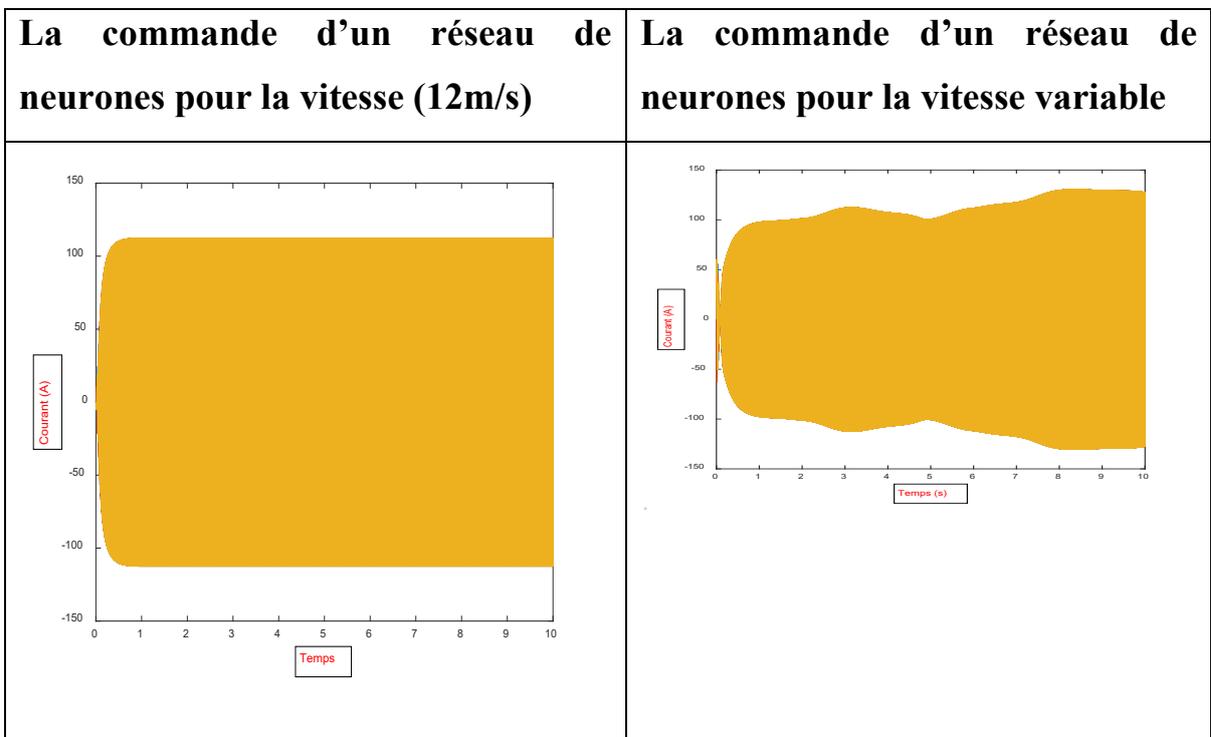
➤ **Par rapport à les composantes  $V_d$  et  $V_q$  au niveau de la GSAP :**

