



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

## MÉMOIRE DE MASTER

*Sciences et Technologies  
Électrotechnique  
Energies Renouvelables*

Réf. : *Entrez la référence du document*

---

*Présenté et soutenu par :*  
**Boushaba Aya**  
**Reguig Malak**

*Le : Click here to enter a date.*

## ***Commande de l'installation éolienne connectée au réseau***

---

*Jury :*

<i>Dr</i>	<i>Souheil SALHI</i>	<i>MCB</i>	<i>Université Mohamed Khider de Biskra</i>	<i>président</i>
<i>Dr</i>	<i>Sabrina ABDEDAIM</i>	<i>Pr</i>	<i>Université Mohamed Khider de Biskra</i>	<i>encadrant</i>
<i>Dr</i>	<i>Ikram BOUSSETTA</i>	<i>MCB</i>	<i>Université Mohamed Khider de Biskra</i>	<i>examinatrice</i>



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de génie électrique

## MÉMOIRE DE MASTER

*Sciences et Technologies  
Électrotechnique  
Energies Renouvelables*

Réf. : *Entrez la référence du document*

---

### ***Commande de l'installation éolienne connectée au réseau***

*Le : .....*

***Présenté par :Avis favorable de l'encadreur :***

- *Boushaba Aya*
- *Reguig Malak*

***Signature Avis favorable du Président du Jury***

***Cachet et signature***

## ملخص:

في هذه الرسالة، نتناول الإمكانيات الوطنية لطاقة الرياح والهيكل المختلفة المستخدمة في نظام الرياح، يغذي شبكة الكهرباء عبر سلسلة كاملة من (PMSG) وتعتمد دراستنا على مولد متزامن ذو مغناطيس دائم المحولات الساكنة. ولهذا، نقترح مخطط تحكم للالة المتزامنة، يتألف من جهاز تيار متعدد/مستمر أول، يليه جهاز على تغير سرعة التوربين تبعاً لسرعة (MPPT) تيار مستمر/متعدد ثان. يعتمد مبدأ تتبع نقطة القدرة القصوى الرياح في حالة التوصيل غير المباشر للمولد بالشبكة. وبالتالي، يتم التحكم بشكل مناسب في الآلة، وعاكس تعديل ، والتوصيل بالشبكة؛ لتحقيق جهد وترددات ثابتة. تؤكد عمليات المحاكاة على برنامج (PWM) عرض النبضة ، المعروضة في نهاية الرسالة، على كفاءة مخطط التحكم، واختيار معلمات الضبط، بالإضافة إلى بنية سلسلة التحويل لتحقيق الأهداف المحددة.

طاقة الرياح تتبع نقطة الطاقة القصوى)، (PMSG)، (MPPT)، (المولد المتزامن المغناطيسي الدائم اتصال الشبكة.

## Résumé :

*Dans ce mémoire nous abordant le potentiel national de l'énergie éolienne et les différentes structures utilisé dans le système éolien ; notre étude est basée sur une Générateur Synchrone à Aimant Permanent (PMSG) débitant dans le réseau de puissance à travers une chaîne complète de convertisseurs statiques. Pour cela, nous proposons un schéma de commande de la machine synchrone, comportant un premier dispositif alternatif/continu suivi d'un second dispositif continu/alternatif. Le principe MPPT (Maximum Power Point Tracking, 'MPPT') repose sur la variation de vitesse de la turbine suivant celle du vent en cas de raccordement indirect de la génératrice avec le réseau. Ainsi la commande convenable de la machine, l'onduleur MLI et le couplage avec le réseau ; afin d'aboutir à une tension et fréquences cohérente. Les simulations sur Matlab-Simulink, présentées en fin de mémoire, confirment une bonne adéquation du schéma de commande, du choix des paramètres de réglage ainsi que l'architecture de la chaîne de conversion aux objectifs assignés.*

*Énergie éolienne, Générateur Synchrone à Aimant Permanent (PMSG), MPPT (Maximum Power Point Tracking), Couplage réseau.*

---

## Abstract :

*In this paper we discuss the national potential of wind energy and the different structures used in the wind system; our study is based on a Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) connected to the power network through a complete chain of static converters. For this purpose, we propose a control structure for the synchronous machine, comprising a first AC / DC device followed by a second DC / AC device. The MPPT (Maximum Power Point Tracking, MPPT) principle is based on the speed variation of the turbine following that of the wind in case of disconnection of the generator with the network. Although the proper control of the machine, the MLI inverter and the coupling with the network; in order to achieve a coherent voltage and frequency. The simulations on Matlab-Simulink, presented at the end of the study, confirm a good fit of the control structure, the choice of the parameters of adjustment and the architecture of the conversion chain to the assigned objectives.*

*Wind energy, Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG), MPPT (Maximum Power Point Tracking), Grid connection.*

## **Remerciement**

*Tout d'abord, Mes louanges à DIEU le Tout Puissant pour m'avoir donné le courage, la Volonté, la patience durant ces années d'étude et que grâce à Lui ce travail a été réalisé.*

*Nous remercions tout d'abord Mme. Abdeddaim Sabrina , ma directrice de mémoire, pour son encadrement, ses conseils avisés, sa disponibilité et sa bienveillance tout au long de ce travail. Son expertise et ses remarques pertinentes ont été essentielles à l'élaboration de ce mémoire.*

*Nous tiens également à remercier l'ensemble des enseignants et intervenants de l'université Mohamed Khider -Biskra- pour la qualité de leur enseignement et pour m'avoir transmis les connaissances nécessaires à la réalisation de ce travail.*

*Nous remercions aussi les membres du jury de m'avoir honoré de leur Présence en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail.*

*Nous tenons enfin à remercier tous ceux qui ont contribué, directement ou indirectement, à la réalisation de ce travail, en toute confidentialité et humilité.*

*Merci à tous*



## Dédicaces

### *Je dédie ce mémoire*

*A mes très chers parents Aek et Tiair Djamila, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au long de mon parcours.*

### *A mes frères et mes sœurs et leurs enfants*

*Sadjoudi , Mayoura, Adouma, Samsoum, Mimi, Nounou .*

*A toute ma famille.*

*A mon bras droit M : « F »*

*A mes très chers amies : Maro , Noussa*

*Enfin, à moi-même, pour avoir cru en ce chemin, malgré les difficultés.*

*Je dédie mon binôme Malak*

AYA

*À mes chers parents Amar et REGUIG Nora, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant tout au long de mon parcours.*

*À mes sœurs (Amira, Hayam ,Amani, Hanine , Saja) et mon frère Baraa , pour leur présence , leurs encouragements et votre amour.*

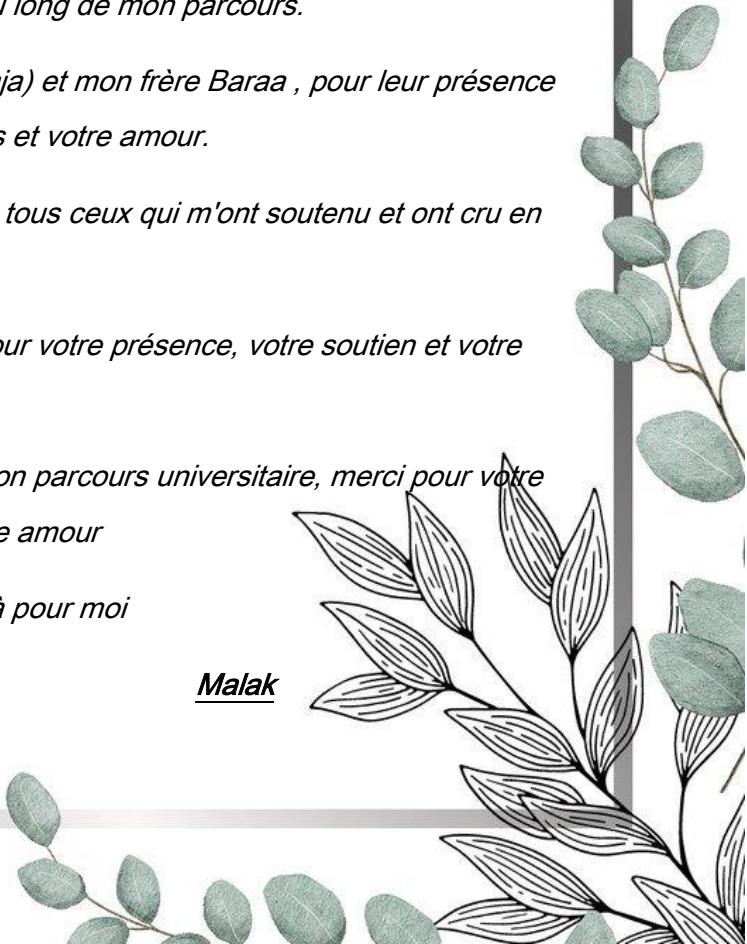
*À toute ma famille, chacun par son nom, merci à tous ceux qui m'ont soutenu et ont cru en moi.*

*À mes cousins (Djihane, Ritadj, Hadjer) merci pour votre présence, votre soutien et votre amour.*

*À mes amis qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours universitaire, merci pour votre soutien et votre amour*

*Merci d'être toujours là pour moi*

Malak



## Tables des matières

**Remerciement**

**Résumé**

**Abstract**

**Liste des tableaux**

**Liste des figures**

**Introduction générale**

1

### **Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne**

<b>I.1.Introduction :</b>	4
<b>I.2.Historique des éoliennes :</b>	4
<b>I.3.Définition de l'énergie éolienne :</b>	7
<b>I .4. Principe de fonctionnement d'une éolienne :</b>	8
<b>I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne:</b>	8
<b>I.6.Les différents types des éoliennes :</b>	9
<b>I.6.1.Principe de fonctionnement de l'éolienne à axe vertical:</b>	9
<b>I.6.2. Les éoliennes à axe horizontal :</b>	11
<b>I.7. L'énergie éolienne dans le monde :</b>	16
<b>I.8. L'énergie éolienne en Algérie :</b>	17
<b>I.9. Applications des éoliennes</b>	19
<b>I.9.1. Les éoliennes connectées aux réseaux :</b>	19
<b>I.9.2.Les systèmes éoliens autonome:</b>	20
<b>I.10. Technologies des éoliennes</b>	21
<b>I.10.1. Les éoliennes à vitesse fixe :</b>	21
<b>I.10.2. Les éoliennes à vitesse variable :</b>	22
<b>I.11.conclusion :</b>	26

### **Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau éolienne**

<b>II.1.Introduction:</b>	28
<b>II.2. caractéristique de la source éolienne :</b>	29
<b>II.2.1.Modélisation de vent :</b>	29
<b>II.3. Modélisation de la chaîne de production de l'énergie éolienne :</b>	31
<b>II.3.1 Modélisation du multiplication:</b>	34
<b>II.3.2 Modèle de l'arbre de transmission :</b>	34
<b>II.4 La génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) :</b>	37
<b>II.4.1. Les avantages et les inconvénients :</b>	38
<b>II.4.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone :</b>	38
<b>II.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent :</b>	39
<b>II.5.1Hypothèses simplificatrices de la GSAP :</b>	39
<b>II.5.2. Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé :</b>	40
<b>II.5.3. Mises en équation électrique et magnétique dans le repère dq :</b>	41
<b>II.6. Modélisation de l'onduleur :</b>	44
<b>II.7. Modélisation de la liaison au réseau :</b>	46
<b>II.7.1 Mode de Synchronisation ( PLL) :</b>	46
<b>II.7.2Modèle du bus continu :</b>	46
<b>II.7.3.Modèle du filtre côté réseau :</b>	47
<b>II.8.Conclusion :</b>	48

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion

<b>III.1. Introduction :</b>	50
<b>III.2. Objectif de la commande de l'installation :</b>	51
<b>III.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne :</b>	52
<b>III.3.1 Zones de fonctionnement de l'éolienne:</b>	52
<b>III.3.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance (ZONE II) :</b>	53
<b>III.4 Commande vectorielle du générateur synchrone à aimants permanents</b>	58
<b>III.4.1 Principe de la commande vectorielle :</b>	58
<b>III.4.2 Commande vectorielle direct par compensation :</b>	59
<b>III.5. Contrôle du convertisseur côté réseau :</b>	60
<b>III.5.1. Régulateur de la tension du bus continu :</b>	64
<b>III.5.2. Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis :</b>	65
<b>III.5.3 Calcule des courants de référence :</b>	67
<b>III.5.4. Synchronisation du courant de l'onduleur avec la tension du réseau :</b>	68
<b>III.6. Conclusion :</b>	68

### Chapitre IV : Résultats des chaines éoliennes connectées au réseau

<b>IV.1 .Introduction :</b>	71
<b>IV .2. Interprétation les résultats de simulation :</b>	72
<b>IV.2.1 Résultats pour une vitesse du vent constante</b>	72
<b>IV.2.1.1 Résultats de l'MPPT avec asservissement de vitesse :</b>	72
<b>IV.2.1.2 Résultats du control vectoriel de la GSAP :</b>	73
<b>IV.2.2 Résultats dans le coté réseaux</b>	75
<b>IV.3. Résultats pour une vitesse du vent variable</b>	77
<b>IV.3.1 Résultats de l'MPPT avec asservissement de vitesse</b>	78
<b>IV.3.1.1 Résultats du control vectoriel de la GSAP</b>	78
<b>IV.3.2 Résultats dans le coté réseaux</b>	80
<b>IV.4. Conclusion :</b>	82
<b>conclusion générale</b>	84
<b>Référence Bibliographique</b>	86
<b>Annexes</b>	

## Liste des figures

<b>Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne</b>	
<b>Figure (I.1): Eolienne de Charles F. Brush en 1887</b>	<b>5</b>
<b>Figure (I.2) :Eolienne de Poul La Cour en 1891</b>	<b>5</b>
<b>Figure (I.3) : Eolienne de Darrieus (1849-1929)</b>	<b>6</b>
<b>Figure (I.4): Eolienne avec turbine Gedser</b>	<b>6</b>
<b>Figure (I.5) :Du moulin à vent à l'éolienne offshore</b>	<b>7</b>
<b>Figure (I.6): Principe de conversion d'énergie éolienne.</b>	<b>8</b>
<b>Figure (I.7) :Exemples de turbines éoliennes à axe vertical : le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.</b>	<b>9</b>
<b>Figure (I.8) :Effet du vent sur un corps creux</b>	<b>10</b>
<b>Figure (I.9):Incidence variable</b>	<b>11</b>
<b>Figure(I.10):Les éoliennes à axe horizontal</b>	<b>12</b>
<b>Figure (I.11) :Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes</b>	<b>13</b>
<b>Figure (I.12) : Composants d'une turbine éolienne à axe horizontale.</b>	<b>14</b>
<b>Figure (I.13) : La ferme éolienne de 10 MW à Kabertène (Adrar).</b>	<b>17</b>
<b>Figure (I.14): Carte annuelle des vents (m/s) à 10 m du sol.</b>	<b>19</b>
<b>Figure (I.15) :Éoliennes connectées au réseau</b>	<b>20</b>
<b>Figure (I . 16) :Système de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe</b>	<b>21</b>
<b>Figure (I.17):Eolienne à base de la génératrice asynchrone double alimenté (MADA)</b>	<b>23</b>
<b>Figure (I.18):Eolienne à base de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)</b>	<b>25</b>
<b>Figure (I.19): Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage</b>	<b>26</b>
<b>Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau éolien</b>	
<b>Figure(II.1) : Système de conversion éolienne à base de la GSAP</b>	<b>28</b>
<b>Figure (II.2) :Spectre de Van Der Hoven.</b>	<b>30</b>
<b>Figure(II.3) : Bloc de simulation de la vitesse du vent.</b>	<b>30</b>
<b>Figure(II.4) : Evolution de profil du vent.</b>	<b>31</b>
<b>Figure (II.5) : Dimensions et puissances des éoliennes.</b>	<b>32</b>

<b>Figure(II.6) : Coefficient Cp et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine.</b>	<b>34</b>
<b>Figure (II.7): Système mécanique de l'éolienne.</b>	<b>35</b>
<b>Figure (II.8) : Modèle simplifié de la turbine.</b>	<b>36</b>
<b>Figure(II.9) : Schéma bloc de la turbine.</b>	<b>37</b>
<b>Figure(II.10) : Principe du générateur synchrone.</b>	<b>39</b>
<b>Figure(II.11) :Passage de système triphasé au système biphasé.</b>	<b>41</b>
<b>Figure (II.12): Schéma électrique du bus continu.</b>	<b>47</b>
<b>Figure (II.13) : Schéma électrique de filtre de liaison au réseau.</b>	<b>47</b>

### **Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion**

<b>Figure(III.1) : Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du vent et de sa vitesse de rotation.</b>	<b>51</b>
<b>Figure (III.2) : Schéma bloc de la commande vectorielle de la GSAP</b>	<b>52</b>
<b>Figure(III.3) :Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur.</b>	<b>52</b>
<b>Figure (III.4) : Caractéristiques puissance-vitesse d'un aérogénérateur à vitesse variable.</b>	<b>53</b>
<b>Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande MPPT avec asservissement de vitesse.</b>	<b>54</b>
<b>Figure(III.6) : Schéma bloc de la commande MPPT sans régulation de vitesse.</b>	<b>57</b>
<b>Figure(III.7 ):Algorithme MPPT P&amp;O conventionnel.</b>	<b>58</b>
<b>Figure (III.8) : Schéma bloc détaillé de la commande du convertisseur côté GSAP.</b>	<b>59</b>
<b>Figure (III.9) : Principe de découplage par compensation</b>	<b>61</b>
<b>Figure (III.10) : Commande des courants id et iq en deux boucles indépendantes.</b>	<b>62</b>
<b>Figure (III.11): Schéma bloc du control du convertisseur coté réseau</b>	<b>64</b>
<b>Figure ( III.12) : Boucle de régulation de la tension de bus continu.</b>	<b>65</b>
<b>Figure(III.13) : Synoptique de la régulation par hystérésis.</b>	<b>67</b>
<b>Figure (III.14) : Schéma bloc d'une PLL conventionnelle.</b>	<b>68</b>

### **Chapitre IV : Résultats de la chaine éolienne connectées au réseau**

<b>figure(IV.1): La vitesse du vent appliquée au système éolien.</b>	<b>72</b>
<b>figure (IV.2): Allures de la vitesse optimale avec la vitesse de rotation de la génératrice</b>	<b>73</b>
<b>Figure (IV.3) : variation de Cp et <math>\lambda</math> pendant la simulation</b>	<b>73</b>

<b>figure (IV.4): Les courants ids et iqs dans la GSAP.</b>	<b>74</b>
<b>Figure (IV.5): Couple électromagnétique (Cem) avec le couple coté turbine (Cg)</b>	<b>75</b>
<b>Figure(IV.6) : la tension de bus continue.</b>	<b>75</b>
<b>Figure(IV.7) : les courants références avec les courants mesurées cotée réseau .</b>	<b>76</b>
<b>Figure (IV.8) : les courants références et mesurées cotée réseau.</b>	<b>77</b>
<b>Figure (IV.9): La vitesse du vent appliquée au système éolien</b>	<b>77</b>
<b>Figure (IV.10): Allures de la vitesse optimale avec la vitesse de rotation de la génératrice</b>	<b>78</b>
<b>Figure (IV.11): Évolution du coefficient de puissance (Cp) et de la vitesse spécifique (<math>\lambda</math>).</b>	<b>79</b>
<b>Figure (IV.12): Les courants ids et iqs dans la GSAP.</b>	<b>79</b>
<b>Figure (IV.13): Couple électromagnétique (Cem) avec le couple coté turbine (Cg)</b>	<b>80</b>
<b>Figure(IV.14) :la tension de bus continue</b>	<b>80</b>
<b>Figure (IV.15) : Les courants mesurés et références cotée réseau</b>	<b>81</b>
<b>Figure(IV.16) : Les courants mesurés et références dans meme courbe</b>	<b>81</b>

## Liste des tableaux:

### Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

<b>Tableau (I.1):Production d'énergie éolienne dans les principaux pays</b>	<b>17</b>
<b>Tableau (I.2): Avantages et inconvénients de l'éolienne à vitesse fixe basée sur la MASC</b>	<b>22</b>
<b>Tableau (I.3) :Avantages et inconvénients de l'éolienne à vitesse variable.</b>	<b>22</b>
<b>Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de la structure MADA</b>	<b>23</b>

**Acronymes**

	<b>Significations</b>
<i>EWEA</i>	<i>The European Wind Energy Association</i>
<i>MW</i>	<i>Mégawatt</i>
<i>GW</i>	<i>Gigawatt</i>
<i>GADA</i>	<i>Générateur asynchrone double alimenté</i>
<i>AC</i>	<i>Courant alternatif</i>
<i>MASC</i>	<i>Machine Asynchrone à Cage</i>
<i>MADA</i>	<i>Machine Asynchrone Double Alimentation</i>
<i>MSAP</i>	<i>Machine synchrone aimant permanent</i>
<i>IGBT</i>	<i>Transistor bipolaire à grille isolée</i>
<i>IGCT</i>	<i>Thyristor à commutation de grille intégrée</i>
<i>MLI</i>	<i>Modulation par largeur d'impulsion</i>
<i>PWM</i>	<i>Modulation de largeur d'impulsion</i>
<i>GE :</i>	<i>General Electric</i>
<i>GSAP</i>	<i>Générateur synchrone aimant permanent</i>
<i>DC</i>	<i>Courant continu</i>
<i>MAS</i>	<i>Machine asynchrone</i>
<i>GSAP</i>	<i>Générateur synchrone à aimants permanents</i>
<i>M.P.P.T</i>	<i>Maximum Power Point tracking</i>
<i>MSAP</i>	<i>Machine synchrone à aimants permanents.</i>
<i>PLL</i>	<i>Phase Locked Loop (verrouillage de phase du réseau).</i>
<i>MLI</i>	<i>Modulation de largeur d'impulsions</i>
<i>PI</i>	<i>Proportionnelle-Intégrale</i>
<i>MPP</i>	<i>Point de Puissance Maximal</i>
<i>P&amp;O</i>	<i>Algorithme 'perturb et observ'.</i>
<i>CPO</i>	<i>Algorithme 'perturb et observ' conventionnel</i>

### *Les symboles :*

**P<sub>n</sub>** : puissance nominale

**λ** : Vitesse spécifique.

**ρ** : La densité du vent en' [Kg/m<sup>3</sup>].

**S** : La surface balayé par les pales de l'éolienne [m<sup>2</sup>].

**Ω** : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne [rad/s]. -

**V** : Vitesse du vent [m/s].

**R** : Longueur d'une pale de la turbine [m].

**V(H)** = vitesse à hauteur **H**

**V(H<sub>r</sub>)** = vitesse mesurée à hauteur de référence **H<sub>r</sub>**

**α** = exposant (souvent entre 0,1 et 0,4 selon la rugosité et la stabilité atmosphérique)

**C<sub>T</sub>** : représente le couple mécanique de la turbine

**C<sub>aer</sub>** : représente le couple mécanique exercé sur l'arbre de la génératrice.

**C<sub>em</sub>** : le couple électromagnétique.

**λ<sub>opt</sub>** : Vitesse relative optimale de l'éolienne

**f** : le coefficient de frottement.

**J** : le moment d'inertie total de la machine.

[**V<sub>a</sub> V<sub>b</sub> V<sub>c</sub>**] : Le vecteur des tensions statoriques.

[**I<sub>a</sub> I<sub>b</sub> I<sub>c</sub>**] : Le vecteur des courants statoriques

[**Φ<sub>1a</sub> Φ<sub>1b</sub> Φ<sub>1c</sub>**] : Le vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

**R<sub>s</sub>** : La résistance d'une phase statorique.

**M<sub>so</sub>** : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques .

**L<sub>so</sub>** : Inductance propre d'une phase statorique

[**L<sub>11</sub> L<sub>12</sub> L<sub>21</sub> L<sub>22</sub>**] : Matrice des inductances statoriques.

[**Φ<sub>f</sub>**] : Flux des aimants permanents.

**Θ** : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

**I<sub>a</sub>** et **I<sub>q</sub>** : sont les courants statoriques dans le repère (dq).

**R<sub>s</sub>** : est la résistance des enroulements statoriques supposées symétriques.

**p** : le nombre de pair de pôles dans la génératrice

$\omega$  : la vitesse de rotation du rotor.

$L_d$  et  $L_q$  : sont les inductances sur l'axe direct (longitudinale) et en quadrature (transversale)

$I_t$  et  $I_m$  sont respectivement le moment d'inertie de la turbine et celui du générateur.

$f_v$  : est le coefficient des frottements visqueux du générateur .

$\Omega_m$  est la vitesse de rotation du générateur.

$I_{ij}$  = Courant passant à l'interrupteur.

$V_{ij}$  = La tension aux bornes de l'interrupteur.

$Reg$  : est le régulateur PI de la boucle de régulation de la vitesse.

$(s)$  : est l'opérateur de Laplace .

$I_{ref}$  ( $i=a, b, c$ ) : représentent les courants de référence issus des circuits de commande des trois bras de l'onduleur

$I_{ondref}$  : est le courant d'entrée du convertisseur triphasé onduleur.