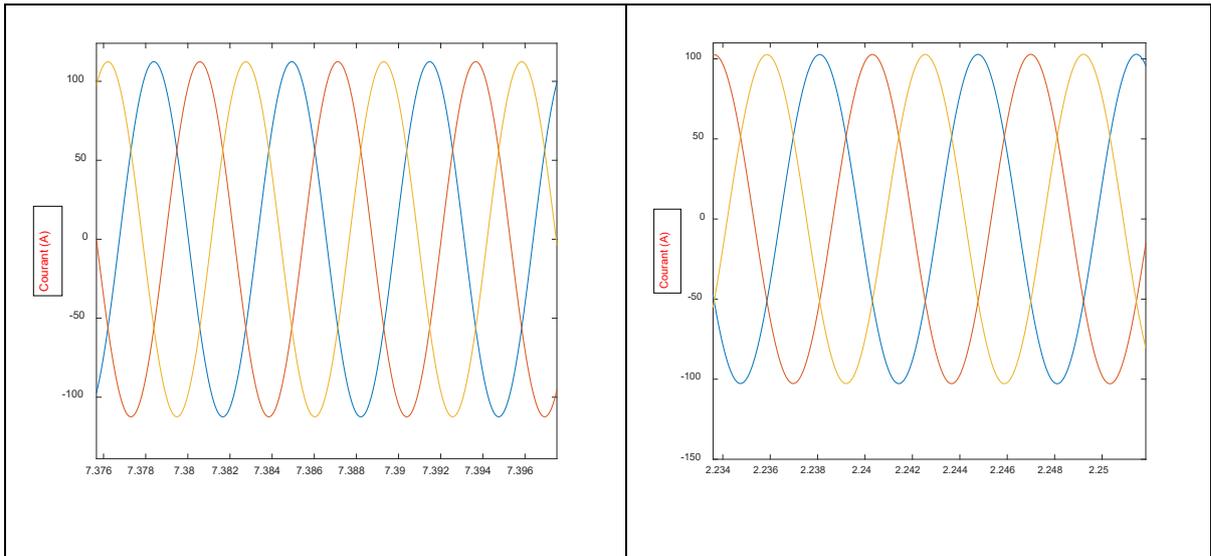


➤ Par rapport à les composantes  $I_d$  et  $I_q$  au niveau de la GSAP :



➤ Par rapport à les courants statoriques  $I_{abc}$  au niveau de la GSAP :