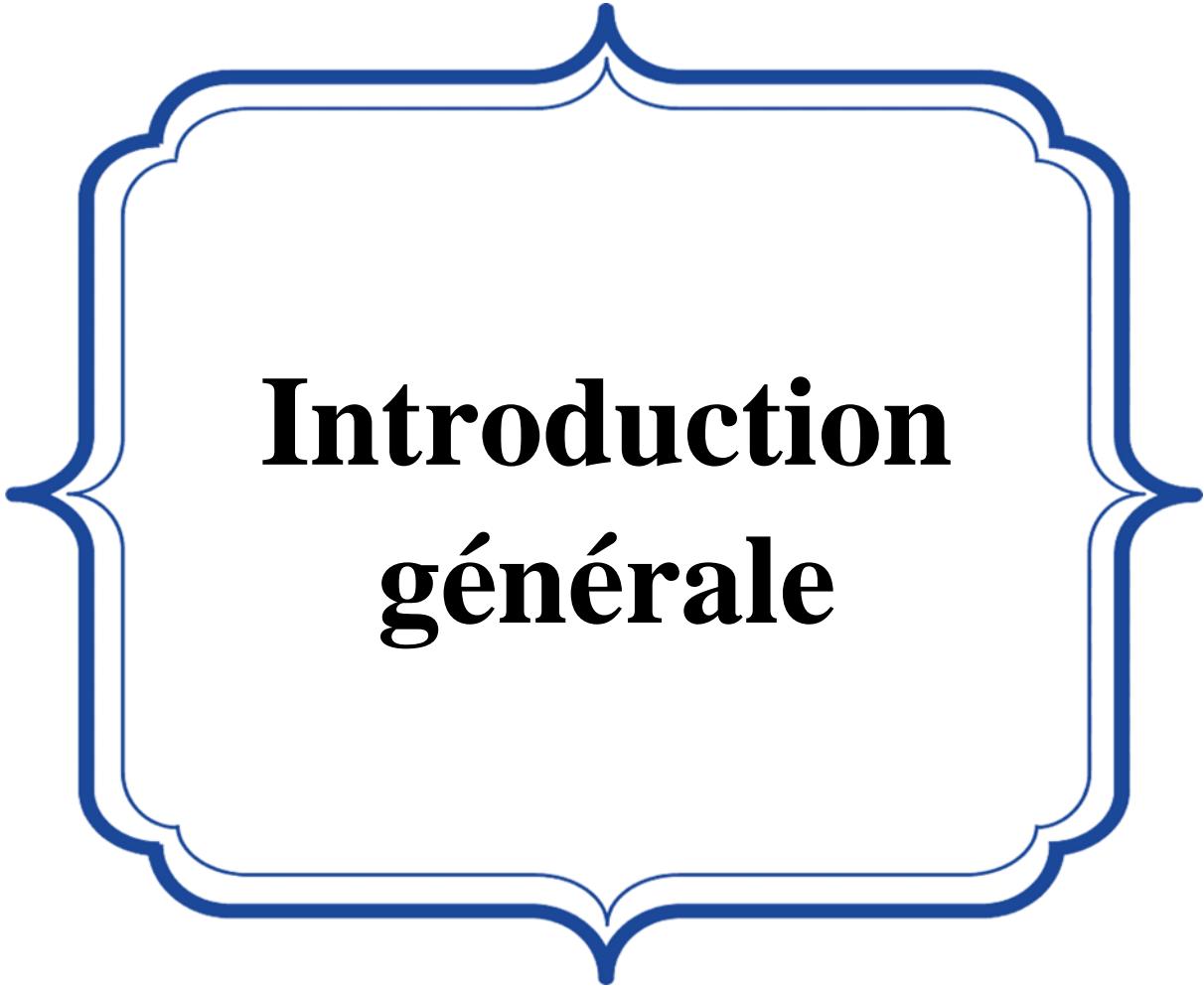
$[V_d, V_q] [I_d, I_q]$  : Les composantes directes et en quadrature de tension et de courant.

$[\Phi_d], [\Phi_q]$  : Les composantes directes et en quadrature du flux

$I_{ij}$  = Courant passant à l'interrupteur.

$V_{ij}$  = La tension aux bornes de l'interrupteur.

$C$  : est la capacité totale du bus continu.



# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction

*La consommation mondiale d'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, à cause de l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus, et plus précisément dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie.*

### I.

*Cette consommation mondiale posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles. Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire. Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leurs est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires. Dans ce contexte général, cette présente étude s'intéresse à la filière éolienne, qui semble être l'une des plus prometteuses. Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable, ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant. Le but de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne, pour ce faire notre choix s'est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. Ce choix est justifié par l'intérêt que la recherche consacre à ce type de structures vu qu'elles sont décrites comme étant les éoliennes de l'avenir. En effet le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétique a fait que l'inconvénient majeur de ces structures à savoir le prix des aimants permanents ne soit plus un obstacle pour construire des éoliennes gigantesques à base de génératrice synchrone à aimants permanents, objectif qui des années avant, était impossible vu l'énorme prix des aimants permanents. Nous avons organisé notre mémoire de la manière suivante :*

*Le premier chapitre, consacré sur l'étude des généralités des systèmes de conversion d'énergie éolienne, Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes, ainsi que les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion. Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne connectée au réseau. Nous commencerons par*

## Introduction générale

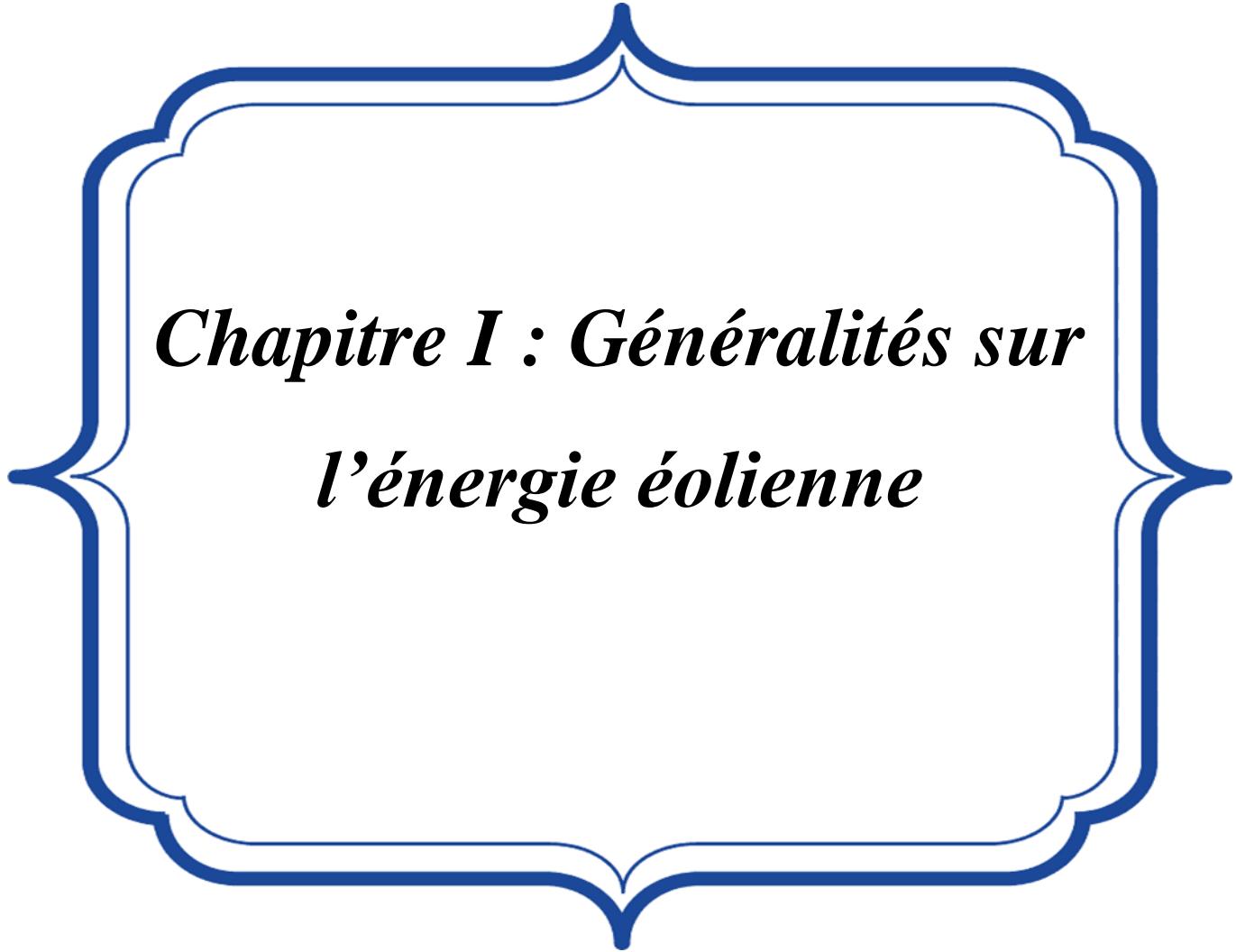
---

*le modèle aérodynamique de la turbine, la génératrice synchrone à aimant permanent, et finalement les convertisseurs de puissance.*

*Le troisième chapitre abordera le développement :*

- *D'un algorithme de contrôle pour le suivi des points de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes d'énergie éolienne.*
- *La commande vectorielle d'une génératrice synchrone à aimant permanent connectée à un redresseur de courant triphasé commandé à commande hystérésis.*
- *L'injection de la puissance électrique extraite aux réseaux via un onduleur est obtenue via une régulation par hystérésis des courants du réseau, en régulant la tension du bus continu.*

*On présente dans le quatrième chapitre, les résultats de simulation numérique illustrant le comportement de la structure de commande de la GSAP lié à une éolienne dont on optimisé la puissance maximale transitée à la charge par un bloc MPPT par régulation de la vitesse de rotation de la machine.*



*Chapitre I : Généralités sur  
l'énergie éolienne*

# Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

## I.1. Introduction

*Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience croissante des enjeux environnementaux et de la nécessité de diversifier les sources d'énergie, l'énergie éolienne s'impose comme une solution renouvelable prometteuse. Utilisant la force du vent pour produire de l'électricité, cette forme d'énergie propre se développe rapidement à l'échelle internationale. Ce chapitre a pour objectif de présenter les fondements de l'énergie éolienne en abordant son évolution historique, sa définition, ainsi que le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs avantages et inconvénients. Il expose également les différents types d'éoliennes existantes, tant à axe vertical qu'à axe horizontal. Une attention particulière est accordée à la situation de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie, ainsi que Applications des éoliennes, aux technologies de vitesse fixe et variable, ainsi qu'aux technologies des éoliennes.*

## I.2. Historique des éoliennes

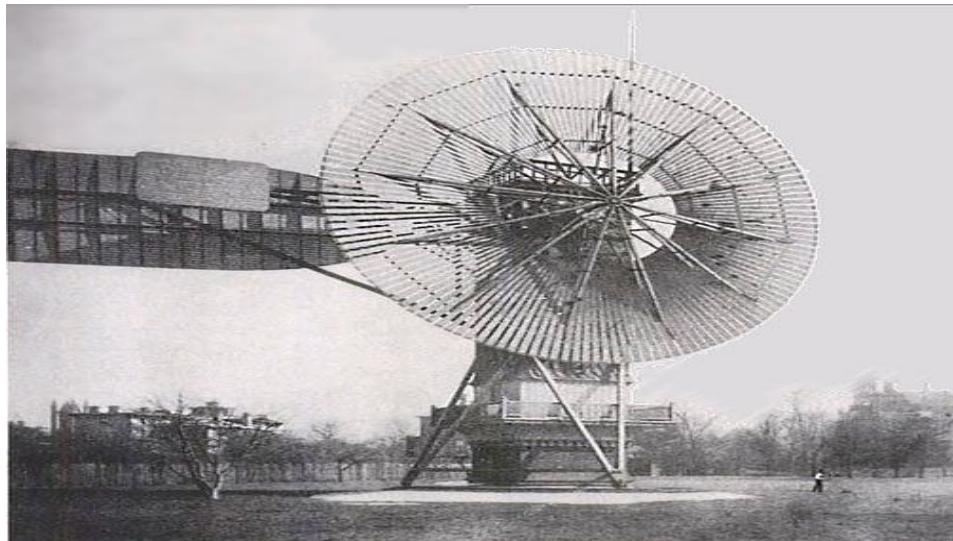
*L'exploitation de l'énergie éolienne remonte à l'Antiquité, notamment avec l'invention des moulins à vent. Au fil des siècles, cette énergie a été utilisée à des fins mécaniques, telles que le pompage de l'eau ou la mouture des céréales [1].*

*Les premiers moulins à vent ont vu le jour au Moyen-Orient vers l'an 600, puis se sont répandus en Égypte avant d'être introduits en Europe, peu avant l'an 1000.*

*La Grande-Bretagne fut le premier pays européen à expérimenter cette technologie, avant qu'elle ne se diffuse progressivement dans les autres pays du continent. Ce n'est qu'au XII<sup>e</sup> siècle que l'usage des moulins à vent s'est généralisé en Europe [2].*

*Les premières éoliennes sont apparues aux États-Unis au XIX<sup>e</sup> siècle et servaient principalement à pomper de l'eau. Elles étaient composées d'un pylône surmonté d'un axe horizontal auquel étaient fixées plusieurs pales. Le vent faisait tourner ces pales, et un mécanisme de bielle-manivelle transformait le mouvement de rotation en un mouvement de va-et-vient, permettant ainsi à un piston d'aspirer l'eau.*

*Entre 1887 et 1888, Charles F. Brush, un ingénieur américain, construisit la première éolienne capable de produire de l'électricité Figure(I.1). Cette machine, d'une puissance de 12 kilowatts, servait à recharger des batteries, fournissant ainsi l'électricité nécessaire à sa maison pendant près de 20 ans. Le rotor de cette éolienne impressionnante comptait 144 pales et mesurait 17 mètres de diamètre.*



**Figure (I.1): Eolienne de Charles F. Brush en 1887**

*En 1891, le Danois Poul La Cour (1846–1908) développe une éolienne plus performante capable de produire 25 kilowatts, grâce à un rotor muni de quatre pales Figure (I.2). Il démontre que les turbines à rotation rapide, dotées de moins de pales, offrent un meilleur rendement énergétique.*

*Cette éolienne marque un tournant, car elle sera la première à être utilisée à une échelle industrielle.*



**Figure (I.2) :Eolienne de Poul La Cour en 1891**

*Au XXe siècle, les éoliennes vont se développer petit à petit. Dans les années 1920, Georges Darrieus (1888-1979) imagine une éolienne à axe vertical Figure(I.3).*



*Figure (I.3) : Eolienne de Darrieus (1849-1929)*

*En 1957, Johannes Juul (1887-1969) crée une turbine appelée Gedser qui sert encore de modèle aux éoliennes actuelles figure (I.4). Les éoliennes utilisant ce type de turbine produisaient jusqu'à 1000 kW [3].*



*Figure (I.4): Eolienne avec turbine Gedser*

*En 2002, le Danemark a mis en service le plus grand parc éolien offshore au monde. L'énergie éolienne a connu une croissance annuelle moyenne de 40 % ces dernières années, principalement en Europe. Elle est aujourd'hui la source d'énergie qui se développe le plus rapidement à l'échelle mondiale.*

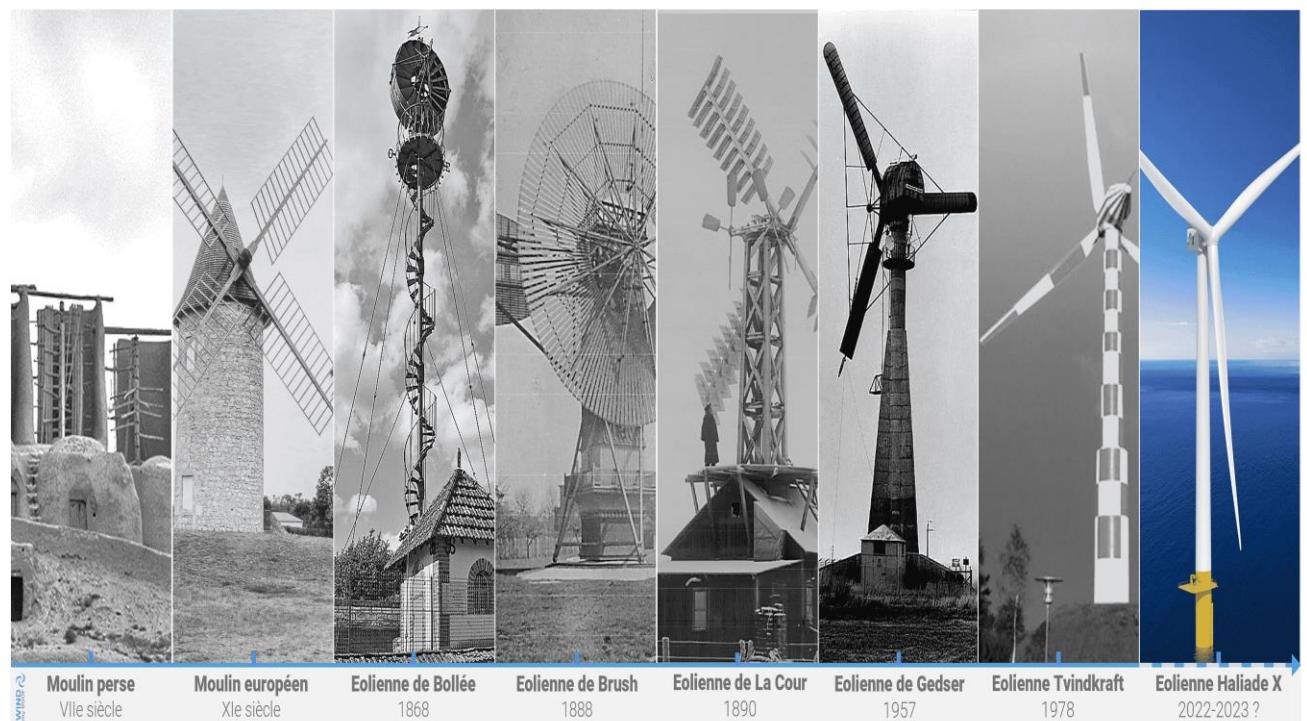
## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

Cette progression contraste fortement avec celle d'autres sources d'énergie plus traditionnelles, comme le nucléaire, dont la croissance n'est que de 1 %. Quant au charbon, sa consommation n'a pratiquement pas augmenté durant les années 1990.

Les perspectives d'avenir pour l'éolien sont tout aussi prometteuses. Selon l'Association européenne de l'énergie éolienne (EWEA), 12 % de l'électricité mondiale pourrait provenir du vent d'ici 2020, et plus de 20 % d'ici 2040.

En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf avec une puissance de 50MW et une autre à Adrar avec une puissance de 10 MW [4].

La figure(I.5) représente les différentes formes et tailles de l'éolienne au fil du temps.



### I.3.Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui dépend du vent. Ce vent est généré par un réchauffement inégal de la surface terrestre par le soleil, entraînant des zones de températures et de pressions atmosphériques différentes à travers le globe. Ces variations de pression provoquent des mouvements d'air, que l'on appelle le vent. L'énergie du vent peut être utilisée pour produire de l'électricité à l'aide d'éoliennes, également appelées aérogénérateurs. Une éolienne est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique

# Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

du vent en énergie mécanique grâce à un rotor, puis en énergie électrique à l'aide d'une génératrice, par l'intermédiaire d'un arbre de transmission [5].

## I.4. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Les éoliennes permettent de transformer l'énergie du vent en électricité. Cette conversion s'effectue en deux étapes principales :

**Première étape** : la turbine capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique.

**Deuxième étape** : cette énergie mécanique est transmise à une génératrice qui la transforme en énergie électrique, ensuite injectée dans le réseau. Ainsi, une conversion et une transmission continues de l'énergie sont nécessaires, car le seul stockage possible repose sur l'inertie, ce qui implique une accélération de la turbine [3]. Ce fonctionnement général est illustré par la figure (I.6)

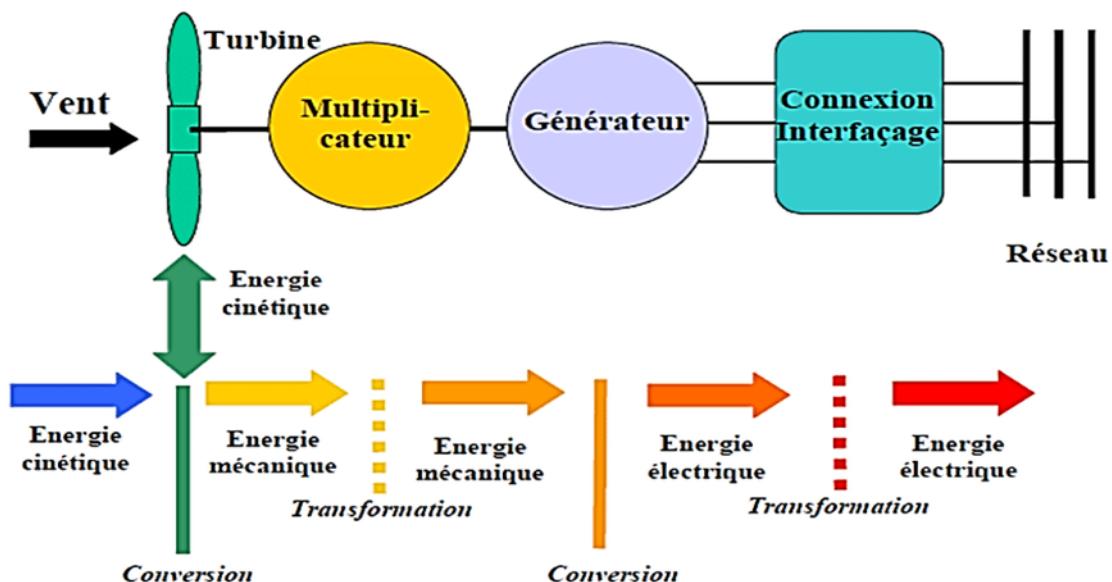


Figure (I.6): Principe de conversion d'énergie éolienne.

## I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

### I.5.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une source renouvelable, ce qui signifie qu'à la différence des énergies fossiles, elle restera accessible pour les générations futures.
- Son exploitation n'est pas continue, car les éoliennes peuvent être arrêtées facilement selon les besoins ou les conditions.
- Il s'agit d'une énergie propre, respectueuse de l'environnement.
- Les installations éoliennes peuvent être démantelées sans difficulté, ne laissant aucune trace durable sur le site. De plus, l'énergie éolienne présente des avantages économiques indéniables.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

- *Elle constitue une ressource locale, permettant de répondre aux besoins énergétiques proches du lieu de production, ce qui réduit considérablement les pertes liées au transport de l'électricité sur de longues distances.*

### I.5.2. Inconvénients

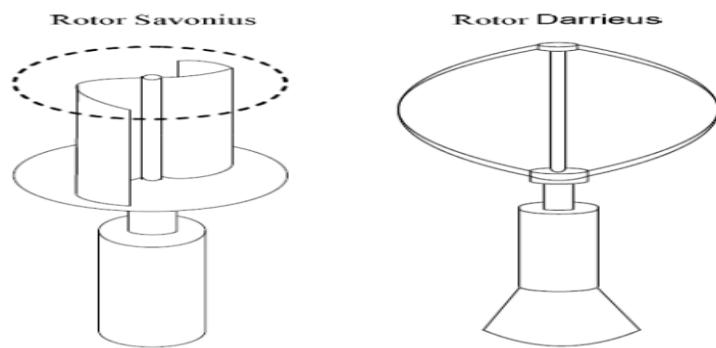
- *Le caractère aléatoire du vent affecte la stabilité et la qualité de l'électricité produite, ce qui constitue un défi pour l'intégration au réseau électrique.*
- *Le coût de production de l'énergie éolienne demeure relativement élevé, notamment sur les sites où le vent est peu favorable.*
- *Le bruit constitue un inconvénient, principalement généré par le multiplicateur mécanique, bien que ce problème tende à diminuer avec le développement des éoliennes à entraînement direct. [6]*

## I.6. Différents types des éoliennes

*Les éoliennes sont classées en fonction de l'orientation de l'axe sur lequel est fixée l'hélice. On distingue principalement deux grandes catégories : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.*

### I.6.1. Principe de fonctionnement de l'éolienne à axe vertical

*Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures mises au point pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été expérimentées, mais seules deux d'entre elles ont atteint le stade de l'industrialisation : le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus Figure(I.7) [6].*



**Figure (I.7) : Exemples de turbines éoliennes à axe vertical : le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus.**

## 1.6.1.1. Principes de l'éolienne à axe vertical

Ce type d'éolienne (à axe vertical) peut fonctionner selon deux principes : la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

### A. Traînée différentielle

Ce principe est similaire à celui d'un anémomètre. Le vent exerce des forces de différentes intensités sur les deux faces d'un corps creux. Cette différence de pression génère un couple moteur, mettant l'éolienne en mouvement Figure (I.8).

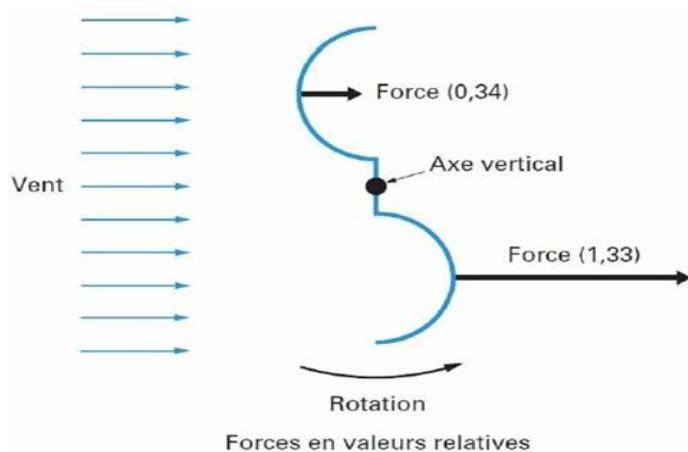


Figure (I.8) : Effet du vent sur un corps creux [7].

### B. Variation cyclique d'incidence

Lorsqu'un profil aérodynamique est placé dans un flux d'air sous des angles d'incidence variables, il subit des forces de directions et d'intensités différentes, ce qui crée également un couple moteur figure (I.9). Ce principe, breveté au début des années 1930 par l'ingénieur français Georges Darrieus, est à l'origine des rotors portant son nom. Ces rotors peuvent adopter diverses formes : cylindrique, tronconique, parabolique, etc. [7]:

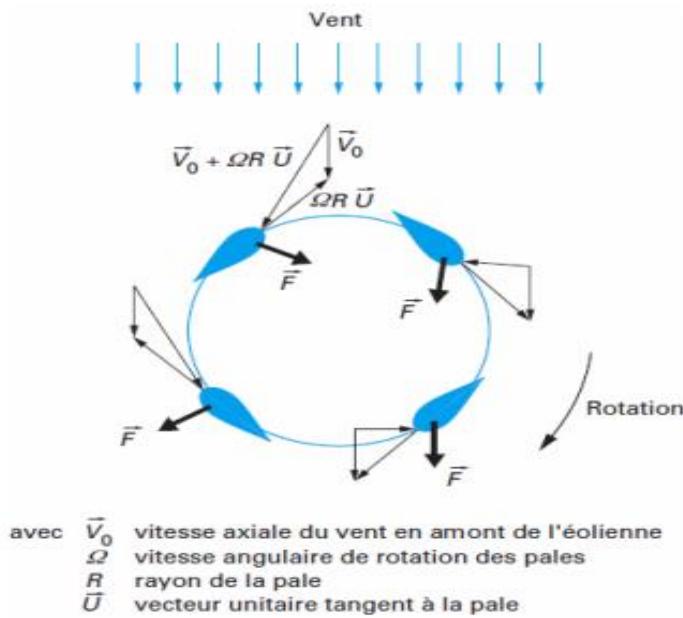


Figure (I.9):Incidence variable[7].

### I.6.1.2. Avantages de la structure à axe vertical

- Leur conception permet d'installer au sol le multiplicateur, la génératrice ainsi que les dispositifs de commande, facilitant ainsi l'entretien.
- Grâce à leur axe vertical symétrique, elles peuvent capter le vent quelle que soit sa direction, sans avoir besoin d'orienter le rotor.
- Elles sont simples à concevoir, robustes et requièrent peu de maintenance.

### I.6.1.3. Inconvénients des éoliennes à axe vertical

- Leur rendement est généralement inférieur à celui des éoliennes à axe horizontal.
- Placées à faible hauteur, elles exploitent un vent moins puissant, atténué par les obstacles au niveau du sol.
- Leur installation nécessite des câbles de soutien (tirants) qui doivent passer au-dessus des pales, ce qui entraîne une occupation au sol plus importante que celle d'une éolienne sur tour [6].

### I.6.2. éoliennes à axe horizontal

Il s'agit de la configuration la plus répandue en raison de sa faible emprise au sol et de son excellent rendement énergétique. Ces éoliennes s'inspirent directement de la technologie des anciens moulins à vent. Elles sont équipées de pales profilées de manière aérodynamique,

# Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

*similaires aux ailes d'un avion. Toutefois, dans ce cas, la portance générée n'est pas utilisée pour le vol, mais pour produire un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor.*

*Le nombre de pales varie généralement de 1 à 3. Le rotor à trois pales est le plus courant, car il offre un bon compromis entre efficacité énergétique (coefficient de puissance), coût de fabrication et vitesse de rotation Figure (I.10)[8].*



*Figure(I.10):Les éoliennes à axe horizontal*

## **I.6.2.1. Familles d'éoliennes à axe horizontal**

*Il existe deux familles d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes à marche lente et les Eoliennes à marche rapide.*

### **A. éoliennes à marche lente**

*Ces éoliennes sont équipées d'un grand nombre de pales, généralement entre 20 et 40. Leur forte inertie limite le diamètre du rotor à environ 8 mètres. Leur coefficient de puissance atteint rapidement un maximum lors de la montée en vitesse, mais diminue tout aussi rapidement par la suite. Ce type d'éolienne, bien que peu performant en raison d'une faible vitesse en bout de pale, a été largement utilisé aux États-Unis dès les années 1870.*

### **B. éoliennes à marche rapide**

*Bien plus courantes, les éoliennes à marche rapide sont aujourd'hui principalement destinées à la production d'électricité. Elles disposent généralement de 1 à 3 pales, fixes ou orientables, permettant de réguler la vitesse de rotation. Les pales peuvent mesurer jusqu'à 60 mètres de long pour des éoliennes de plusieurs mégawatts. Leur coefficient de puissance*

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

est élevé et décroît lentement avec l'augmentation de la vitesse du vent. Elles ne fonctionnent généralement pas en dessous de 3 m/s de vent.

Les modèles à une ou deux pales présentent l'avantage d'être plus légers, mais produisent davantage de vibrations mécaniques et affichent un rendement légèrement inférieur. De plus, leur aspect visuel est souvent jugé moins esthétique. C'est pourquoi environ 80 % des fabricants choisissent de concevoir des éoliennes tripales. [7].

La figure (I.11) présente le rendement aérodynamique ou le coefficient de puissance ( $C_p$ ) en fonction de la vitesse spécifique ( $\lambda$ ). Selon le type de la turbine utilisée, le  $C_p$  peut atteindre différentes valeurs, cependant il ne peut dépasser la valeur maximale absolue représentant la limite de BETZ de 0.59 (rendement théorique).

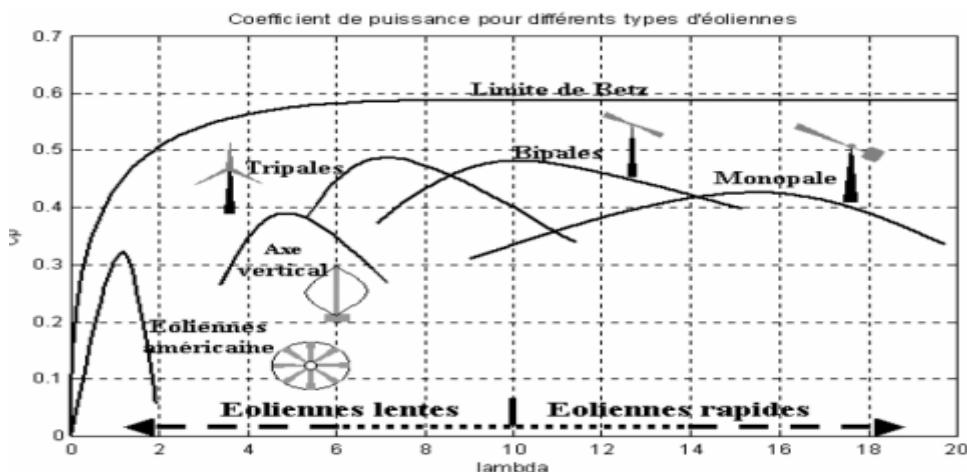


Figure (I.11) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

### Constitution de l'éolienne axe horizontale

Une éolienne à axe horizontale se compose essentiellement des éléments ci-après :

Figure(I.12)

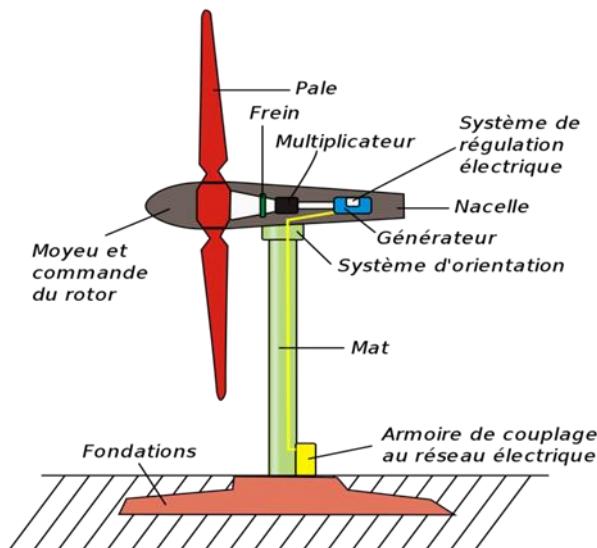


Figure (I.12) : Composants d'une turbine éolienne à axe horizontale.

- **Tour (mât)**

Le mât permet d'installer le rotor à une hauteur suffisante pour garantir son bon fonctionnement, ou à une altitude où le vent est plus fort et plus régulier qu'au niveau du sol. Il abrite généralement certains composants électriques et électroniques tels que le modulateur, les systèmes de commande, le multiplicateur ou encore le générateur. Le matériau utilisé pour fabriquer le mât est : acier, béton (ou béton-armé), mât hybrides (béton + acier). La conception du mât varie en fonction des dimensions de l'éolienne et de l'impact visuel souhaité sur le paysage.

- **Rotor**

Le rotor est la partie rotative de l'éolienne, installée en hauteur pour capter des vents plus forts et réguliers. Il est composé de plusieurs pales — généralement trois — en matériaux composites. Ces pales, d'une longueur moyenne de 25 à 60 mètres, sont mises en mouvement par l'énergie cinétique du vent et tournent à une vitesse comprise entre 5 et 25 tours par minute. Le rotor est relié, directement ou via un multiplicateur de vitesse à engrenages, au système mécanique qui utilise cette énergie (comme une pompe ou un générateur électrique).

- **Nacelle**

# Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

*Installée au sommet de la tour, la nacelle est un carter qui abrite, protège et relie les principaux éléments mécaniques permettant de transmettre l'énergie du rotor au générateur. Elle contient notamment les arbres (lent et rapide), les roulements, le multiplicateur de vitesse et les systèmes de couplage au générateur électrique.*

- **Moyeu**

*Le moyeu est la pièce centrale à laquelle les pales sont fixées. Lorsque les pales sont à pas variable, le moyeu intègre un mécanisme permettant de modifier l'angle d'attaque de manière synchrone. Même pour des pales fixes, un système d'ajustement est généralement prévu afin de corriger leur position lors de l'installation.*

- **Générateur électrique**

*Il transforme l'énergie mécanique en électricité. On peut distinguer deux types de couplage: couplage direct dont l'hélice est directement reliée à l'axe du générateur et couplage indirect où un multiplicateur de vitesse est placé entre le rotor et le générateur.*

- **Système d'orientation**

*Un moteur électrique (pour les grandes éoliennes) oriente le rotor face au vent, quelle que soit sa direction. L'électricité produite est transférée de la partie orientable à la partie fixe (solidaire du mât) via un collecteur tournant ou un câble souple, qu'il faut parfois détorsader.*

- **Arbres de transmission**

*Arbre lent : relie le rotor à la boîte de vitesses.*

*Arbre rapide : relie la boîte de vitesses au générateur.*

*Ces arbres doivent résister à des efforts mécaniques importants. Dans les éoliennes sans boîte de vitesses (synchrone), un seul arbre est utilisé.*

- **Gouvernail**

*Utilisé dans les petites éoliennes fonctionnant "au vent", il oriente automatiquement l'hélice face à la direction du vent. Il peut aussi être remplacé par un moteur couplé à une girouette pour assurer le même rôle.*

- **Groupe hydraulique**

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

*Il assure l'orientation des pales et de la nacelle, et commande également les freins aérodynamiques.*

- ***Frein à disque***

*Monté sur l'arbre rapide, ce frein permet d'immobiliser le rotor lors des opérations de maintenance ou en cas de défaillance du système de freinage principal.*

- ***L'armoire de couplage***

*Elle transforme l'énergie produite par l'éolienne pour l'adapter aux caractéristiques du réseau de distribution électrique ou pour charger un système de stockage.*

- ***Girouette et l'anémomètre***

*Installés sur la nacelle, ces instruments mesurent la direction et la vitesse du vent. Ils fournissent les données nécessaires pour orienter automatiquement l'éolienne.*

### ***I.6.2.2. Avantages de la structure à axe horizontal***

- *Elle occupe très peu d'espace au sol comparée aux éoliennes à axe vertical.*
- *En captant le vent en altitude, elle bénéficie de courants plus puissants et plus constants.*
- *Le générateur et les systèmes de commande sont installés dans la nacelle, située au sommet de la tour. [9]*

### ***I.6.2.3. Inconvénients de la structure à axe horizontal***

- *Son coût de construction est élevé.*
- *La position en hauteur des composants rend les interventions techniques plus complexes en cas de panne.*
- *Malgré ces inconvénients, l'éolienne à axe horizontal reste aujourd'hui la plus largement utilisée. Les éoliennes à axe vertical, quant à elles, sont encore présentes, notamment dans les zones isolées pour la production locale d'électricité [10].*

## ***I.7. L'énergie éolienne dans le monde***

*Le rapport mondial sur l'énergie éolienne 2025 comprend des données provenant de toutes les régions du monde. La croissance de l'année dernière – 109 GW de nouvelles éoliennes terrestres et 8 GW d'éoliennes offshore – porte la capacité cumulée mondiale*

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

d'énergie éolienne à 1 136 GW, répartie sur tous les continents, avec 55 pays ayant installé des éoliennes l'année dernière.

En 2024, la Chine a ouvert la voie aux nouvelles installations devant les États-Unis, suivie respectivement par l'Allemagne et l'Inde, le Brésil complétant le Top 5. Ces cinq mêmes marchés constituent désormais le top 5 des installations totales, à la fin de 2024, le Brésil dépassant l'Espagne. [11]

Le tableau (I.1) ci-dessous représente Les principaux pays producteurs d'énergie éolienne.

Les pays	Quantité de production
Chine	79,8 GW
États-Unis	4,1 GW
Allemagne	4,0 GW
Inde	3,4 GW
Brésil	3,3 GW

### I.8. L'énergie éolienne en Algérie

L'énergie éolienne en Algérie reste, à ce jour, peu exploitée, malgré l'importante richesse du pays en ressources éoliennes. Ce potentiel représente un avantage stratégique pouvant permettre à l'Algérie de devenir un acteur majeur dans la production et la fourniture d'électricité.

Un premier pas a été franchi en 2010, lorsque le groupe Sonelgaz a lancé la construction de la première ferme éolienne du pays, située à Kabertène, dans la région d'AdrarFigure (I.13). D'une puissance totale de 10 MW, cette installation comprend douze éoliennes de 0,85 MW chacune. La mise en service de cette ferme a été effective en 2014.



Figure (I.13) : La ferme éolienne de 10 MW à Kabertène (Adrar).

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

---

*La ferme éolienne d'Adrar, première installation de ce type en Algérie, est implantée sur un site de 30 hectares à Kabertène, à 72 kilomètres au nord de la wilaya d'Adrar. Elle dispose d'une capacité totale de 10,2 MW, répartie sur 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 850 kW. Six d'entre elles ont été mises en service dès juin 2014. Les turbines installées, de type « G52/850/50 60Hz », sont fournies par le fabricant espagnol GAMESA et équipées de générateurs asynchrones à double alimentation (GADA).*

*Ce projet, dont les travaux ont débuté en 2011, fait partie de la phase pilote du programme national de développement des énergies renouvelables. Ce programme vise l'installation de 22 GW de capacité à partir de sources renouvelables à l'horizon 2030.*

*Dans une optique de valorisation des compétences locales, le projet a été attribué à un consortium algéro-français (CEGELEC), avec la participation des entreprises nationales ETTERKIB et INERGA (filiales du groupe Sonelgaz), chargées respectivement des travaux de génie civil et du montage des installations. Cette démarche traduit la volonté stratégique de l'Algérie de renforcer l'intégration industrielle nationale et de maîtriser les technologies propres.*

*Le choix du site de Kabertène, situé dans la commune de Tsabit, résulte d'une étude cartographique identifiant les régions à fort potentiel éolien en Algérie. Cette étude a permis de retenir deux zones prioritaires, dont celle d'Adrar. La wilaya d'Adrar devrait également accueillir huit nouvelles centrales électriques fonctionnant à partir d'énergies renouvelables, pour une capacité totale excédant 270 MW [12].*

*Le potentiel éolien algérien varie selon les régions. Au nord, la vitesse moyenne du vent oscille entre 1 et 4 m/s, avec quelques microclimats favorables autour d'Oran, Annaba, sur les Hauts Plateaux et à Biskra, rendant ces zones adaptées au pompage de l'eau. Dans le sud, notamment au sud-ouest et dans la région d'Adrar, les vitesses moyennes dépassent fréquemment les 4 m/s et atteignent plus de 6 m/s, ce qui en fait des zones privilégiées pour l'exploitation éolienne à grande échelle. La figure (I.14) présente la cartographie des vents en Algérie [9].*

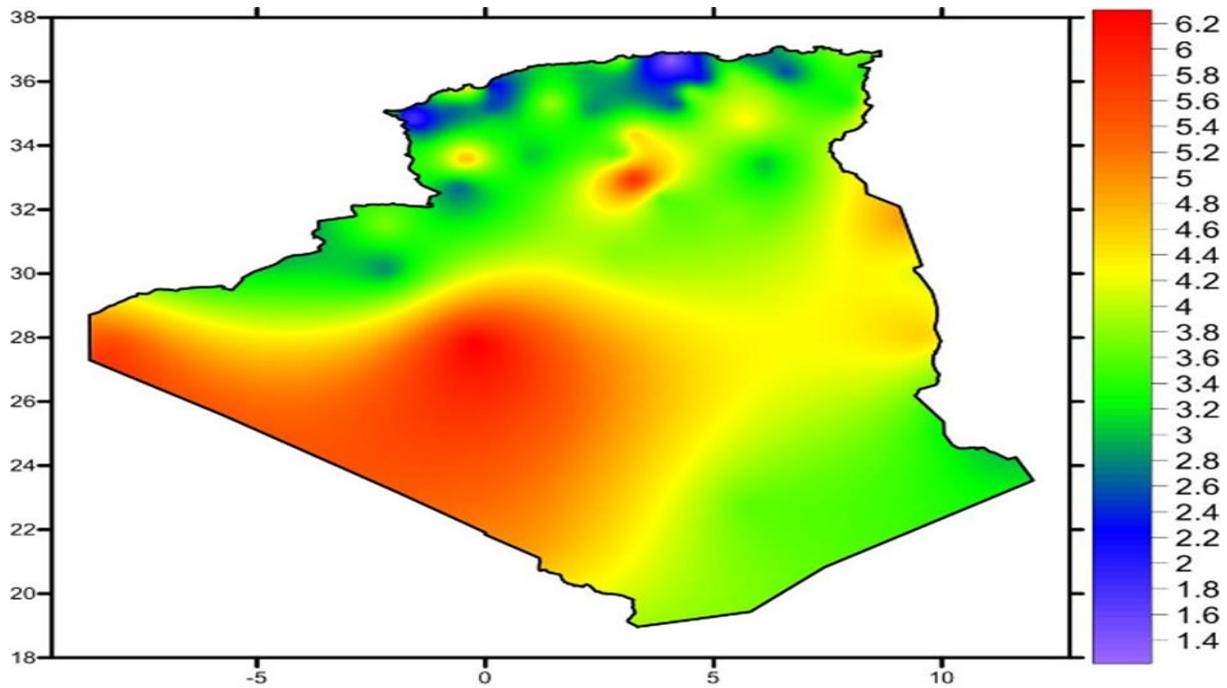


Figure (I.14): Carte annuelle des vents (m/s) à 10 m du sol.

## I.9. Applications des éoliennes

Les éoliennes peuvent être utilisées aussi bien dans des systèmes raccordés au réseau électrique que dans des systèmes autonomes. Les éoliennes de moyenne et grande puissance sont généralement destinées à une connexion au réseau. L'un des principaux avantages de cette configuration est l'absence de stockage d'énergie, puisque le réseau joue le rôle de tampon.

En revanche, les petites éoliennes sont souvent utilisées hors réseau, notamment pour alimenter des résidences isolées, des fermes, des relais de télécommunication, ou encore pour le pompage d'eau dans les champs. Elles peuvent également fournir de l'électricité à des installations spécifiques comme des phares, des balises ou des voiliers.

Cependant, l'intermittence du vent entraîne des variations rapides de la production d'électricité, souvent imprévisibles. Pour garantir une alimentation stable, les systèmes hors réseau combinent généralement les éoliennes à d'autres sources d'énergie ou de stockage, comme des batteries, des générateurs diesel ou des panneaux photovoltaïques [13].

### I.9.1. éoliennes connectées aux réseaux

Le raccordement des éoliennes au réseau électrique constitue une prouesse technique où chaque composant joue un rôle précis et efficace. Tout débute à la source : les éoliennes captent l'énergie cinétique du vent pour la convertir en électricité.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

*Mais comment cette électricité parcourt-elle le chemin depuis les nacelles jusqu'aux foyers ? Tout commence dans l'éolienne, où un premier transformateur élève la tension produite par la génératrice (690 V) à une tension intermédiaire de 20 kV. Cette élévation permet de limiter les pertes lors du transport de l'électricité via un réseau souterrain moyen tension, reliant les éoliennes entre elles et au poste de transformation. Ce choix technologique optimise le rendement tout en préservant l'environnement visuel et naturel. L'électricité poursuit ensuite son parcours vers un poste source, d'où elle sera injectée dans le réseau de transport pour alimenter les zones de consommation. Ainsi se déroule, étape par étape, le processus de raccordement d'un parc éolien au réseau électrique Figure (I.15)[14].*

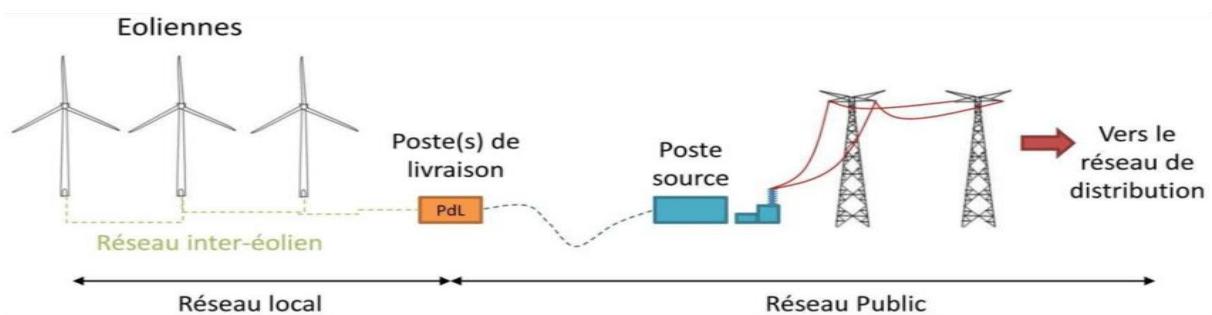


Figure (I.15) :Éoliennes connectées au réseau

### I.9.2. systèmes éoliens autonome

*Les petites éoliennes sont souvent utilisées hors réseau, notamment pour alimenter en électricité des îles, résidences isolées, des fermes, des relais de télécommunication, ou encore pour le pompage d'eau dans les champs. Elles peuvent également fournir de l'électricité à des installations spécifiques comme des phares, des balises ou des voiliers. Dans ce type de configuration, on utilise généralement des systèmes de stockage d'énergie. Le plus courant repose sur des batteries, dont la gestion nécessite un contrôleur de charge. Ce dernier a pour fonction principale de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes, qui pourraient les endommager. Pour alimenter des équipements fonctionnant en courant alternatif (AC), un onduleur est aussi requis. Cependant, l'intermittence du vent entraîne des variations rapides de la production d'électricité, souvent imprévisibles. Pour garantir une alimentation stable, les systèmes hors réseau combinent généralement les éoliennes à d'autres sources d'énergie ou de stockage, comme des batteries, des générateurs diesel ou des panneaux photovoltaïques [13].*

## 1.10. Technologies des éoliennes

### I.10.1.éoliennes à vitesse fixe

Conformément au concept du modèle danois de turbines éoliennes, qui consiste à connecter le générateur directement au réseau via un transformateur, l'énergie du vent est transformée en énergie électrique à l'aide d'un générateur asynchrone à cage d'écureuil directement connecté au réseau électrique triphasé. Dans cette configuration, la vitesse de rotation lente des pales de la turbine est transmise à la génératrice par l'intermédiaire d'une boîte de vitesses à rapport fixe.

Cette boîte de vitesses est requise pour adapter la vitesse de rotation de l'arbre principal de la turbine à celle de l'arbre secondaire connecté directement à la génératrice, qui tourne à une vitesse établie par la fréquence du réseau. En raison de la nature fluctuante de la vitesse du vent, qui est toujours différente de la vitesse de fonctionnement de la génératrice, celle-ci tourne dans une plage de variation très étroite autour de sa vitesse nominale. C'est la raison pour laquelle ce type d'éolienne est connu sous le nom de turbine à vitesse fixe.

Les systèmes à

vitesse fixe présentent l'avantage d'être simples et peu coûteux. Cependant, ils ont l'inconvénient de nécessiter de la puissance réactive pour les générateurs asynchrones à cage d'écureuil, qui leur est fournie par des condensateurs de compensation.

Cette configuration est principalement utilisée pour les parcs éoliens de grande puissance, de l'ordre de plusieurs mégawatts pour chaque turbine. Cependant, elle est de plus en plus abandonnée en raison des inconvénients qu'elle présente [15]. Figure (I.16)

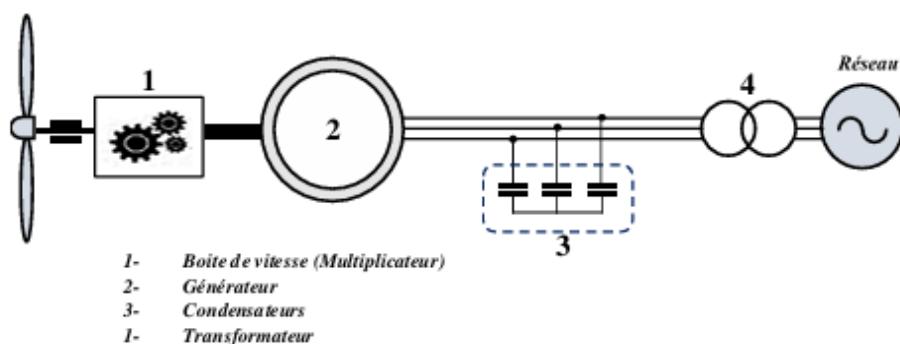


Figure (I . 16) :Système de conversion d'énergie éolienne à vitesse fixe[15].

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

*Le tableau (I.2) ci-dessous représente les avantages et inconvénients de l'éolienne à vitesse fixe basée sur la MASC :*

<i>Les avantages</i>	<i>Les inconvénients</i>
<ul style="list-style-type: none"><li>➤ <i>Machine standard</i></li><li>➤ <i>Robuste</i></li><li>➤ <i>Faible coût</i></li><li>➤ <i>Pas d'EP pour l'interfaçage</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ <i>Puissance extraite non optimisée</i></li><li>➤ <i>Maintenance boîte de vitesse</i></li><li>➤ <i>Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur</i></li><li>➤ <i>Magnétisation de a machine non gérée</i></li></ul>

### **I.10.2.éoliennes à vitesse variable**

*Le terme "vitesse variable" désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. Actuellement, ces éoliennes sont les plus utilisées dans l'industrie en raison de leur aptitude à maximiser l'énergie disponible dans le vent, tout comme leurs homologues à vitesse fixe. En fait, les éoliennes à vitesse variable ont démontré qu'elles peuvent capturer entre 8 et 15 % de puissance en plus que les machines à vitesse constante.*

*Parmi les éoliennes à vitesse variable, on distingue les systèmes en ligne directe à générateur synchrone à aimant permanent figure (I.17) et les systèmes à générateur d'induction à double alimentation (MADA)[15].*

*Le tableau I.3 : Les avantages et inconvénients de l'éolienne à vitesse variable*

	<i>Les avantages</i>	<i>Les inconvénients</i>
<i>La vitesse variable</i>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ <i>Augmentation du rendement énergétique ;</i></li><li>➤ <i>Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance</i></li><li>➤ <i>Réduction des efforts subis par le train de puissance ;</i></li><li>➤ <i>Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.</i></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>➤ <i>Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs</i></li><li>➤ <i>.Contrôle du système plus compliqué</i></li></ul>

## I.10.3. Génératrices des éoliennes à vitesse variable

### I.10.3.1. Machine asynchrone à double alimentation structure MADA

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) est un type de machine asynchrone dont le rotor, équipé d'un enroulement bobiné, est relié au réseau électrique via une interface d'électronique de puissance. Cette interface permet de moduler à la fois la fréquence et l'amplitude des courants rotoriques en ajustant la tension appliquée au rotor, en fonction du point de fonctionnement souhaité. Cette configuration autorise une variation de la vitesse de rotation d'environ  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme. Le stator, quant à lui, est directement connecté au réseau [16]. figure(I.17)

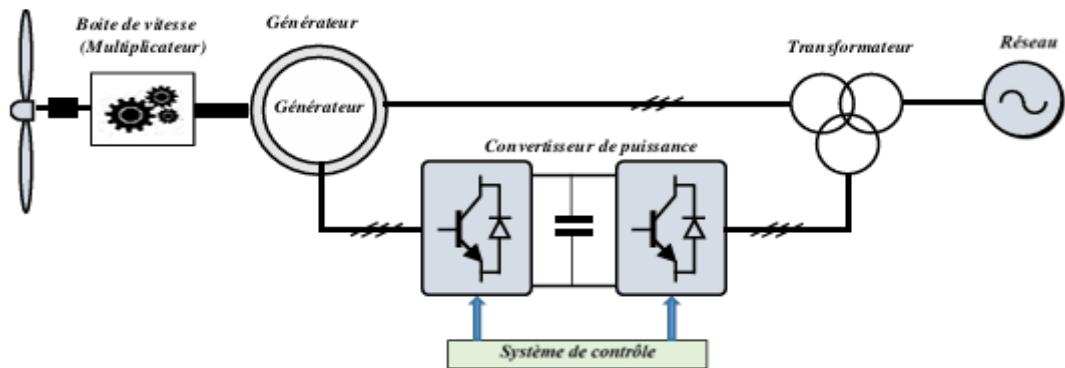


Figure (I.17): Eolienne à base de la génératrice asynchrone double alimenté (MADA)[15]

Le tableau(I.1) ci-dessous représente les avantages/inconvénients de la structure MADA :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\% \omega_{sync}</math>)</li> <li>➤ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens</li> <li>➤ EP dimensionnée à 30% de (<math>P_n</math>)</li> <li>➤ Machine standard</li> <li>➤ Connexion de la machine plus facile à gérer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Maintenance boîte de vitesse</li> <li>➤ Prix de l'électronique de puissance relatif</li> <li>➤ Contrôle commande complexe</li> <li>➤ Oscillations mécaniques (mais amorties par un contrôle adéquat)</li> </ul>

### I.10.3.2. Machine synchrone à aimants permanents- structure MSAP

*On s'intéresse ici à une configuration d'éolienne entièrement connectée au réseau via une interface d'électronique de puissance, composée de plusieurs convertisseurs — le plus souvent des onduleurs bidirectionnels utilisant des composants semi-conducteurs commandable tels que les IGBT ou IGCT, pilotés par modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM). L'un de ces convertisseurs est relié au stator de la génératrice, l'autre au réseau. La génératrice utilisée dans cette architecture est une machine synchrone à aimants permanents, caractérisée par un grand nombre de paires de pôles (voir Figure I.I), ce qui permet de réduire, voire d'éliminer, le besoin d'un multiplicateur de vitesse. Cette structure autorise une plage complète de variation de vitesse, allant de 0 % à 100 % de la vitesse nominale.*

*Le convertisseur connecté au stator de la génératrice permet de contrôler son couple et donc sa vitesse de rotation, tandis que celui raccordé au réseau assure le transfert de puissance active entre la génératrice et le réseau, ainsi que la gestion de la puissance réactive. Cette architecture permet un découplage quasi complet entre la génératrice et le réseau : un défaut sur ce dernier n'affecte que très faiblement le fonctionnement de l'éolienne.*

*Cette technologie présente de nombreux avantages : une grande flexibilité de commande, un découplage réseau-génératrice, une optimisation de la production grâce à une large plage de vitesses de fonctionnement, ainsi qu'une capacité à gérer la puissance réactive. Toutefois, ces bénéfices impliquent un coût plus élevé, notamment en raison de l'interface dimensionnée à 100 % de la puissance nominale de la machine, et de l'utilisation de génératrices synchrones conçues spécifiquement pour ce type d'application.*

*Il est important de noter que les systèmes entièrement interfacés ne reposent pas exclusivement sur des génératrices à aimants permanents ou à grand nombre de pôles. Différentes approches technologiques existent également pour les convertisseurs côté génératrice. Par exemple, ENERCON utilise depuis plusieurs années des génératrices synchrones multipolaires à inducteurs bobinés alimentés séparément, couplées à un redresseur à diodes suivi d'un hacheur pour l'intégration au bus continu. VESTAS et GE proposent désormais des systèmes utilisant un multiplicateur de vitesse avec des machines synchrones à aimants permanents, tandis que SIEMENS mise sur une architecture entièrement interfacée utilisant une machine asynchrone à cage avec multiplicateur. Quant à GAMESA, elle prévoit l'introduction prochaine de générateurs à aimants permanents [17].*

### I.10.3.3. La génératrice a aimant permanent

Les générateurs à aimants permanents sont des machines synchrones dans lesquelles les enroulements rotor sont remplacés par des aimants permanents figure (I.18). Cette configuration supprime le besoin d'excitation externe, ce qui élimine les pertes d'excitation du rotor, représentant environ 30 % des pertes totales d'un générateur conventionnel. Il en résulte une densité de puissance élevée, un encombrement réduit, et un rendement optimisé sur toute la plage de vitesses. Ces caractéristiques permettent de maximiser la production annuelle d'énergie tout en réduisant le coût global de possession [18].

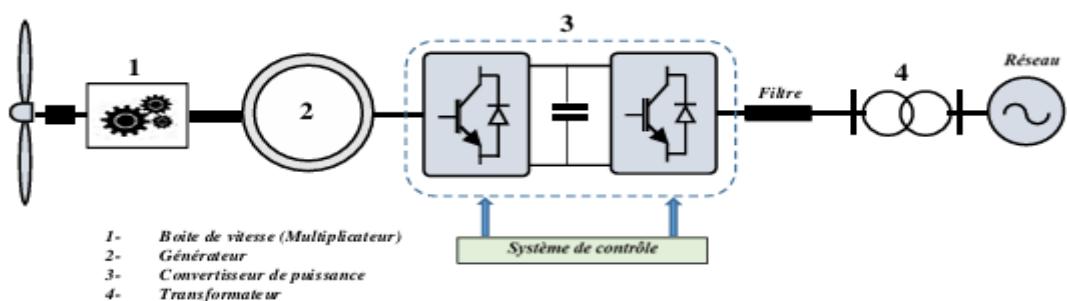


Figure (I.18): Eolienne à base de la génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP)[15]

### I.10.3.4. Machine asynchrone à cage structure MAS

La machine asynchrone à cage à vitesse variable est une machine asynchrone à rotor en cage d'écureuil couplée à un convertisseur statique (généralement un convertisseur AC/DC/AC). Cela permet de découpler la vitesse de rotation du générateur de la fréquence du réseau et ainsi adapter la vitesse de l'éolienne en fonction de la vitesse du vent Figure (I.19).

La cage d'écureuil est un enroulement dans sa forme la plus simple. Au moment de la mise en circuit, un champ tournant est généré dans le stator. Le rotor à l'arrêt est traversé par le champ tournant, engendrant dans la cage d'écureuil une tension d'induction en raison du changement de flux [19].

#### A. Avantages :

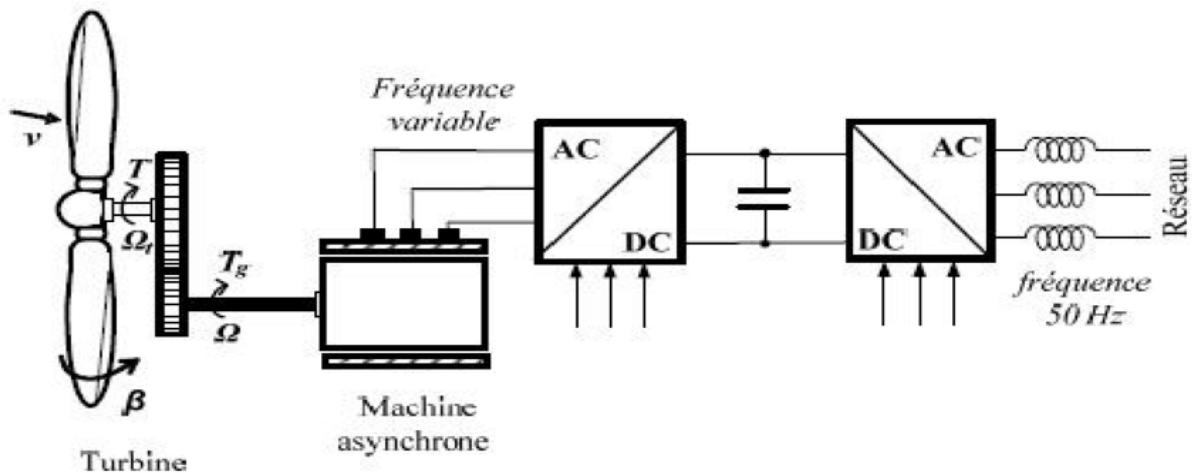
- Optimisation de la puissance extraite grâce à un suivi du point de puissance maximale (MPPT).
- Meilleure intégration au réseau, grâce à un contrôle précis de la tension, de la fréquence et de la puissance réactive.

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

- *Réduction des efforts mécaniques sur les composants (multiplicateur de vitesse, pales, etc.).*
  - *Plus grande efficacité énergétique, notamment dans les régimes de vent faible à modéré.*

### *B. Inconvénients :*

- *Nécessite un convertisseur électronique de puissance coûteux.*
  - *Complexité du système de contrôle.*
  - *Besoin d'un refroidissement adapté pour les composants électroniques.*



*Figure (I.19): Eolienne à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage*

### ***I.11. Conclusion***

*L'examen des généralités sur l'énergie éolienne permet de mieux comprendre le fonctionnement, les types et les technologies associées à cette source d'énergie renouvelable. L'évolution technologique a permis le développement de systèmes de plus en plus efficaces, adaptés à diverses conditions de vent et de connexion au réseau. Malgré certains inconvénients, notamment liés à l'intermittence du vent et à l'impact paysager, l'énergie éolienne reste une alternative viable aux énergies fossiles. En Algérie, le potentiel éolien est encore largement sous-exploité, mais offre de réelles perspectives de développement. Ce chapitre constitue ainsi une base essentielle pour aborder de manière approfondie les aspects techniques et économiques de l'énergie éolienne dans les chapitres suivants.*



## **Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau**

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

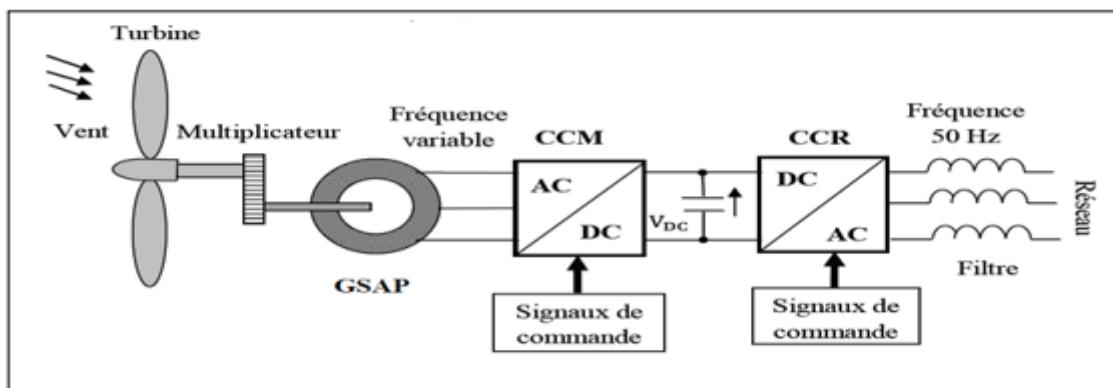
### II.1. Introduction

L'essor des énergies renouvelables constitue une réponse majeure aux défis environnementaux et énergétiques contemporains. Parmi ces sources d'énergie, l'éolien occupe une place centrale en raison de son abondance, de son faible impact environnemental et de son potentiel de développement. L'intégration des parcs éoliens dans le réseau électrique pose cependant des défis techniques et opérationnels liés à la variabilité du vent, à la stabilité du réseau et à l'optimisation de la production.

Ce chapitre s'attache à modéliser une installation éolienne connectée au réseau électrique. L'objectif est d'analyser son comportement dynamique, d'étudier son impact sur le réseau et de proposer des stratégies d'intégration efficaces. Après une présentation des composants essentiels d'une centrale éolienne – turbine, générateur, système de conversion et dispositifs de contrôle – nous détaillerons les modèles mathématiques et les simulations permettant d'évaluer ses performances. Enfin, une étude de cas illustrera l'application de ces modèles à une installation réelle ou théorique.

Cette modélisation permet non seulement de mieux comprendre le fonctionnement des éoliennes en interaction avec le réseau, mais aussi d'optimiser leur intégration en assurant la stabilité et la qualité de l'énergie injectée.

Schéma bloc dès l'installation étudié



Figure(II.1) : Système de conversion éolienne à base de la GSAP[45].

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

### II.2. Caractéristique de la source éolienne

#### II.2.1. Modélisation de vent

Les caractéristiques du vent jouent un rôle essentiel dans divers aspects de l'exploitation de l'énergie éolienne. La première étape de tout projet éolien consiste à identifier les sites adaptés et à évaluer la viabilité économique du projet. Le vent, par nature, est hautement variable à la fois spatialement et temporellement. Cette variabilité revêt une importance particulière, car elle est accentuée par la relation cubique entre la vitesse du vent et l'énergie disponible [20].

Les vitesses du vent, qui déterminent le fonctionnement de l'éolienne, sont généralement mesurées à l'aide d'un anémomètre ou d'une station météorologique, exprimées en mètres par seconde (m/s) ou en kilomètres par heure (km/h).

➤ Les modèles de distribution couramment utilisés sont [21] :

- La distribution de Weibull,
- La distribution hybride de Weibull.
- La distribution de Rayleigh.

Le vent est caractérisé par sa distribution de l'énergie cinétique dans le domaine fréquentiel, appelée le spectre de Van Der Hoven donnant la densité spectrale de puissance multipliée par la fréquence angulaire  $\omega$  (Figure II.1). Bien que les détails sont différents, les spectres mesurés dans des sites différents ont la même allure, indépendamment du site, en effet le spectre montre deux maxima, approximativement à 0.01 cycles/h et 50 cycles/h.

La partie basses fréquences du spectre correspond aux vents géostrophiques alors que les hautes fréquences correspondent à la turbulence associée aux vents locaux. L'allure de la concentration de la densité spectrale de la puissance du vent permet de scinder la vitesse du vent  $V$  en deux composantes [22,23]:

$$V = V_m + v \quad (II.1)$$

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

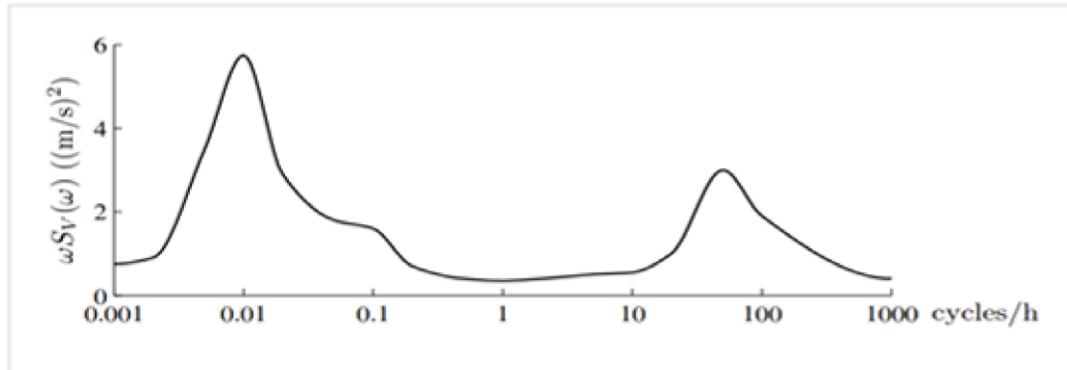
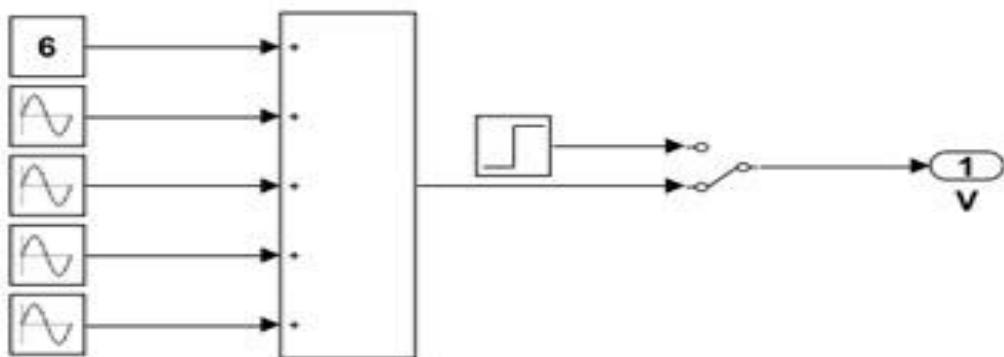


Figure (II.2) : Spectre de Van Der Hoven.

Où la vitesse quasi constante  $V_m$  est obtenue comme la moyenne des vitesses instantanées sur un intervalle de temps  $t_p$  :

$$V_m = \frac{1}{t_p} \int_{t_0 - \frac{t_p}{2}}^{t_0 + \frac{t_p}{2}} V(t) dt \quad (II.2)$$

Souvent, le temps d'intégration  $t_p$  est choisi dans le gap d'énergie entre 10 à 20 minutes. Lorsque c'est le cas, les changements macro-météorologiques dans la vitesse du vent apparaissent comme des fluctuations dans la vitesse du vent moyenne, alors que le terme  $v$  représente la turbulence atmosphérique.

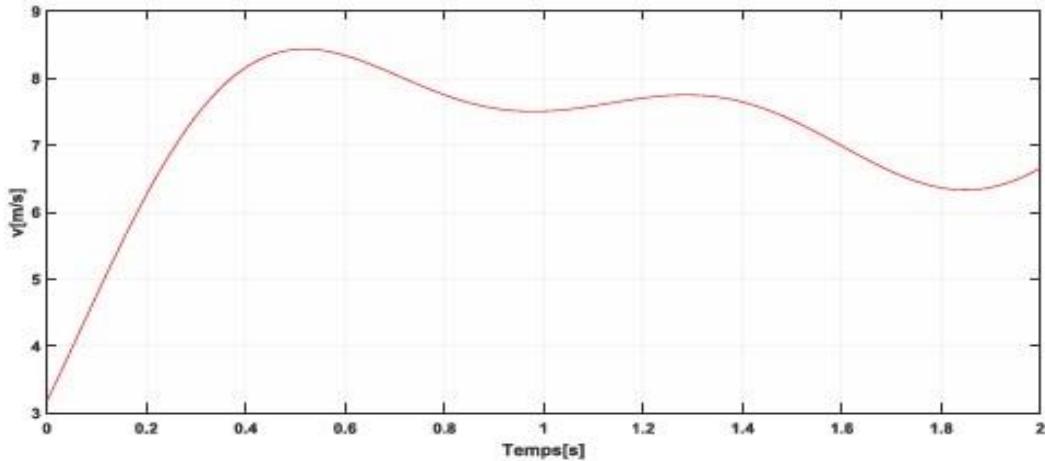


Figure(II.3) : Bloc de simulation de la vitesse du vent.

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

La simulation du profil du vent est représentée sur la figure(II.4) :



Figure(II.4) : Evolution de profil du vent.

### II.3. Modélisation de la chaîne de production de l'énergie éolienne

La conception d'un modèle dépend des objectifs visés, du niveau de précision recherché et du degré de complexité accepté. Un tel modèle peut servir à analyser, prédire ou contrôler le système étudié. Il repose généralement sur des principes physiques et/ou des données expérimentales.

Plusieurs chercheurs ont proposé divers modèles pour estimer la performance des éoliennes, lesquels peuvent être regroupés en deux grandes catégories [24]:

- Les modèles fondés sur les équations fondamentales de la puissance exploitable du vent.
- Les modèles basés sur l'analyse de la courbe de puissance caractéristique de l'éolienne.

Pour notre modélisation, on se repose sur la première catégorie ou on va d'abord exposer quelques concepts sur l'aérodynamique.

la puissance du vent  $P_v$  est exprimée par la formule suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (II.3)$$

Où  $P_v$  exprime la puissance du flux du vent perpendiculaire à une surface de section  $S$ , balayée par les pales de la turbine, qui se déplace à la vitesse  $V(m/s)$  et ayant une densité de l'air  $\rho$ .

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

Les paramètres qui influent sur la puissance du vent: ;

- La longueur de la pale: ( $S = \pi R^2$ ) pour une éolienne à axe horizontal
- La vitesse du vent qui dépend de la hauteur du mat ( $H$ )
- l'équation suivante montre la dépendance de la vitesse du vent avec la hauteur du mat

$$\frac{V(H)}{V(H_r)} = \left(\frac{H}{H_r}\right)^\alpha \quad (II.4)$$

La figure suivante montre l'évolution de la puissance de l'éolienne avec leur taille :



Figure (II.5) : Dimensions et puissances des éoliennes.

La puissance du vent est convertie en puissance mécanique par l'éolienne selon la relation

Suivante[24]

$$P_m = C_p \cdot P_v \quad (II.5)$$

Les courbes de puissance des éoliennes varient en fonction de leur conception et de leur puissance nominale. La puissance qu'une éolienne peut générer pour une vitesse de vent donnée dépend de ses caractéristiques propres ainsi que de la courbe de puissance fournie par le fabricant.

Comme évoqué précédemment, l'extraction de puissance par une éolienne est régie par les équations (II.3) et (II.5). Celles-ci permettent de reformuler l'équation de la puissance

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (II.6)$$

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

$\lambda$ : vitesse spécifique qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent .

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \quad (II.7)$$

Diverses approximations numériques ont été développées afin de déterminer l'expression de  $C_p$ . Parmi celles-ci, l'équation (II.8) est fréquemment utilisée dans de nombreuses études scientifiques et fait partie des modèles intégrés à la bibliothèque **Matlab-Simulink**. Cette équation permet de calculer le **coefficient de puissance**  $C_p$  pour une turbine donnée.

$$C_p = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda} - 0.43\beta - 5 \right) e^{-21} + 0.0036 \cdot \lambda \quad (II.8)$$

Avec :

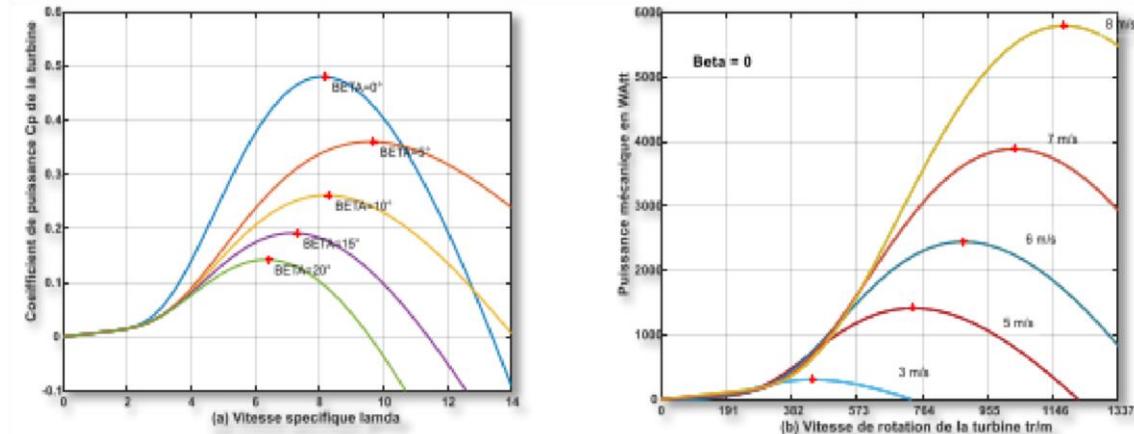
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1} \quad (II.9)$$

Cette expression de  $C_p$  est conservée pour la modélisation de la turbine éolienne étudiée dans cette thèse.

Les courbes présentées dans la figure (II.6.a) illustrent l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine en fonction de  $\lambda$ , pour différentes valeurs de l'angle d'inclinaison de la pale (  $\beta$  ). Pour  $\beta=0$ , on observe un maximum de  $C_{p\_max} = 0,45$  qui correspond à un  $\lambda_{opt}=8.1$ . Une fois ces paramètres sont atteintes. La puissance mécanique maximale est extraite de l'énergie du vent.

Quant aux courbes de la figure (II.6.b), elles montrent la puissance mécanique développée par la turbine en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent, en considérant un angle de calage  $\beta = 0$ , adopté comme référence tout au long de ce travail.

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau



Figure(II.6) : Coefficient  $C_p$  et puissance mécanique sur l'arbre de la turbine.[15]

### II.3.1 Modélisation de la multiplication

Le multiplicateur de vitesse assure la transmission de l'énergie mécanique de l'arbre de la turbine, tournant à une vitesse lente  $\Omega_t$ , vers l'arbre de la génératrice, fonctionnant à une vitesse plus élevée  $\Omega$ . Cette transmission s'effectue selon un rapport de multiplication  $G$  défini par les équations suivantes :

$$\Omega = G * \Omega_t \quad (II.10)$$

$$C_T = G * C_{aer} \quad (II.11)$$

### II.3.2 Modèle de l'arbre de transmission

#### a. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_t$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique figure(II.7) :[25]

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

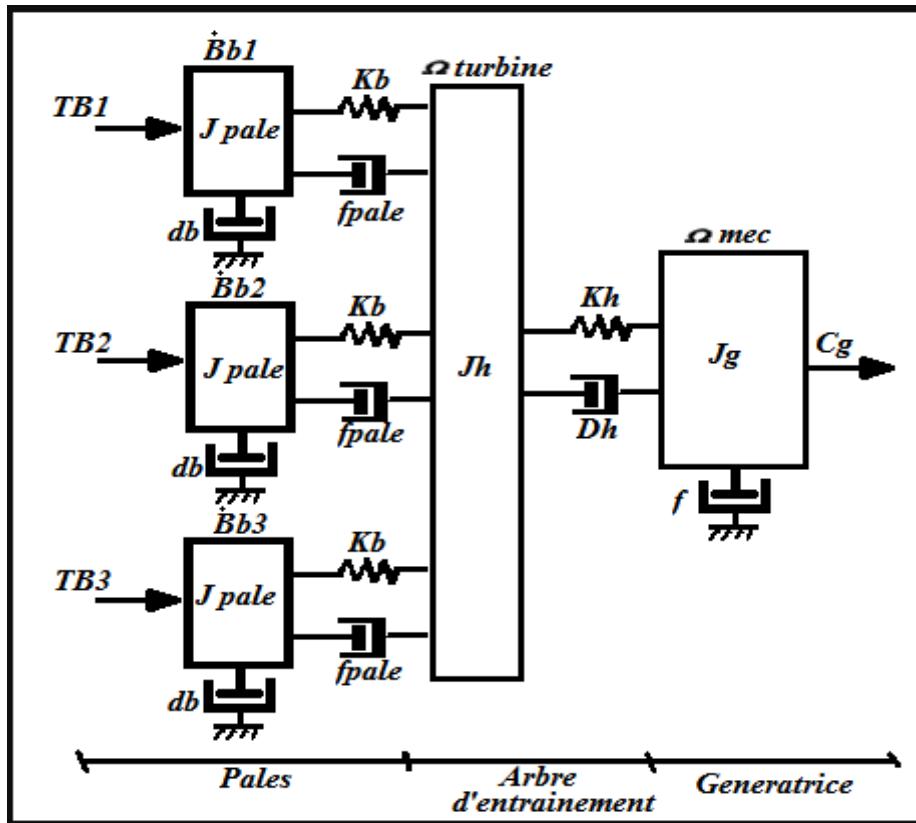


Figure (II.7): Système mécanique de l'éolienne.

Les trois pales sont considérées à une conception identique et possèdent donc :

- la même inertie  $J_{pale}$  .
- la même élasticité  $K_b$ .
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $d_b$ .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support pôle . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées ( $\beta_{b1}$ ,  $\beta_{b2}$ ,  $\beta_{b3}$ ) chaque pale reçoit une force  $Tb1$ ,  $Tb2$ ,  $Tb3$  qui dépend de la vitesse du vent, qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie  $J_h$  .
- son élasticité  $K_h$  .
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

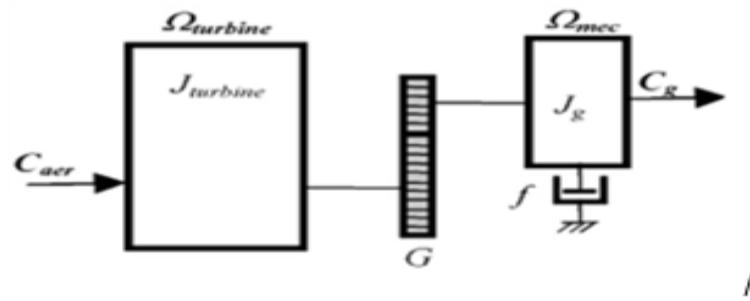
---

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie  $J_g$ .
- un coefficient de frottement  $d_g$ .

Ce rotor transmet un couple  $C_g$  à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ . Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toute les forces de poussée ( $Tb1 = Tb2 = Tb3$ ) ; alors, on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques, [26][27]

D'autre part, la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air ( $d_b$ ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses *Figure(II.8)* dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée, [25][28].



**Figure (II.8) : Modèle simplifié de la turbine.**

Avec :

- $J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne.
- $J_g$  : Le moment d'inertie de la génératrice.
- $f$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.
- $C_g$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur.
- $\Omega_g$  : La vitesse de rotation de la génératrice.
- $G$  : Le gain du multiplicateur de vitesse.

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

Le couple mécanique de la turbine est calculé à partir de l'expression de la puissance mécanique de la turbine en utilisant la relation :

$$C_T = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \frac{V^2}{\lambda} \quad (II.12)$$

L'équation dynamique décrivant l'évolution de la vitesse de rotation de l'ensemble mécanique (turbine + générateur synchrone à aimant permanent) est obtenue à partir des principes de la mécanique, et est donnée par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{aer} - C_{em} - f\Omega \quad (II.13)$$

Tel que :  $J = \left( \frac{J_t}{G^2} + J_m \right)$ ,  $f = \left( \frac{f_t}{G^2} + f_m \right)$  représentent respectivement l'inertie totale et le coefficient de frottement total de l'ensemble turbine et génératrice.

L'ensemble des équations de modélisation précédentes peut être regroupé dans un schéma-bloc représentant le modèle complet de la turbine, illustré dans la figure (II.9) ci-dessus.

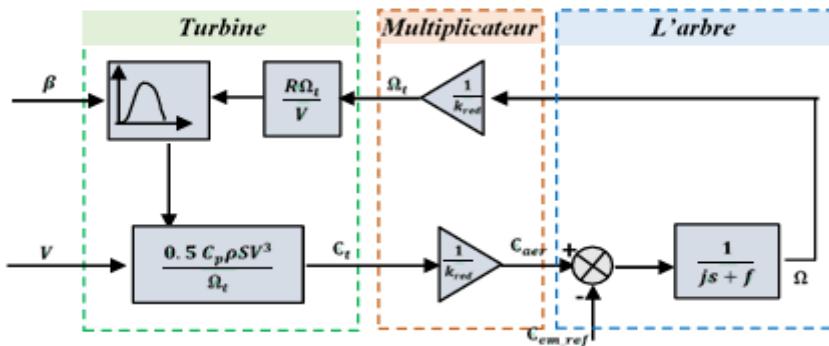


Figure (II.9) : Schéma bloc de la turbine.[15]

### II.4. Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

Le GSAP possède une caractéristique d'auto excitation qui lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend adapté à une utilisation dans les systèmes de générateurs éoliens. En fait, pour les petites turbines, son faible coût et sa simplicité en font le générateur le plus utilisé. Cependant, pour les

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

*applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (qui doit faire transiter toute la puissance générée) rendent le GSAP moins compétitif [29].*

*Nous avons opté pour un moteur synchrone à aimants permanents en raison de ses caractéristiques principales qui en font un moteur à fort couple massique et à bon rendement, particulièrement adapté aux applications spécifiques. Cependant, il présente également certains inconvénients, notamment le coût élevé des aimants et sa faible aptitude aux fonctionnements en survitesse.*

### **II.4.1. Avantages et les inconvénients**

*La machine synchrone à aimants permanents possède plusieurs avantages et inconvénients par rapport aux autres machines à courant continu, asynchrone, synchrone à excitation électrique [30].*

#### **II.4.1.1. Avantages**

- *rendement et facteur de puissance élevés.*
- *Puissance massique et volumique important.*
- *Une capacité de fonctionnement -Augmentation de la fiabilité.*
- *Absences des contacts glissants.*

#### **II.4.1.2. Inconvénients**

- *Ondulation de couple, coût élevé des aimants, technologie coûteuse.*
- *Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale.*
- *Interaction magnétique due au changement de structure.*
- *Pertes par courants de Foucault dans les aimants.*

### **II.4.2. Principe de fonctionnement d'une génératrice synchrone**

*Lorsque l'inducteur de la génératrice synchrone est entraîné mécaniquement, il crée un champ à répartition spatiale variable dans les bobinages statoriques. Les f.é.m. induites dans ces bobinages entraînent la circulation de courants induits qui, à leur tour, créent un champ statorique dans l'entrefer. Ce champ statorique tourne à la même vitesse que celle du champ*

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

inducteur. En revanche, dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant [31].

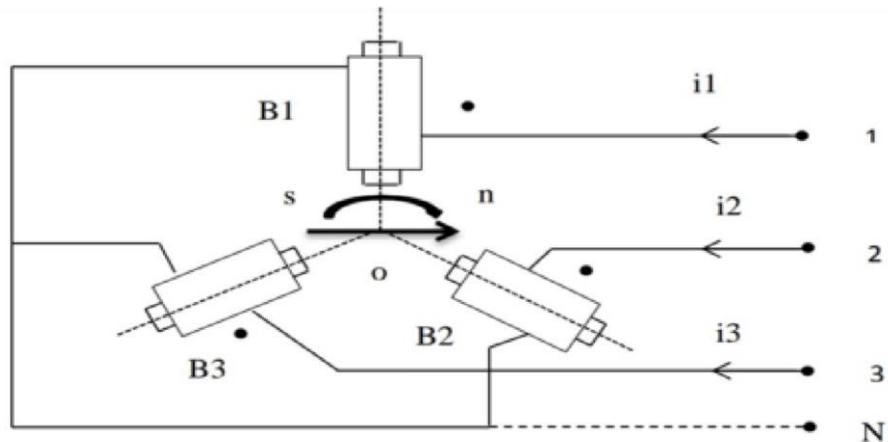


Figure (II.10) : Principe du générateur synchrone.

### II.5 Modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent

#### II.5.1 Hypothèses simplificatrices de la GSAP

Pour une représentation plus simple du modèle mathématique de la machine synchrone électrique nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes [32]:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator .
- L'hystéresis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau et l'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.
- La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator.
- L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.
- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

- Symétrie de la machine et alimenté par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires.

### II.5.2. Mises en équation électrique et magnétique dans le repère triphasé

#### II.5.2.1 Équation électrique

La génératrice synchrone à aimant permanent est constituée d'un stator avec des enroulements connectés en étoile (neutre isolé) ; cela signifie que la somme instantanée des courants statoriques est nulle, tandis que la création de l'excitation rotorique est assurée par l'aimant permanent. Les équations électriques dans le plan (a, b, c) peuvent s'écrire comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

#### II.5.2.2 Équation magnétique

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que [33] :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}] [i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \quad (II.15)$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{so} & M_{so} & M_{so} \\ M_{so} & L_{so} & M_{so} \\ M_{so} & M_{so} & L_{so} \end{bmatrix} \quad (II.16)$$

Et :

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

On peut récrire le système (II.14) sous la forme suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (II.18)$$

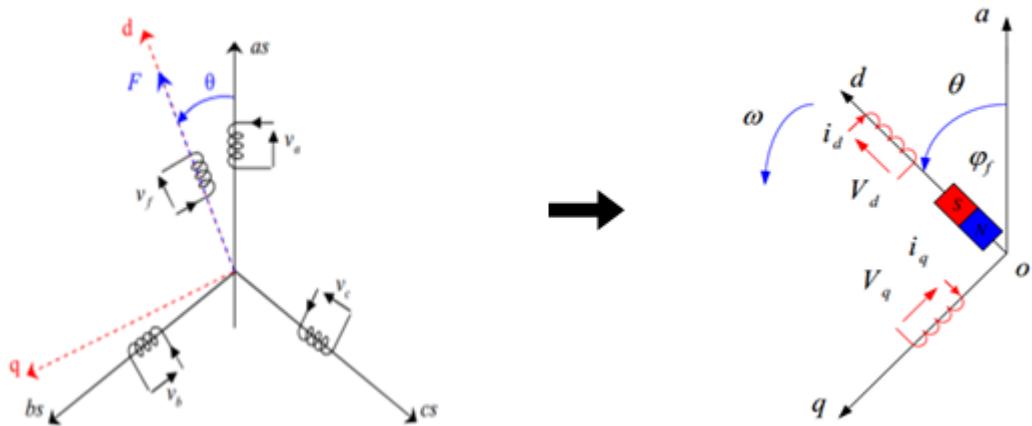
### II.5.2.3 Equation mécanique

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f \cdot \Omega_g \quad (II.19)$$

### II.5.3. Mises en équation électrique et magnétique dans le repère $dq$

Transformation de Park Afin de simplifier le modèle mathématique de la GSAP, la transformation du Park est utilisée ; cette dernière est un outil mathématique qui nous permet de transformer les trois axes de la machine dans le repère ( $a, b, c$ ) en deux axes orthogonaux ( $d, q$ ), c'est à dire la transformation des trois bobines statoriques diphasées de  $2/3 \pi$ , en deux bobines diphasées de  $/2 \pi$  et situées sur le rotor comme indiqué dans la figure (II.2) [34].



Figure(II.11) : Passage de système triphasé au système biphasé.

La transformation de Park est donnée par la matrice :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin\theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Pour revenir aux repères triphasés (*abc*), on utilise la transformation inverse de Park qui est donnée par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.21)$$

Les équations des tensions, courants et flux seront données par :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_d \\ \varphi_q \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

Appliquant la transformation de Park sur l'équation (II.14) ; l'équation électrique de la GSAP devient :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = P[\theta] \cdot R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + P[\theta] \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants de la MSAP, et on obtient ainsi les équations électriques de la GSAP comme suit :

#### II.5.3.1 Equations électriques

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

Les équations des tensions statoriques  $V_d$  et  $V_q$ , exprimées dans le repère de Park ( $dq$ ) en référence au rotor, s'écrivent comme suit [35] :

$$\begin{cases} V_q = R_s \cdot I_q + \frac{d\phi_q}{dt} + \omega_r \cdot \phi_d \\ V_d = R_s \cdot I_d + \frac{d\phi_d}{dt} - \omega_r \cdot \phi_q \end{cases} \quad (II.26)$$

et :  $\omega_r = p \cdot \omega$ . (II.27)

### II.5.3.2 Equations magnétiques

$\phi_q$ ,  $\phi_d$  les flux totaux circulant dans les enroulements statoriques, représenté dans le repère de Park, et s'expriment comme suit :

$$\begin{cases} \phi_d = L_d \cdot I_d + \phi_f \\ \phi_q = L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (II.28)$$

En remplaçant ces équations (II.26) dans les systèmes d'équations (II.28) on aboutit au système d'équations électriques de la GSAP suivantes :

$$\begin{cases} V_q = R_s \cdot I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} - \omega_r \cdot L_d \cdot I_d + \omega_r \phi_f \\ V_d = R_s \cdot I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega_r \cdot L_q \cdot I_q \end{cases} \quad (II.29)$$

### II.5.3.3 Équation mécanique

L'équation mécanique du système est exprimée par : [36]

$$\begin{cases} J = J_t + J_m \\ J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = C_m - C_{em} \end{cases} \quad (II.30)$$

- Expression de la puissance : Grâce à l'utilisation de la transformation de Park, la puissance électrique de la machine est préservée aussi bien dans le repère ( $abc$ ) que dans le repère ( $dq$ ). Ainsi, l'expression de la puissance instantanée totale dans la machine s'écrit comme suit :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q). \quad (II.31)$$

En remplaçant les expressions des tensions  $V_d$ ,  $V_q$ , on obtient :

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

$$P(t) = \frac{3}{2} R_s (I_d^2 + I_q^2) + \frac{3}{2} \left( I_d \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \frac{d\phi_q}{dt} \right) + \frac{3}{2} p \cdot \omega_r (\Phi_d \cdot I_q - \Phi_q \cdot I_d) \quad (II.32)$$

- Le premier terme de l'équation précédente représente les pertes par effet Joule au sein de la machine.
- Le deuxième terme traduit la variation de l'énergie stockée dans les enroulements du stator, laquelle devient nulle en régime permanent.
- Enfin, le troisième terme correspond à la puissance électromagnétique convertie en travail utile.
- Le couple Électromagnétique est déduit de l'expression de la puissance électromagnétique. Son expression est donnée dans le repère (dq) par l'équation suivante:

$$\begin{aligned} C_{em} &= \frac{3}{2} p [I_q \cdot \Phi_d + I_d \cdot \Phi_q] \\ \text{D'où: } C_{em} &= \frac{3}{2} p \cdot I_q [\Phi_f + (L_d - L_q) I_d] \end{aligned} \quad (II.33)$$

Pour une machine à pôles lisse  $L_d = L_q$

### II.6. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est une diapositive de l'électronique de puissance. Ces caractéristiques guident les concepteurs au choix convenable des semi-conducteurs à employer et leurs commandes. Les interrupteurs  $K_a$  et  $K'a$ ;  $K_b$  et  $K'b$ ;  $K_C$  et  $K'C$  doivent être contrôlé de façon complémentaire. Les tensions d'entrée de l'onduleur : entre les trois bornes  $abc$  et le point milieu fictif de référence  $n0$  de la source continue sont : [37]

a) Fonction de connexion :

Soit:  $i=1,2,3$  et  $j=1,2$

On associe à chaque interrupteur une fonction dite de connexion telle que peut prendre deux valeurs 0 et 1.

Elle est égale à 1 si l'interrupteur est fermé et à 0 si il est ouvert d'où on peut écrire :

$$I_{ij} = f_{ij} \cdot I_c \quad (III.34)$$

$$V_{ij} = (1 - f_{ij}) \cdot V_{dc} \quad (III.35)$$

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

b) Fonction de conversion composée :

Soit :  $V_{fab} V_{fbc} V_{fca}$  tel que :

$$V_{fab} = V_{21} - V_{11}$$

$$V_{fbc} = V_{31} - V_{21} \quad (III.36)$$

$$V_{fca} = V_{11} - V_{31}$$

D'après la fonction de connexion on peut écrire que :

$$V_{21} = (1 - f_{21})V_{dc} \quad (III.37)$$

$$V_{11} = (1 - f_{11})V_{dc}$$

On peut ainsi démontrer que :

$$V_{fab} = (1 - f_{21})V_{dc} - [(1 - f_{11})V_{dc}] = V_{dc}(f_{11} - f_{21})$$

$$V_{fab} = (f_{11} - f_{21}) \cdot V_{dc}$$

$$V_{fbc} = (f_{21} - f_{31}) \cdot V_{dc} \quad (III.38)$$

$$V_{fca} = (f_{31} - f_{11}) \cdot V_{dc}$$

On tire notre matrice :

$$\begin{bmatrix} V_{fab} \\ V_{fbc} \\ V_{fca} \end{bmatrix} = V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (III.39)$$

Les fonctions de conversion composée sont donc :

$$\begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} - f_{21} \\ f_{21} - f_{31} \\ f_{31} - f_{11} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

L'hypothèse est que les tensions simples forment un système triphasé équilibré :

$$V_{fa} = V_{fab} - V_{fca}$$

$$V_{fb} = V_{fbc} - V_{fab} \quad (III.41)$$

$$V_{fc} = V_{fca} - V_{fbc}$$

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{fab} \\ V_{fbc} \\ V_{fca} \end{bmatrix}$$

c) Fonctions de conversions simples :

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{1}{3} [2f_{11} - f_{21} - f_{31}] \\ f_b &= \frac{1}{3} [-f_{11} + 2f_{21} - f_{31}] \\ f_c &= \frac{1}{3} [-f_{11} - f_{21} + 2f_{31}] \end{aligned} \quad (III.42)$$

### II.7. Modélisation de la liaison au réseau

#### II.7.1 Mode de Synchronisation (PLL)

Pour brancher un alternateur sur le réseau ou le coupler avec un autre alternateur, il faut respecter les conditions suivantes :

- la tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau.
- la fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.
- la tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau.
- la séquence des phases de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.

La mise en pratique de ces conditions est appelée Procédure de synchronisation. En agissant sur le régulateur de vitesse de la turbine, on amène tout d'abord l'alternateur à une vitesse voisine de la vitesse synchrone, afin que sa fréquence soit proche de celle du réseau.

On règle ensuite l'excitation de façon que la tension induite soit égale à celle du réseau.

#### II.7.2 Modèle du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif. La capacité joue le rôle de réservoir lors de l'échanger d'énergie et permet de limiter l'onduleur de la tension du bus Dc[38].

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} \quad (III.43)$$

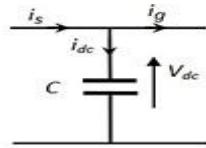


Figure (II.12): Schéma électrique du bus continu.

- $i_S$  : le courant du bus continu du coté redresseur
- $i_G$  : le courant du bus continu du coté réseau.
- $C$  : la capacité de condensateur de bus continue.
- $i_{dc}$  : le courant de condensateur de bus continue
- $V_{dc}$  : la tension de condensateur de bus continue

### II.7.3. Modèle du filtre côté réseau

Il s'agit d'un filtre passif série ( $R_t$ ,  $L_t$ ) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (Figure II.13) pour réduire la propagation des harmoniques dans le réseau électrique [39].

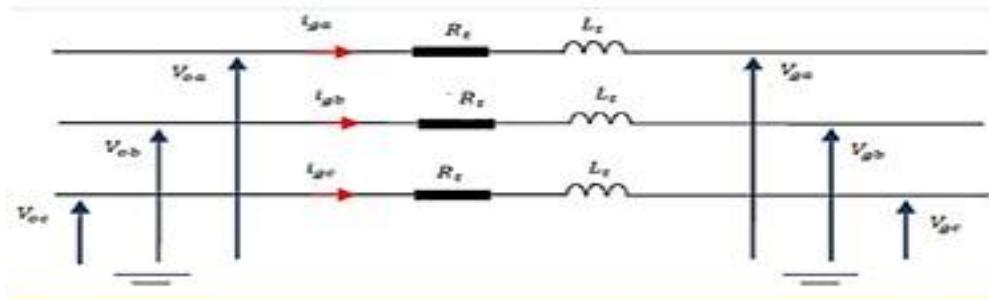


Figure (II.13) : Schéma électrique de filtre de liaison au réseau.

Avec :

## Chapitre II : Modélisation de l'installation éolienne connectée au réseau

---

$V_o$  et  $V_g$  représentent respectivement la tension du côté onduleur et du côté réseau. Dans le repère triphasé, les équations différentielles définissant le filtre peuvent être obtenues en regroupant les équations précédentes :

$$\begin{pmatrix} V_{0\_1} \\ V_{0\_2} \\ V_{0\_3} \end{pmatrix} = R_t \begin{pmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{pmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{g1} \\ V_{g2} \\ V_{g3} \end{pmatrix} \quad (III.39)$$

### II.8. Conclusion

La modélisation d'une installation éolienne connectée au réseau électrique constitue une étape cruciale pour optimiser l'exploitation de l'énergie éolienne tout en assurant la stabilité du système électrique global. À travers ce chapitre, nous avons abordé de manière détaillée les différentes composantes de la chaîne de conversion d'énergie – depuis la modélisation du vent jusqu'à la synchronisation au réseau – en passant par les modèles mécaniques et électriques de la turbine, du multiplicateur de vitesse, du générateur synchrone à aimants permanents (GSAP), de l'onduleur MLI, et des dispositifs de filtrage.

Chaque sous-système a été représenté à l'aide d'équations physiques rigoureuses et de schémas blocs permettant une simulation fidèle de son comportement dynamique. Les hypothèses simplificatrices adoptées visent à trouver un compromis entre précision du modèle et complexité de mise en œuvre, notamment dans l'environnement Matlab-Simulink. L'intégration de la commande vectorielle et de la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) a permis de maximiser l'extraction de puissance malgré la variabilité du vent.

Enfin, la prise en compte de l'interaction entre la génératrice et le réseau, via les étapes de synchronisation, de régulation du bus continu et de filtrage des harmoniques, assure une injection d'énergie de qualité répondant aux normes en vigueur. Ce travail fournit ainsi une base solide pour le développement de stratégies de commande avancées et pour l'analyse de la stabilité des systèmes éoliens modernes.



# **Chapitre III:**

## **Commande de la**

## **chaîne de conversion**

## **éolienne**

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

---

### III.1. Introduction

La croissance rapide des énergies renouvelables a positionné l'énergie éolienne comme l'une des principales alternatives aux sources d'énergie traditionnelles. Pour maximiser l'efficacité de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique, il est essentiel de mettre en œuvre une stratégie de commande efficace tout au long de la chaîne de conversion.

#### a. Fonctionnement à vitesse constante

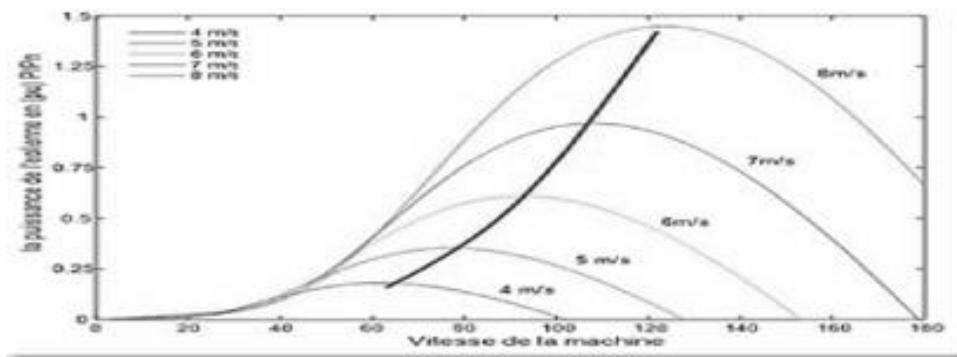
Lorsque la vitesse de rotation de la turbine atteint environ 90 % de sa vitesse nominale, la stratégie de commande change : il n'est plus nécessaire d'optimiser l'extraction de la puissance éolienne. La priorité devient alors le maintien d'une vitesse de rotation constante. Ce mode de fonctionnement correspond à la **zone 3** du fonctionnement de la turbine (voir figure II.3). Pour assurer ce régime, deux méthodes complémentaires sont mises en œuvre :

- **L'orientation des pales** afin de réduire la portance et donc limiter la puissance captée par le rotor.
- **Le contrôle électrique de la vitesse**, permettant d'ajuster le couple résistant appliqué par la chaîne de conversion électrique.

#### b. Intérêt de la vitesse variable d'une éolienne

Comme le montre clairement la figure (III.1) représentant les courbes de puissance d'une turbine, il existe, pour chaque valeur de la vitesse du vent, un point de fonctionnement optimal qui correspond à une seule valeur de la vitesse de rotation de la turbine. En effet, dans le cas d'une génératrice synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse de rotation reste pratiquement constante, ce qui signifie que le rendement aérodynamique maximal ne peut être atteint qu'à une seule vitesse de vent, correspondant au rapport de vitesses optimal ( $\lambda_{opt}$ ) . [39].

Étant donné que la vitesse du vent est par nature variable et aléatoire, l'utilisation d'une machine à vitesse variable permet une bien meilleure efficacité énergétique. En effet, ajuster la vitesse de rotation devient alors essentiel pour maximiser le transfert d'énergie dans un aérogénérateur.



**Figure(III.1) : Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du vent et de sa vitesse de rotation.**

### III.2. Objectif de la commande de l'installation

La chaîne de conversion éolienne se compose généralement d'un rotor captant l'énergie cinétique du vent, d'un générateur électrique — souvent une machine synchrone à aimants permanents (PMSG) — et d'un système d'électronique de puissance permettant d'adapter l'énergie produite aux exigences du réseau ou de la charge. La performance de l'ensemble repose fortement sur la qualité de la commande appliquée à chaque étage de cette chaîne.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes techniques de commande utilisées pour optimiser la production d'énergie éolienne et transférer cette énergie avec d'une façon efficace au réseau. Cela inclut notamment :

- **la commande de la vitesse de rotation de la turbine pour assurer le suivi du point de puissance maximale (MPPT).**
- **la commande vectorielle du générateur pour réguler les courants statoriques,**
- **ainsi que la génération des signaux de commande pour l'onduleur.**

L'étude de ces techniques permet de comprendre les enjeux liés à la stabilité, la réactivité et l'efficacité énergétique du système éolien.

Le schéma bloc de la commande de cette chaîne de conversion éolienne connectée au réseau est présenté dans la figure 3.1 ci-dessous:

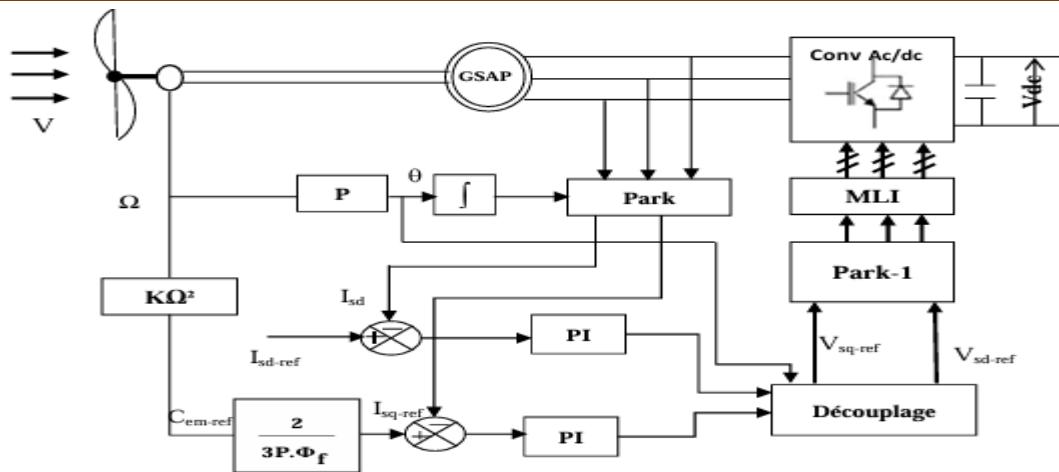
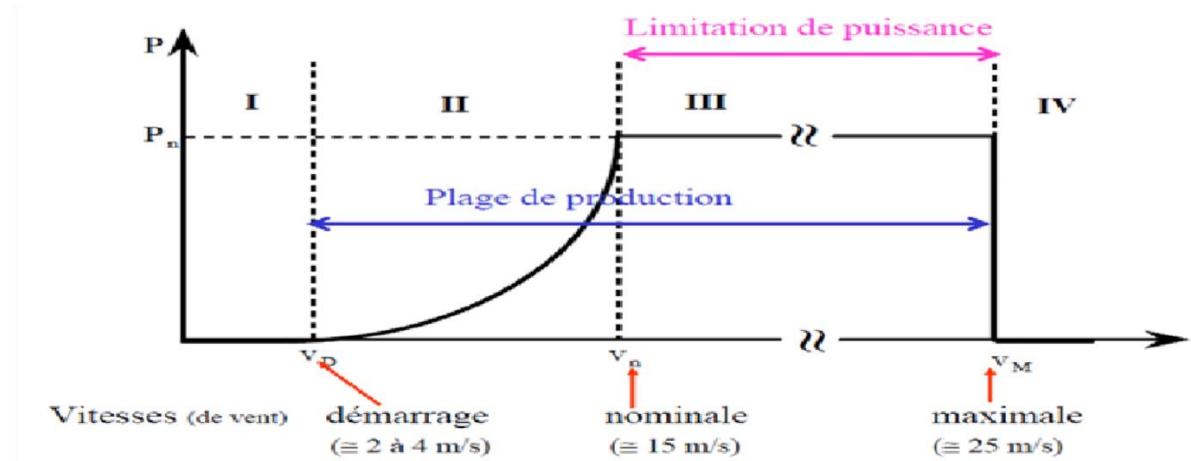


Figure (III.2) : Schéma bloc de la commande vectorielle de la GSAP

### III.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne

#### III.3.1 Zones de fonctionnement de l'éolienne

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones. figure :(III.3).



Figure(III.3) :Zones de fonctionnement de l'aérogénérateur.

- **la zone I :** l'éolienne est arrêtée car le vent n'est pas assez fort pour que la production d'énergie soit rentable vis-à-vis de l'énergie de fonctionnement. Le démarrage de l'aérogénérateur s'effectue au-delà d'une vitesse minimale du vent  $V_d$ .
- **la zone II :** correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut optimiser le rendement énergétique. Ainsi la vitesse de rotation évolue en fonction de la vitesse du vent de sorte à se maintenir sur le point de fonctionnement qui correspond au coefficient  $C_{p\_max}$

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

- . **la zone III** : arrivée à la puissance nominale pour des grandes valeurs de vitesses, une limitation de la puissance générée est alors effectuée .Au-delà d'une vitesse du vent  $V_m$ , un dispositif d'urgence est activé pour arrêter le fonctionnement du système de manière à éviter une rupture mécanique.
- **la zone IV** : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

### III.3.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance (ZONE II)

Afin d'assurer un fonctionnement optimal du générateur éolien en zone II, il est indispensable d'imposer au système un fonctionnement qui permet de soutirer le maximum de puissance

Que peut offrir la vitesse du vent disponible. En raison de la variation de la vitesse du vent, la courbe de puissance de l'éolienne change ainsi le point de fonctionnement du générateur se trouvera décalé du point correspondant au point de puissance maximale. Si le générateur continue à fonctionner à vitesse fixe, cela entraînera une dégradation du rendement du système de conversion d'énergie éolienne. Pour garder un fonctionnement optimal du système, une stratégie de commande est employée pour poursuivre le point de fonctionnement de la puissance maximale dite MPPT basée sur un fonctionnement à vitesse variable.

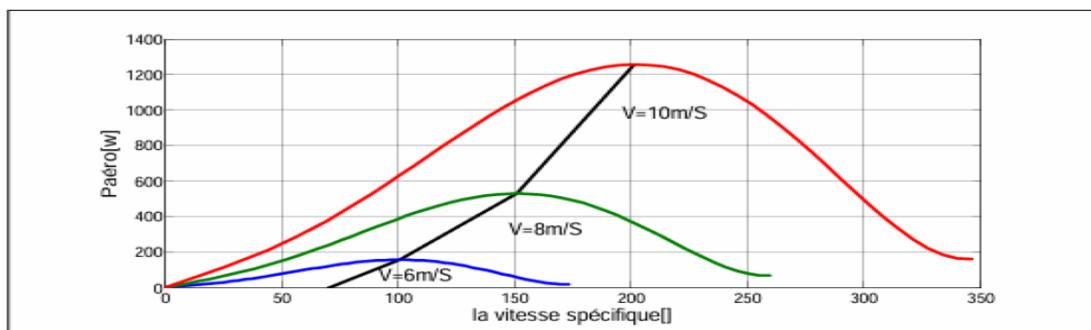


Figure (III.4) : Caractéristiques puissance-vitesse d'un aérogénérateur à vitesse variable.

Plusieurs commandes basées sur ce principe ont fait l'objet de recherches pour tester les performances du système de conversion d'énergie éolienne. Toutefois il est à noter qu'elles sont toutes basées sur deux possibilités de commande, soit :

- une commande en vitesse.
- ou bien un control du couple électromagnétique.

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

On a choisi la première méthode : MPPT avec commande en vitesse.

### III.3.2.1 .Commande MPPT avec asservissement de la vitesse

La technique utilisée dans notre travail pour optimiser la puissance extraite du vent dans la turbine est appelée 'Tip Speed Ratio' (TSR). Cette technique repose sur la variation de la vitesse de la machine, en maintenant a vitesse à une valeur optimale de référence pour chaque vitesse de vent [42] [43] [44]. La vitesse optimale de référence correspondant à une vitesse spécifique optimale ' $\lambda_{opt}$ ' va permettre de ramener le coefficient de puissance à sa valeur maximale  $C_{p_{max}}$ . Elle est calculée selon l'équation (II.7) comme suit:

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (III.1)$$

Le modèle de fonctionnement global de la commande MPPT avec asservissement de vitesse de la turbine, ainsi que les équations correspondantes, sont présentés dans le schéma synoptique de la figure suivante, Figure. (III.5).

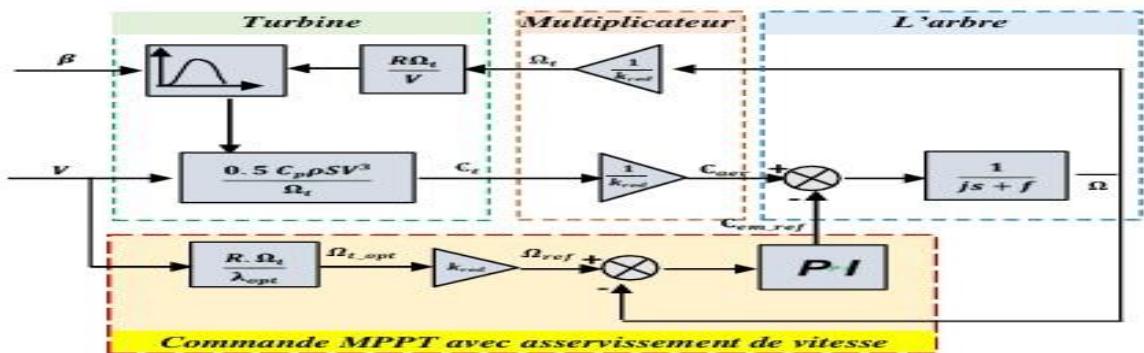


Figure (III.5) : Schéma bloc de la commande MPPT avec asservissement de vitesse.

Pour le contrôle de la vitesse de la génératrice, nous utilisons la technique de MPPT dans laquelle la vitesse de référence est déterminée à partir de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et de la vitesse du vent  $V$  où :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V}{R} \quad (III.2)$$

$$C_{err} = Reg. (\Omega_{ref} - \Omega) \quad (III.3)$$

Où  $Reg$  est le régulateur PI de la boucle de régulation de la vitesse.

Nous allons comparer cette vitesse de référence calculée à partir de la courbe de puissance de la turbine éolienne avec la vitesse de la génératrice pour obtenir une erreur de vitesse ; cette dernière nous permettra de calculer le courant  $i_{qs\_ref}$  dont nous avons besoin dans la régulation du courant  $i_q$ .

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

---

### a. Calcul des paramètres du régulateur de vitesse PI

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit :

$$FTBO = \left( K_p + \frac{K_i}{P} \right) \left( \frac{1}{JP + f} \right) = \frac{K_p}{P} \left( P + \frac{K_i}{K_p} \right) \left( \frac{\frac{1}{j}}{P + \frac{j}{j}} \right) \quad (III.4)$$

Par la méthode de compensation des pôles : On pose :

$$P + \frac{K_i}{K_p} = \frac{f}{j} + P \quad (III.5)$$

Alors la :

$$FTBO = \frac{K_p}{P} \left( \frac{1}{j} \right) \quad (III.6)$$

En déduit la fonction de transfert en boucle fermée comme suit :

$$FTBF = \frac{FTBO}{1 + FTBO} = \frac{\frac{K_p}{P} \left( \frac{1}{j} \right)}{1 + \frac{K_p}{P} \left( \frac{1}{j} \right)} \quad (III.7)$$

Alors :

$$FTBF = \frac{\frac{K_p}{j}}{P + \frac{K_p}{j}} = \frac{1}{1 + \frac{K_p}{j} P} = \frac{1}{1 + \tau_r P} \quad (III.8)$$

De ce qui précède on a :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{f}{j} \cdot \frac{1}{K_p} = \tau_r \quad (III.9)$$

D'où :

$$K_p = \frac{j}{\tau_r} \quad (III.10)$$

$$K_i = \frac{f}{\tau_r} \quad (III.11)$$

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

---

### III.3.2.2 Commande MPPT sans asservissement de la vitesse (control du couple électromagnétique)

Cette structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Ce qui permet d'écrire l'équation mécanique (II.13) comme suit [46][47] :

$$0 = C_{aer} - C_{em} - f\Omega \quad (III.12)$$

Donc en négligeant l'effet du couple de frottement on obtient :

$$C_{em} = C_{aer} \quad (III.13)$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple de la turbine :

$$C_{em_{ref}} = \frac{C_T}{k_{red}} \quad (III.14)$$

En remplaçant la valeur du couple de la turbine donnée par l'équation (II.12) il vient :

$$C_{em_{ref}} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 V^2}{2 \cdot \lambda \cdot k_{red}} \quad (III.15)$$

L'estimation de la vitesse du vent peut être donnée par l'expression suivante :

$$V = \frac{R \cdot \Omega_T}{\lambda} \quad (III.16)$$

On trouve l'expression du couple électromagnétique de référence :

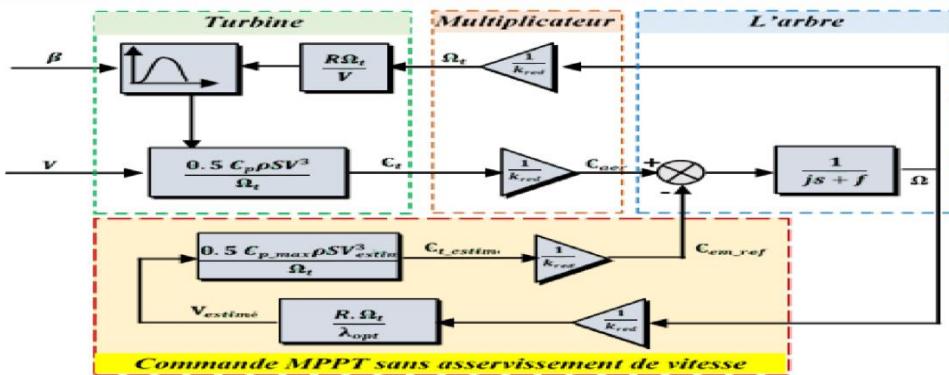
$$C_{em_{ref}} = \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \Omega^2}{2 \cdot \lambda^3 \cdot k_{red}^3} \quad (III.17)$$

Pour un fonctionnement au point de puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse spécifique à la valeur  $\lambda_{opt}$  qui correspond au coefficient de puissance maximal  $Cp\_max$ . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em_{ref}} = \frac{C_{p_{max}} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \Omega^2}{2 \cdot \lambda_{opt}^3 \cdot k_{red}^3} \quad (III.18)$$

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

Le schéma bloc de cette commande MPPT est donné par la figure (III.6) suivante :



Figure(III.6) : Schéma bloc de la commande MPPT sans régulation de vitesse.

Les MPPTs ci-dessus malgré leur simplicité et efficacité, ils rencontrent certains problèmes :

- La connaissance de la voilure  $C_p=f(\lambda)$  c.à.d. l'information sur  $C_{p_{max}}$  et  $\lambda_{opt}$ .
- la mesure de la vitesse du vent par un anémomètre placé sur la nacelle n'est pas très précise.

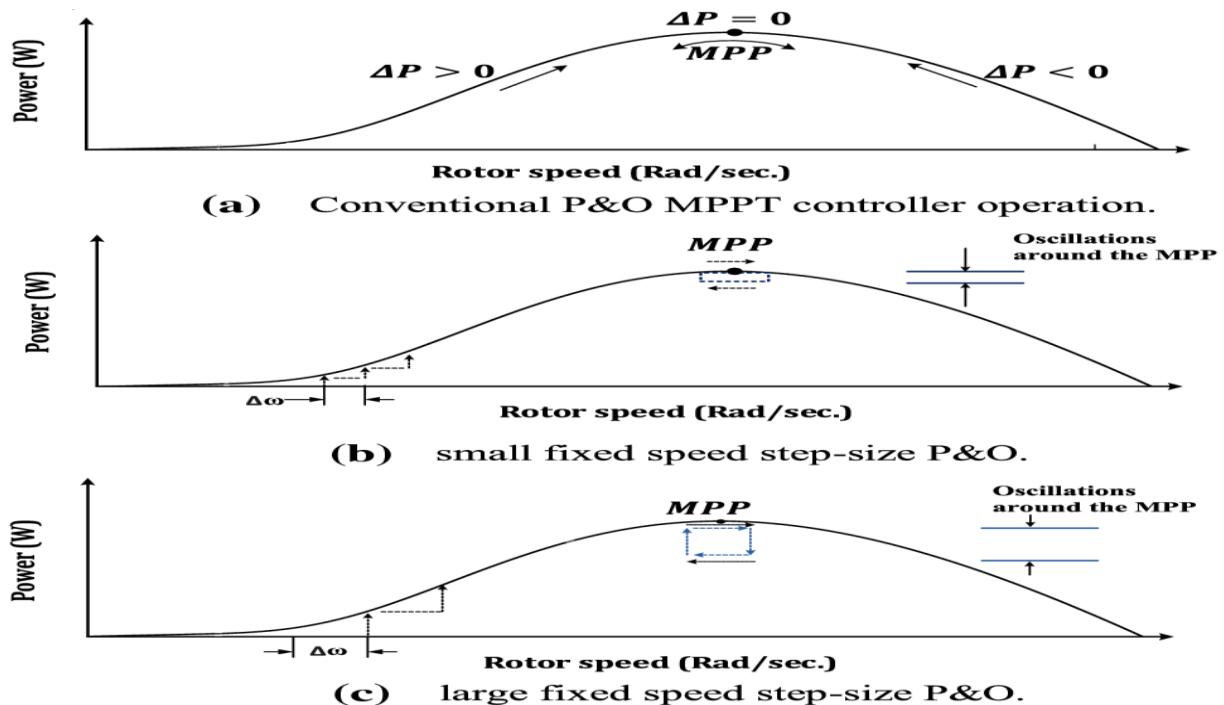
Pour résoudre ces problèmes une autre famille des MPPTs a vu le jour, parmi lesquelles le plus classique est l'algorithme 'perturb et observ'.

#### III.3.2.3 Algorithme MPPT P&O conventionnel

Pour fonctionner au point de puissance maximale (MPP), l'algorithme MPPT P&O conventionnel fait varier la puissance générée en fonction des variations de vitesse du rotor jusqu'à ce que la pente de la courbe  $P-\omega$  soit nulle. L'algorithme CPO ne nécessite aucune connaissance préalable de l'éolienne ni d'anémomètre installé pour mesurer la vitesse du vent. L'algorithme CPO ne nécessite aucune connaissance préalable de l'éolienne ni d'anémomètre installé pour mesurer la vitesse du vent. L'algorithme CPO perturbe les variables de contrôle avec un pas spécifique et observe la variation de la fonction objective jusqu'à obtenir le point de puissance maximale (MPP) local. Cette stratégie dépend de la position du point de fonctionnement (à gauche du MPP)  $\Delta P_\omega > 0$ , l'algorithme CPO fait varier la vitesse du générateur par un incrément vers la droite, près du MPP. Sinon, si le point de fonctionnement est à droite  $\Delta P_\omega < 0$ , l'algorithme CPO inverse le sens de la perturbation, comme illustré à la figure 5a. Le choix du pas est considéré comme le principal inconvénient de cette technique. Le pas de perturbation est directement lié aux performances de l'éolienne, notamment au temps de stabilisation et au niveau d'oscillation de

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

la puissance extraite. Un pas important allonge le temps de stabilisation. Cependant, le niveau d'oscillation autour du point de puissance maximal (MPP) est accru, ce qui a un impact plus important sur les machines de grande taille. À l'inverse, l'application d'un petit pas entraîne une diminution des oscillations en régime permanent. Cependant, cela réduit la convergence de vitesse et augmente les pertes de puissance. Pour pallier ces inconvénients, des techniques P&O modifiées ont utilisées, combinant les caractéristiques des deux types. Les performances de l'algorithme CPO MPPT à pas fixe, petit ou grand, sont présentées respectivement dans les figures 5b et 5c.[48]



Figure(III.7 ):Algorithme MPPT P&O conventionnel.

#### III.4 Commande vectorielle du générateur synchrone à aimants permanents

##### III.4.1 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle s'inspire directement de celui de la commande appliquée aux machines à courant continu à excitation séparée ; toutefois, pour l'appliquer aux machines synchrones, il est nécessaire de se placer dans un repère tournant particulier, dans lequel le couple électromagnétique peut être exprimé simplement à partir des composantes des courants projetées sur les axes directs ( $d$ ) et en quadrature ( $q$ ).

Dans ce contexte, la composante du courant statorique selon l'axe '  $d$ ' joue un rôle équivalent à celui de l'excitation dans une machine à courant continu ; elle permet d'ajuster

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

le flux magnétique dans la machine. En parallèle, la composante selon l'axe 'q' remplit la fonction du courant d'induit et permet de contrôler directement le couple électromagnétique [49].

La mise en œuvre efficace de la commande vectorielle impose que le courant  $i_{qs}$  soit en quadrature avec le flux rotorique. En conséquence, la composante  $i_{ds}$  du courant statorique doit être alignée (colinéaire) avec ce flux. Si  $i_{ds}$  est orientée dans le même sens que le flux rotorique, le flux statorique contribue à renforcer celui des aimants permanents, entraînant ainsi une augmentation du flux d'entrefer – on parle alors de surexcitation. À l'inverse, si  $i_{ds}$  est négatif, le flux statorique s'oppose au flux rotorique, ce qui provoque une sousexcitation par diminution du flux d'entrefer.

Les trois fonctions de la commande du GSAP sont illustrées sur la figure (III.8) :

- 1- Algorithme d'extraction du maximum de puissance.
- 2- Commande vectorielle du GSAP.
- 3- Contrôle du redresseur MLI.

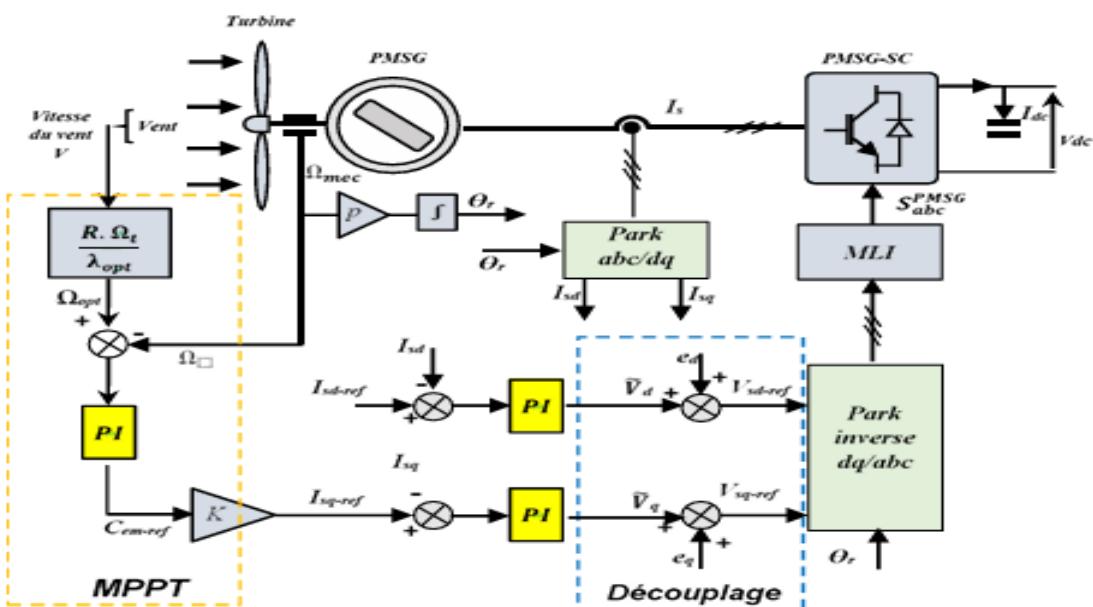


Figure (III.8) : Schéma bloc détaillé de la commande du convertisseur côté GSAP.

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

### III.4.2 Commande vectorielle direct par compensation :

#### III.4.2.1 Découplage par compensation :

L'alimentation en tension est obtenue en imposant les tensions de référence à l'entrée de la commande de l'onduleur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de l'onduleur de manière à ce que les tensions délivrées par cet onduleur aux bornes des phases du réseau soient les plus proches possible des tensions de référence. Mais, il faut définir des termes de compensation, car, dans les équations statoriques, il y a des termes de couplage entre les axes  $d$  et  $q$ . Ces tensions peuvent être écrites sous les formes suivantes :

[50]

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III.19)$$

Les tensions  $V_d$  et  $V_q$  dépendent à la fois des courants sur les axes «  $d$  » et «  $q$  », on est donc amené à implanter un découplage. Ce découplage est basé sur l'introduction de termes compensatoires  $e_d$  et  $e_q$ .

On a :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad (III.20)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d)i_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q)i_q \end{cases} \quad (III.21)$$

Et

$$\begin{cases} e_d = \omega L_q i_q \\ e_q = \omega (L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (III.22)$$

On a donc les courants «  $i_d$  » et «  $i_q$  » sont découplés. Le courant  $i_d$  ne dépend que de  $V_{d1}$ , et  $i_q$  ne dépend que de  $V_{q1}$ , à partir de l'équation (III.21) les courants «  $i_d$  » et «  $i_q$  » s'écrivent comme suit:

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{R_s + sL_d} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{R_s + sL_q} \end{cases} \quad (III.23)$$

Le principe de régulation consiste à réguler les courants statoriques à partir des grandeurs de référence (désirées) par des régulateurs classiques. Le schéma de principe de régulation des courants statoriques est représenté par la figure (III.9).

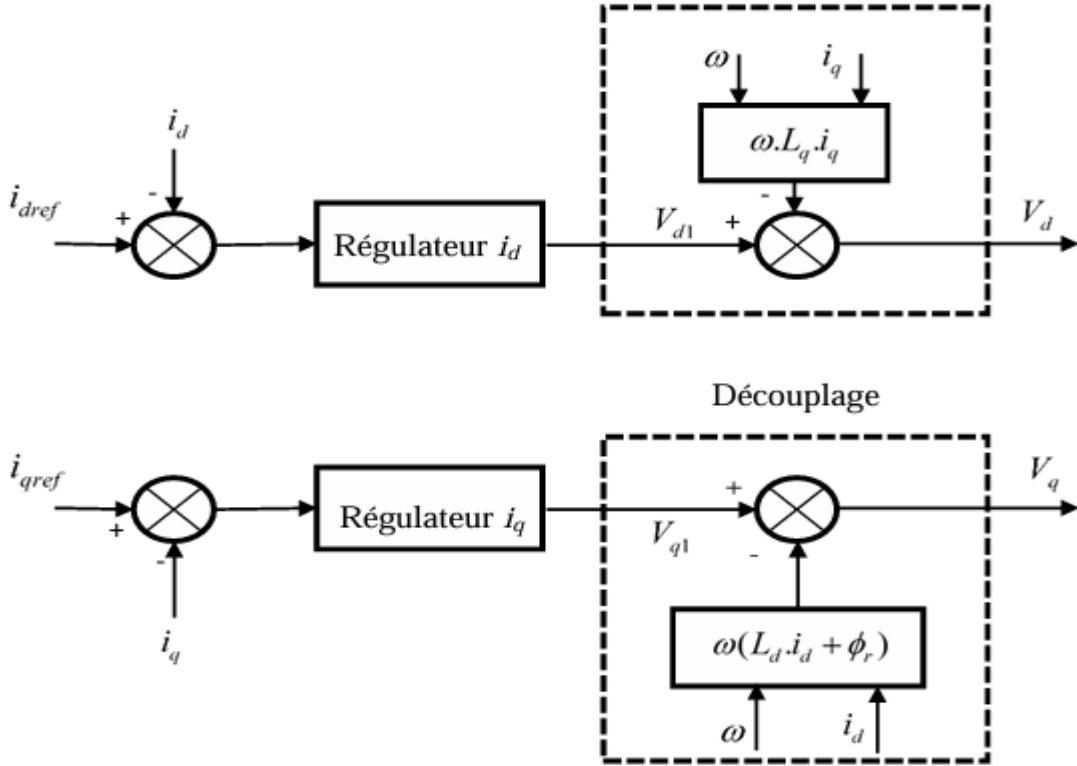


Figure (III.9) : Principe de découplage par compensation

**V<sub>d1</sub>** : La tension à la sortie de régulateur de courant «*i<sub>d</sub>*».

**V<sub>q1</sub>** : La tension à la sortie de régulateur de courant «*i<sub>q</sub>*».

#### a. Calcul des courants de référence :

Dans les conditions de fonctionnement à couple constant, le courant *i<sub>d</sub>* est généralement nul, afin de maintenir un équilibre optimal entre rendement et performance [50].

$$i_{dref}=0 \quad \text{et} \quad i_q=i_s. \quad (III.24)$$

$$\text{Donc :} \quad \Phi_{qs}=\Phi_f \quad (III.25)$$

La forme du couple électromagnétique à flux constant :

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

$$C_{em} = K_t I_q \quad (III.26)$$

Le couple est directement proportionnel à  $I_{qs}$  :

$$K_t = \frac{3}{2} p \Phi f \quad (III.27)$$

le courant en quadrature de référence est égale:

$$I_{q_{ref}} = C_{em_{ref}} / K_t \quad (III.28)$$

Ou  $C_{em_{ref}}$  est issue du régulateur de vitesse

b. Calcule des paramètres des Régulateurs des courants  $I_d$ :

Le schéma de commande des courants de la commande vectorielle se réduit à deux boucles distinctes comme l'indique la figure (III.10)[51] :

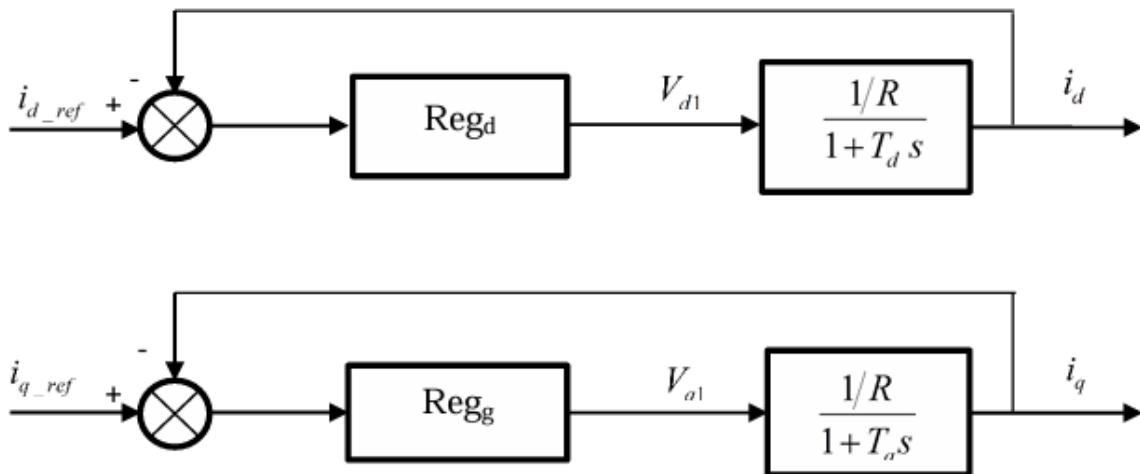


Figure (III.10) : Commande des courants  $i_d$  et  $i_q$  en deux boucles indépendantes.

A partir des équations liées aux systèmes (II.29), on peut écrire les fonctions de transfert suivantes :

$$\begin{cases} F_d(s) = \frac{1}{1 + T_d s} = \frac{i_d}{V_{d1}} \\ F_q(s) = \frac{1}{1 + T_q s} = \frac{i_q}{V_{q1}} \end{cases} \quad (III.29)$$

Avec :

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

$$\begin{cases} T_d = \frac{L_d}{R} \\ T_q = \frac{L_q}{R} \end{cases} \quad (III.30)$$

Les régulateurs ( $Reg_d$  et  $Reg_q$ ) sont choisis comme étant des régulateurs proportionnels et intégrales, avec des fonctions de transfert de la forme suivante :

$$\begin{cases} Reg_d(s) = \frac{K_{id}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s \right) \\ Reg_q(s) = \frac{K_{iq}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pq}}{K_{iq}} s \right) \end{cases} \quad (III.31)$$

Les fonctions de transfert en boucle ouverte sont donnée par :

$$\begin{cases} FTBO_d = \frac{K_{id}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pd}}{K_{id}} s \right) \frac{1}{1 + T_d s} \\ FTBO_q = \frac{K_{iq}}{s} \left( 1 + \frac{K_{pq}}{K_{id}} s \right) \frac{1}{1 + T_q s} \end{cases} \quad (III.32)$$

La démarche à suivre consiste à procéder à la compensation de la constante de temps du système, en posant :

$$\begin{cases} \frac{K_{pd}}{K_{id}} = T_d \\ \frac{K_{pq}}{K_{iq}} = T_q \end{cases} \quad (III.33)$$

Les fonctions de transfert en boucle fermé (FTBF) sont données par :

$$\begin{cases} FTBF_d = \frac{1}{1 + \tau_d s} = \frac{i_d}{i_{dref}} \\ FTBF_q = \frac{1}{1 + \tau_q s} = \frac{i_q}{i_{qref}} \end{cases} \quad (III.34)$$

Avec :

$$\begin{cases} \tau_d = \frac{R}{K_{id}} \\ \tau_q = \frac{R}{K_{iq}} \end{cases} \quad (III.35)$$

Les boucles de courants correspondent donc à un premier ordre, il suffit de fixer la dynamique du système à travers un choix approprié de  $\tau_d$  et  $\tau_q$ . Celles-ci sont choisies de

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

manière à ce que la constante de temps du système en boucle fermée régulé soit inférieure à la constante de temps en boucle ouverte. Généralement le temps de réponse dans un système de premier ordre est de  $Tr = 3\tau$  [52] :

$$Tr = \frac{3 \cdot R_s}{K_{id}} \quad (III.36)$$

• Pour le courant  $i_d$ :

$$K_{id} = \frac{3 \cdot R_s}{3\tau} = \frac{R_s}{\tau} \quad (III.37)$$

Avec :

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} \quad (III.38)$$

• Pour le courant  $i_q$ :

$$\begin{aligned} K_{iq} &= \frac{3 \cdot R_s}{3\tau} = \frac{R_s}{\tau} \\ K_{pq} &= \frac{L_q K_{iq}}{R_s} = \frac{3 L_q}{3\tau} = \frac{L_q}{\tau} \end{aligned} \quad (III.39)$$

#### III.5. Contrôle du convertisseur coté réseau :

La puissance cinétique extraite du vent est assistée par l'onduleur de tension triphasé qui assure la phase de l'injection et qui doit maintenir la tension du bus continu constante, et il doit commander les interrupteurs statiques afin d'injecter la puissance au réseau, avec un facteur de puissance plus proche de l'unité. En négligeant les pertes statorique du GSAP, ainsi que celles du redresseur MLI.

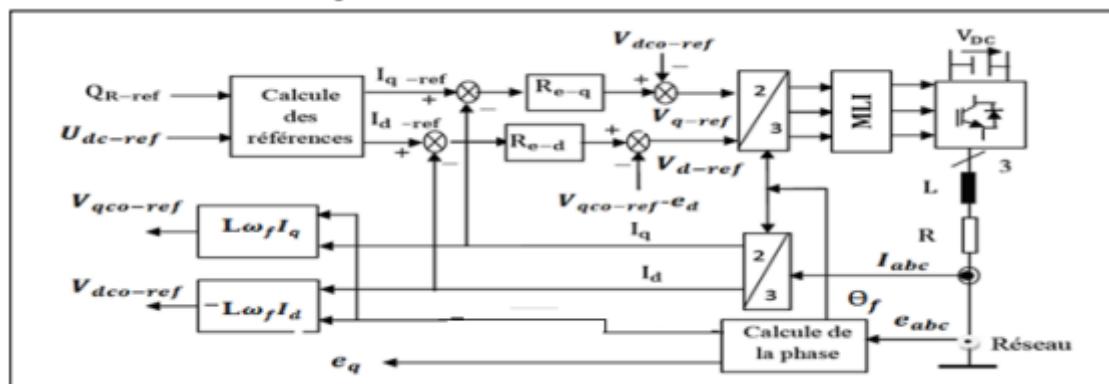


Figure (III.11): Schéma bloc du contrôle du convertisseur coté réseau.

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

### III.5.1. Régulateur de la tension du bus continu :

La boucle de régulation de la tension de bus continu peut être représentée dans la figure (III.12).

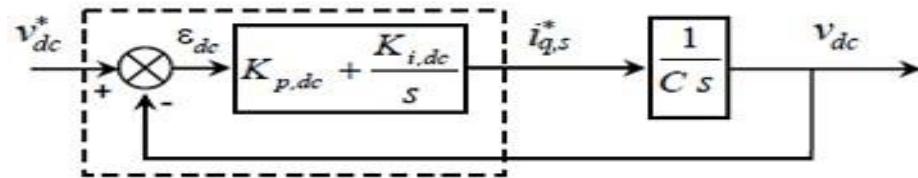


Figure ( III.12) : Boucle de régulation de la tension de bus continu.

En fait, les erreurs ( $V_{dc}^* - V_{dc}$ ) sont traitées par le correcteur PI, afin de concevoir le courant  $i_{dc}$ . En utilisant la transformation de Laplace, La fonction de transfert en boucle fermée est donnée comme suit [53] :

$$FTBF = \frac{\frac{1}{C}(K_{p\_dc} \cdot s + K_{i\_dc})}{s^2 + s\left(\frac{K_{p\_dc}}{C}\right) + \frac{K_{i\_dc}}{C}} \quad (III.40)$$

Par identification à la forme canonique du 2ème ordre dont l'équation caractéristique est représenté comme suit :

$$s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2 \quad (III.41)$$

On trouve :

$$\begin{aligned} K_{p\_dc} &= 2\xi\omega_0 C \\ K_{i\_dc} &= \omega_0^2 C \end{aligned} \quad (III.42)$$

### III.5.2. Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis

Dans le présent travail, la commande rapprochée de l'onduleur est obtenue via une régulation par hystérésis des courants du réseau.

Pour permettre ceci, les courants triphasés de références sont synthétisés ainsi :

### Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

$$\begin{cases} I_a^* = I_{max} \sin(\theta) \\ I_b^* = I_{max} \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ I_c^* = I_{max} \sin\left(\theta - \frac{4}{3}\pi\right) \end{cases} \quad (III.43)$$

Où  $I_{max}$  et  $\theta$  désignent respectivement la valeur crête du courant du réseau et sa phase.

Pour chaque bras de l'onduleur, les interrupteurs  $S_i$  et  $S'_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) sont reliés, l'un à la sortie d'un comparateur à hystérésis, l'autre à cette même sortie via un inverseur ; où le changement de signe de la différence entre le courant de référence et le courant mesuré n'entraîne pas instantanément le basculement du comparateur à cause de l'effet d'hystérésis, c'est-à-dire que le courant mesuré évolue jusqu'à ce qu'il soit égal à sa référence, selon une fourchette  $h$  ( **$h$  est la largeur de la bande d'hystérésis**). Le comparateur bascule alors, et l'autre interrupteur rentre en conduction à son tour tant que  $\Delta i < h$ . Une telle commande est simple dans sa philosophie, et robuste en implémentation, car elle déduite indépendamment de la modélisation du système. La figure (III.12) illustre le schéma de principe [54].

Les fonctions de connexion des trois commutateurs statiques  $F_j$  ( $j=1, 2, 3$ ) de l'onduleur sont définies en termes des variations des courants mesurés  $I_j$  de la façon suivante :

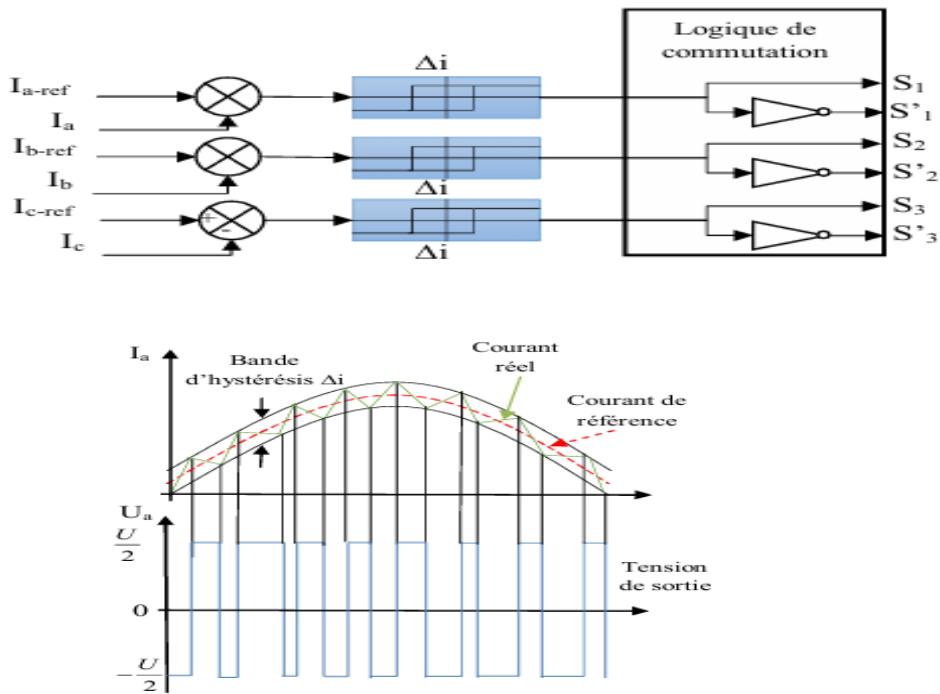
$$\begin{cases} F_j = -1 & \text{si } i_j \geq i_{ref} + \Delta i \\ F_j = 1 & \text{si } i_j \leq i_{ref} - \Delta i \\ F_j = F_{j-1} & \text{si } i_j = i_{ref} \end{cases} \quad (III.44)$$

La fréquence de commutation des interrupteurs dépend de la tension continue appliquée à l'entrée de l'onduleur, de l'inductance du filtre côté réseau et de la bande d'hystérésis  $\Delta i$ . Les pertes de commutation de l'onduleur sont proportionnelles à cette fréquence, qui est directement proportionnelle à la bande d'hystérésis.

La fréquence maximale obtenue est donnée par l'expression suivante :

$$f_{max} = \frac{V_{DC}}{8L_r \Delta i} \quad (III.45)$$

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne



Figure(III.13) : Synoptique de la régulation par hystérésis.

### III.5.3 Calcul des courants de référence

Les courants triphasés de référence ( $i_{a\_ref}$ ,  $i_{b\_ref}$ ,  $i_{c\_ref}$ ) sont calculés selon l'hypothèse d'un transfert d'énergie sans pertes (onduleur idéal), alors que l'angle électrique du réseau  $\theta$  est déduit via un circuit de verrouillage de phase PLL.

On suppose que la puissance à l'entrée du bus continu  $P_{dc}$  est égale à la puissance coté alternatif de l'onduleur  $P_{ac}$

Avec :

$$P_{dc} = P_{ac} \quad (III.46)$$

$$P_{dc} = V_{dc} \cdot I_{g\_ref} \quad (III.47)$$

$$I_{g\_ref} = I_{red} - I_{c\_ref} \quad (III.48)$$

Les puissances active et réactive dans le repère de Park sont données par :

$$\begin{cases} P_{AC\ ref} = V_{g\_d} \cdot I_{d\_ref} + V_{g\_q} \cdot I_{q\_ref} \\ Q_{AC\ ref} = V_{g\_q} \cdot I_{d\_ref} - V_{g\_d} \cdot I_{q\_ref} \end{cases} \quad (III.49)$$

En injectant seulement la puissance active, les courants de référence seront :

$Q_{AC\ ref} = 0$  implique  $I_{q\_ref}$  est imposée égale à zero

## Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne

$$I_{d\_ref} = \frac{P_{dc}}{V_{g\_d}} \quad (III.50)$$

En transformant les courants de référence :  $I_{d\_ref}$ ,  $I_{q\_ref}$  aux courants réels, réels  $I_{a\_ref}$ ,  $I_{b\_ref}$ ,  $I_{c\_ref}$  par la transformation inverse de Park, on aboutira à la commande hystérésis de l'onduleur. avec l'angle électrique du réseau  $\theta$  es déduite via un circuit de verrouillage de phase PLL.

### III.5.4. Synchronisation du courant de l'onduleur avec la tension du réseau :

La connexion du système éolien au réseau électrique nécessite la synchronisation du courant généré à la sortie de l'onduleur avec la tension du réseau pour cela une boucle de contrôle à verrouillage de phase (PLL conventionnelle) est utilisée. Cette boucle est basée sur l'estimation de la phase de tension instantanée du réseau, par l'élimination de la composante en quadrature de la tension du réseau, donc la phase estimée est alignée avec la composante directe  $U_d$  de la tension. Cette méthode présente quelques inconvénients dans le cas d'un déséquilibre de tension ou de la présence de défauts côté réseau .Pour cette étude, nous supposons que le réseau fonctionne dans les conditions idéales.

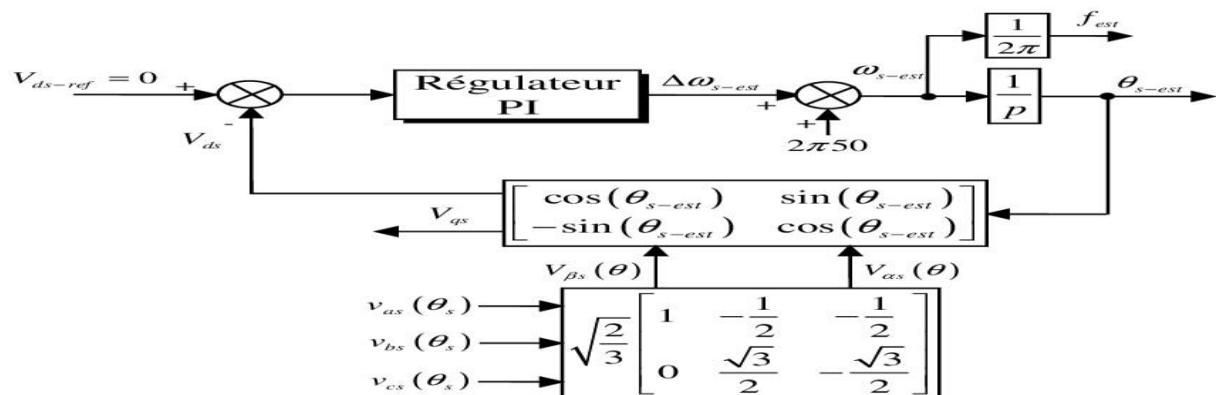


Figure (III.14) : Schéma bloc d'une PLL conventionnelle.

### II.6. Conclusion

La commande de la chaîne de conversion éolienne joue un rôle essentiel dans l'optimisation de la production d'énergie à partir de la ressource éolienne, naturellement variable et intermittente. À travers ce chapitre, nous avons mis en évidence les stratégies de commande les plus efficaces pour maximiser la puissance extraite du vent, assurer un fonctionnement stable du générateur, et garantir une injection de qualité sur le réseau électrique.

L'utilisation de la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking), qu'elle soit basée sur l'asservissement de la vitesse, le contrôle du couple électromagnétique ou encore des

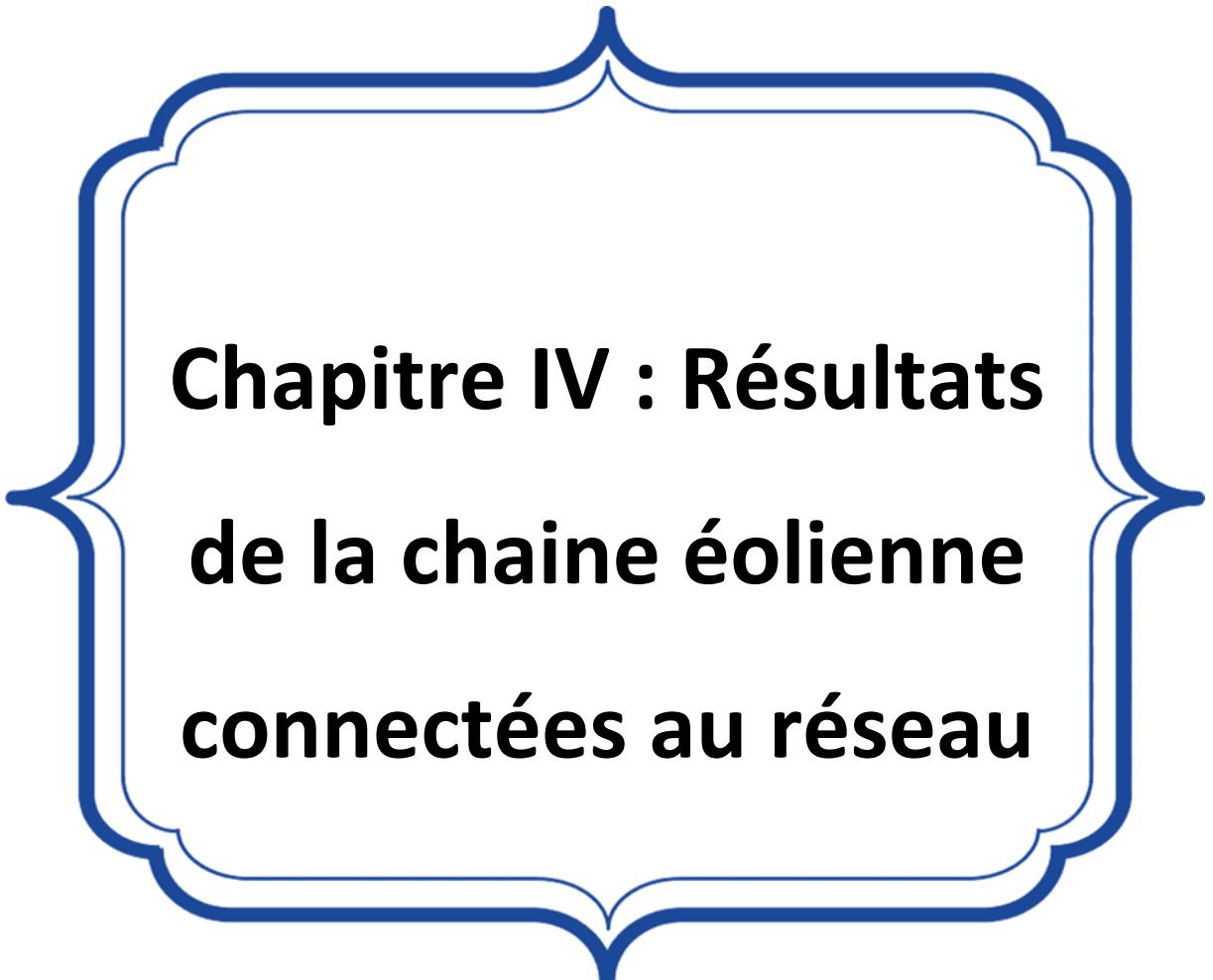
### **Chapitre III: Commande de la chaîne de conversion éolienne**

---

*algorithmes adaptatifs tels que P&O, permet de suivre en temps réel le point de fonctionnement optimal. De plus, la commande vectorielle du générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) assure un contrôle précis des courants statoriques, améliorant ainsi les performances énergétiques et dynamiques du système.*

*Enfin, les régulations appliquées au convertisseur côté réseau – incluant la synchronisation via PLL, la commande des courants par hystérésis, et la régulation de la tension du bus continu – permettent une intégration efficace et conforme aux exigences des réseaux modernes.*

*En somme, une stratégie de commande bien conçue permet non seulement d'exploiter au mieux le potentiel éolien, mais aussi de renforcer la fiabilité, l'efficacité et la qualité de l'énergie injectée, tout en répondant aux standards de stabilité imposés par les réseaux électriques actuels.*



# **Chapitre IV : Résultats de la chaîne éolienne connectées au réseau**

### IV.1 .Introduction

Pour compléter l'étude théorique présentée précédemment et valider les algorithmes des commandes, on présente dans cette partie les résultats de simulation numérique illustrant le comportement de la machine synchrone associé à une turbine Alimentant une charge, présentant la partie le CCR avec le réseau. Ce système a été simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK et les simulations conduites servent à remplir les objectifs suivants :

- L'extraction maximale de la puissance aérodynamique par algorithme MPPT.
- Un contrôle découpé entre couple et flux de la GSAP.

Les caractéristiques de la chaîne de conversion utilisée dans la simulation sont :

On considère une machine synchrone à aimant permanent aux caractéristiques suivantes:

6 kW, 400 V, 50 Hz.

Caractéristiques électriques standards  $Rs=2.2\Omega$  ;  $Ld=0.0076$  (H) ;  $Lq=0.0076$ (H) ;  $J=0.0032$  (kgm<sup>2</sup>);  $P=4$  ;  $\phi=0.4$

La capacité de bus continue  $C_{bus} = 4700e^{-6}$  (mF)

La tension de bus continue  $V_{dc}=350$  (V)

On choisit une éolienne à 3 pâles aux caractéristiques suivantes :

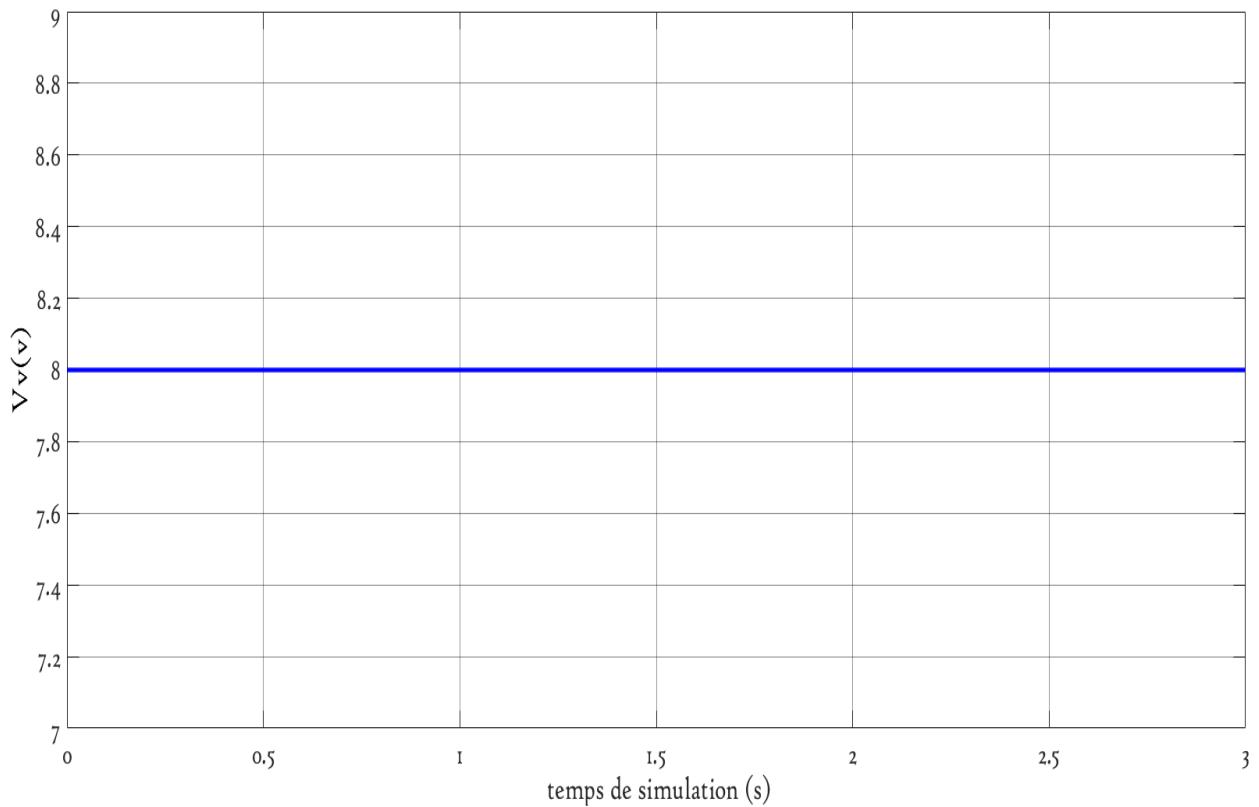
- Puissance nominale :  $PN=4$  KW
- Rayon des pâles :  $R=3$  m.
- Multiplicateur :  $G=2.2$ .
- La vitesse du vent :  $V=8$ m/s.

Le maximum de puissance reçue par l'éolienne est atteint pour  $\lambda_{max}=8.1$  qui donne  $C_{p_{max}}=0.45$  (Maximum inférieur à la limite théorique de Betz).

### *IV.2. Interprétation les résultats de simulation*

#### *IV.2.1 Résultats pour une vitesse du vent constante*

*Dans cette partie, nous simulons le système pour une vitesse de vent d'une valeur de 8m/s durant un temps de simulation de 3s, figure (IV.1)*



*figure(IV.1): La vitesse du vent appliquée au système éolien.*

#### *IV.2.1.1 Résultats de l'MPPT avec asservissement de vitesse*

*Les résultats de simulation de la figure (IV.2), montrent que la vitesse réelle du rotor de la GSAP suit parfaitement la vitesse optimale, ce qui témoigne d'un contrôle efficace et par conséquent une parfaite optimisation de la puissance de la turbine figure (IV.3).*

## Chapitre IV : Résultats de la chaîne éolienne connectées au réseau

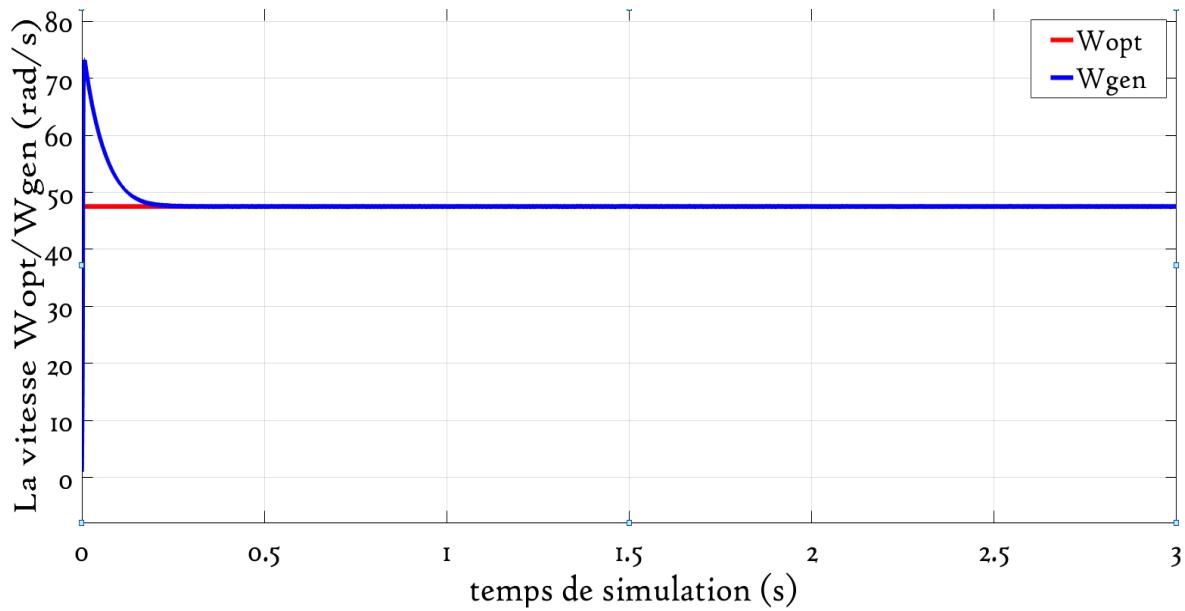


figure (IV.2): Allures de la vitesse optimale avec la vitesse de rotation de la génératrice

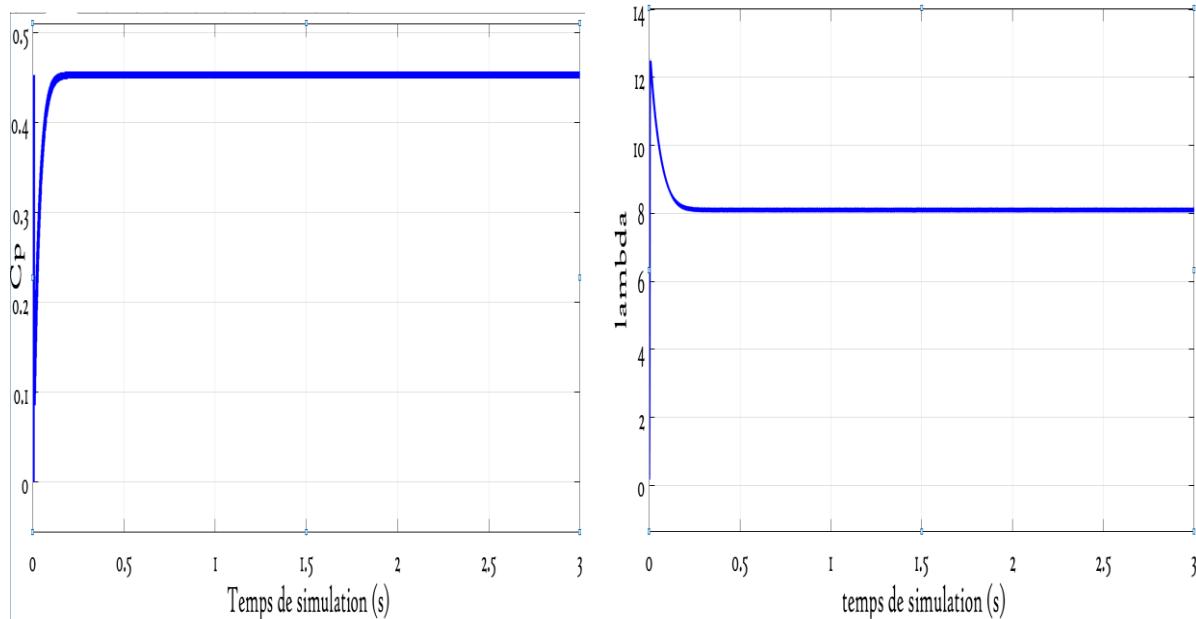


Figure (IV.3) : variation de  $C_p$  et  $\lambda$  pendant la simulation

### IV.2.1.2 Résultats du control vectoriel de la GSAP

La figure (IV.4) représente les allures des courants direct et en quadrature de la GSAP avec leurs références. Les courants dans le repère (dq) de la génératrice suivent précisément leurs consignes en régime permanent après quelques oscillations d'un régime transitoire court acceptable. Le courant  $i_{ds}$  est bien maintenu à la valeur zéro ( $i_{dsref}$ ), tandis que le

## Chapitre IV : Résultats de la chaîne éolienne connectées au réseau

Le courant  $i_{qs}$  est égal à la valeur  $i_{qsref}$  calculée du Cemref issu de la régulation de la vitesse.

Ce control vectoriel est assuré par des simples régulateurs PI.

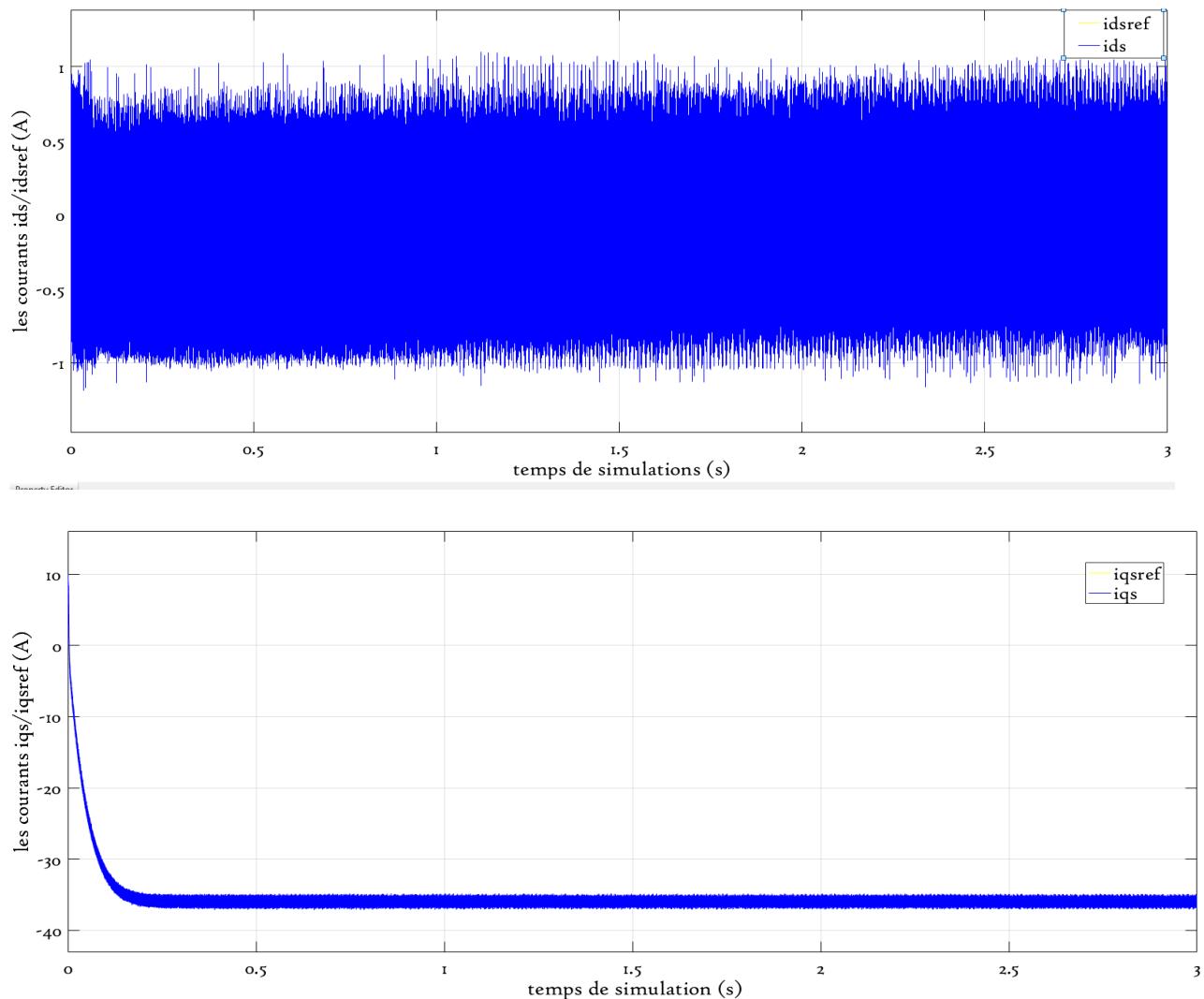


figure (IV.4): Les courants  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  dans la GSAP.

La figure (IV.5) montre les courbes du couple côté turbine ( $C_g$ ) avec le couple électromagnétique de la génératrice ( $C_{em}$ ). Le signe négatif des couples montre bien le fonctionnement générateur. On constate que le couple ( $C_g$ ) est légèrement supérieur au  $C_{em}$ , ceci est du au couple de frottement. En régime permanent et selon l'équation dynamique  $C_g = C_{em} + f\Omega g$

## Chapitre IV : Résultats de la chaîne éolienne connectées au réseau

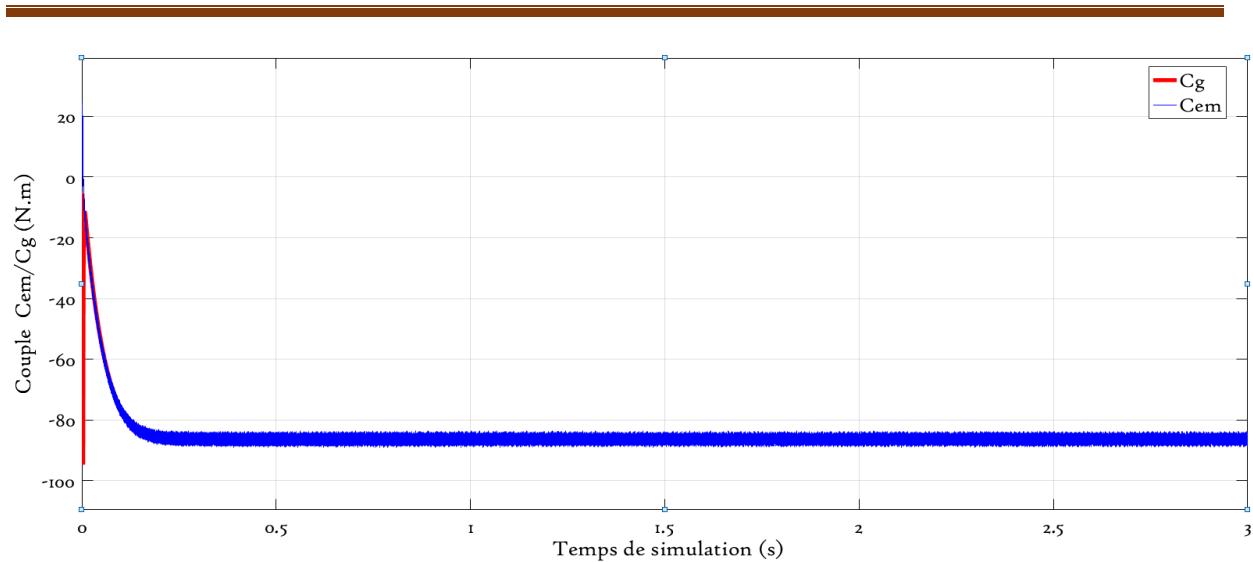


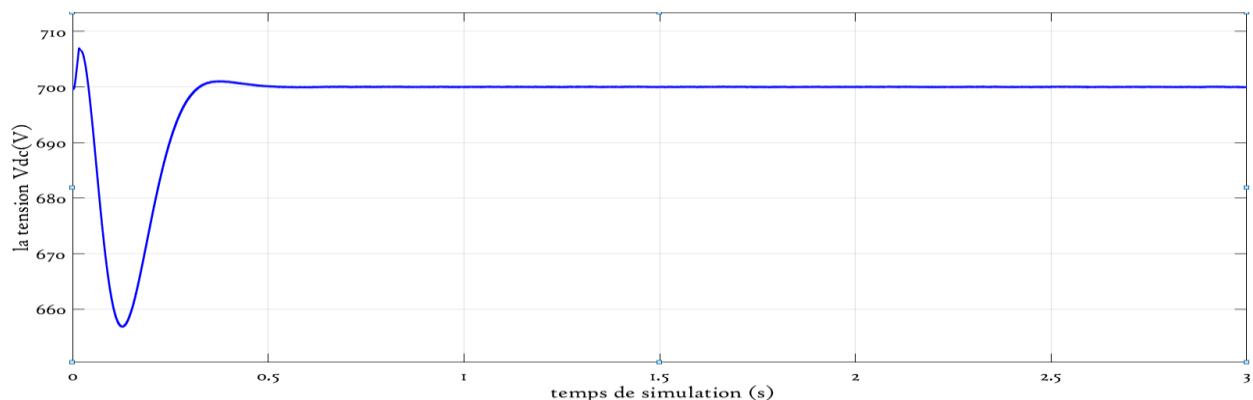
Figure (IV.5): Couple électromagnétique (Cem) avec le couple côté turbine (Cg)

### IV.2.2 Résultats dans le côté réseau

La figure (IV.6) montre la tension de bus continu , dans la phase transitoire (0 à ~0.2 s) ;On observe des variations rapides de la tension Vdc dans cette phase initiale ;Cela correspond à l'établissement des conditions de fonctionnement du système (mise en route ou stabilisation initiale).Ce comportement est typique au démarrage des systèmes de conversion d'énergie, notamment en présence de MPPT ou de régulation DC-DC. et dans la