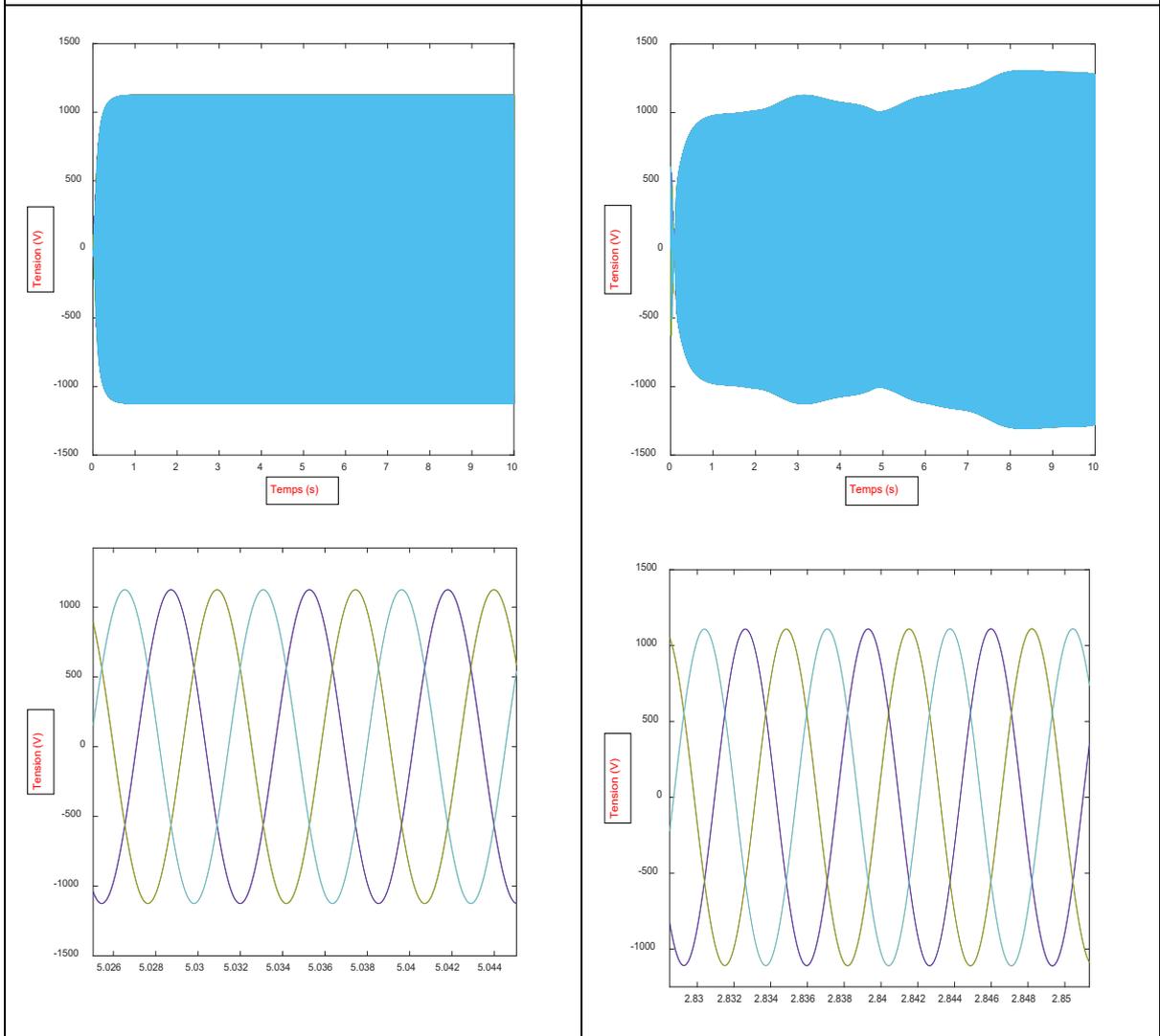




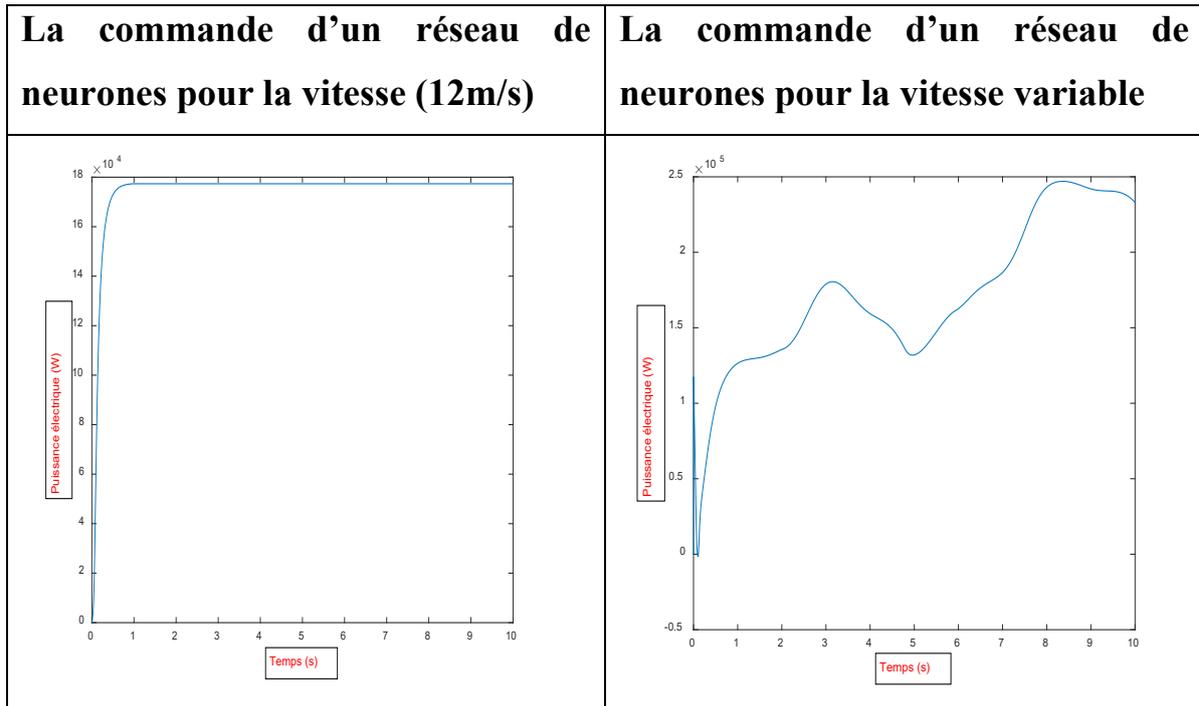
➤ Par rapport à les tensios statoriques  $V_{abc}$  au niveau de la GSAP :

**La commande d'un réseau de neurones pour la vitesse (12m/s)**

**La commande d'un réseau de neurones pour la vitesse variable**



➤ **Par rapport à la puissance électrique :**



#### 4.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé les modèles mathématiques et les commandes appliquées sur les différents éléments du système de conversion d'énergie éolienne. Le GSAP a été commandé par la commande vectorielle pour imposer la vitesse optimale de la commande MPPT de la turbine, et donc imposer le couple optimal afin d'extraire la puissance maximale du vent. Nous avons utilisé pour extraire le couple optimal des différentes commandes " La commande MPPT sans asservissement de vitesse et la commande MPPT avec asservissement par les correcteur suivantes" : le correcteur par mode glissant et l'autre de réseau de neurones où nous avons trouvé que le correcteur de réseau de neurones donne des meilleures performances. (L'erreur, temps de réponse...etc.)

Ensuite, nous avons simulé sous le logiciel Matlab-Simulink, le système global de l'éolienne. Et nous avons remarqué comment cela fonctionne.

*Conclusion  
générale*

## Conclusion Générale :

Lors de notre étude, nous avons appliqué deux commandes à la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), dont l'une d'elles est la commande vectorielle, tandis que les autres sont la commande intelligente par réseaux de neurones artificiels, qui a pour but d'améliorer les performances et la robustesse de la commande vectorielle sur la machine.

En premier lieu, nous avons commencé par modéliser les différents composants de la partie mécanique de l'aérogénérateur, à savoir : la turbine, le multiplicateur de vitesse ainsi que l'arbre de la génératrice, puis nous avons établi le modèle mathématique de la GSAP dans un référentiel biphasé en se basant sur le modèle de Park, simplifiant ainsi la commande de la machine.

En second lieu, nous avons appliqué à la GSAP la commande classique dite vectorielle qui permet d'assurer le découplage entre le flux et le couple de la machine, rendant son fonctionnement semblable à celui de la machine à courant continu à excitation séparée. Après simulation de la commande sur la chaîne de conversion éolienne, on obtient d'assez bons résultats, à l'instar de la vitesse qui suit la forme de la consigne. Il apparaît cependant que le réglage de la vitesse par commande vectorielle manque de robustesse, en raison des variations paramétriques de la machine qui affectent le découplage.

Nous avons donc été amenés, en dernier lieu, à compléter la commande vectorielle par une commande intelligente neuronale qui permet d'obtenir de meilleurs résultats ainsi qu'une meilleure robustesse, prouvant ainsi toute l'efficacité et la validité des réseaux de neurones artificiels utilisés dans notre étude.

Le travail présenté dans ce mémoire ouvre des voies d'améliorations que l'on peut donner comme suit :

- Utilisation d'autres techniques de commande robuste, à savoir : Le réseau de neurone.
- Considération de la non-linéarité du système d'équations de la GSAP, pour une meilleure efficacité de l'approche neuronale.
- Etablissement d'un modèle de GSAP avec une saturation magnétique non négligée

# Bibliographie

- [1] M. BOUAOUD et DJ KHANTOUCH, " étude et simulation d'une chaîne de conversion éolienne ", mémoire d'ingénieur d'état UFAS 2009.
- [2] RABIA MAMMAD « Etude et simulation de la robustesse d'une commande pour éolienne à base de MADA en présence des incertitudes des paramètres et/ou des perturbations présente dans le réseau électrique.
- [3] WWEA, ' Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne'. (Allemagne, 2011).
- [4] M. K. TOUATI, "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau Électrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 15/01/2015.
- [5] DAHBI Abdeldjalil, Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes
- [6] M. T LATRECHE, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif 24 /06 /2012
- [7] A. BOYETTE , contrôle et commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne, thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [8] [www.rncan.gc.ca/penser](http://www.rncan.gc.ca/penser) (Eoliens autonomes, Guide de l'acheteur, Programme d'encouragement aux systèmes d'énergie renouvelables, Ressources naturelles Canada). (mise à jour 23/06/2011).
- [9] M. SIDDO et S. NOUHOU, " Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", mémoire d'ingénieur d'état Ecole Nationale Polytechnique d'Alger 2007
- [10] Chettout abdelhak, Brachouche yacine, Etude et maximisation d'un système éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents

- [11] HADJI Boubakeur Etude d'une machine asynchrone à double alimentation pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF UFAS (ALGERIE) 2010
- [12]- : "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif. 06 /07 /2010.
- [13] ZAKHROUF MOUSAAB, Development of a Neuronal System for Modeling Streamflows of Some Watersheds in Algeria, thèse de doctorat d'université Aboubakr Belkaïd de Tlemcen, 2021
- [14] Melle HARCHE Asma, Commande De Vitesse D'un Actionneur Piézoélectrique Par une Technique Intelligente, Mémoire de Master, université Ferhat Abbas de Setif-, 201
- [15] HADDOUCHE Bilal et MEGAIZ Nassima Jamila, Classification de la crise épileptique par réseau de neurones (LVQ) et ACP, Mémoire de Master, université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2016
- [16] TABBAL KARIMA KAWTHER, Classification neuro génétique du diabète, Mémoire de Master, université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2011
- [17] BENAMAR NASSIMA et ACHOUR NASSIMA, Détection automatique de l'activité épileptique la phase inter-critique dans les enregistrements EEG approche neuronal, Mémoire de Master, université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2015
- [18] M. TOUAFEK Mohamed Yaakoub, Amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques par un contrôle neuro-flou des systèmes FACTS, Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS de SETIF, 2012

- [19] ARKOUB Abderrahim, BENZEMMA Moussa Etude d'une éolienne de petite puissance à base d'une machine synchrone à aimants permanents
- [20] LATRECHE Mohammed Tahar, Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien
- [21] GHEZZOU Massinissa, Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents
- [22] BENCHERIF Bilel, Etude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone à aimants permanents
- [23] Mazouz Fares, Korichi Mohand, Modélisation et commande d'un aérogénérateur synchrone à aimant permanent

Résumé :

L'objectif de notre étude est de développer la commande vectorielle d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) associée à une éolienne, en y ajoutant une commande intelligente à réseaux de neurones artificiels (RNAs).

La commande vectorielle, qui assure le découplage entre le flux et le couple de la machine, utilise généralement, en raison de leur simplicité, des régulateurs des régulateurs (par mode glissement et sans asservissement de vitesse), néanmoins leur efficacité diminue en présence des incertitudes structurées (changements paramétriques) et non structurées (erreurs de modélisation), entraînant ainsi une baisse de l'efficacité de la commande.

Pour résoudre ces problèmes, une commande intelligente par RNAs est appliquée, permettant d'assurer une meilleure performance de la commande vectorielle de la GSAP, en obtenant un plus haut degré d'efficacité ainsi qu'une meilleure robustesse.

Mots clés : Eolienne, Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), Régulateur Proportionnel Intégral (PI), Commande vectorielle, Réseaux de Neurones Artificiels (RNAs).

Abstract : The objective of our study is to develop the vector control of a permanent magnet synchronous generator (PMSG) associated with a wind turbine, by adding artificial neural networks (ANNs). The vector control, which ensures the decoupling between the flux and the torque of the machine, generally uses Sliding mode control and without speed control controllers because of their simplicity. Nevertheless, the efficiency of these controllers decreases in the presence of structured uncertainties (parametric changes) and unstructured ones (modeling errors), causing a decrease in the efficiency of the control.

To solve these problems, an intelligent neural control is applied, for providing a better performance of the vector control of the PMSG, getting a higher degree of efficiency as well as a better robustness.

Keywords : Wind turbine, Permanent magnet synchronous generator (PMSG), PI controllers, Vector control, Artificial Neural Networks (ANNs).

ملخص:

عن طريق إضافة آلية الشبكات، الهدف من دراستنا هو تطوير التحكم الشعاعي لمولد متزامن ذو المغناطيس الدائم (م.م.د) المرتبط بعنفة رياح العصبية الاصطناعية (RNA).

التحكم الشعاعي الذي يقوم بفصل التدفق عن العزم للآلة، عادة ما يستخدم المنظمين (عن طريق وضع الانزلاق وبدون التحكم في السرعة) لبساطتها تنخفض فعالية المنظم النسبي التكاملية هذا في ظل وجود شكوك منظمة (تغيرات برامترية) و أخرى غير منظمة، مما يؤدي إلى انخفاض فعالية التحكم . لتجاوز هذه المشاكل، يتم تطبيق التحكم الذكي بواسطة الشبكات العصبية مما يسمح بأداء أفضل للتحكم الشعاعي للمولد (م.م.د) والحصول على درجة أعلى من الكفاءة بالإضافة إلى متانة أفضل

الكلمات المفتاحية :

عنفة رياح، المولد المتزامن ذو المغناطيس الدائم (م.م.د) المنظم النسبي التكاملية، (PI)، التحكم الشعاعي، الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA).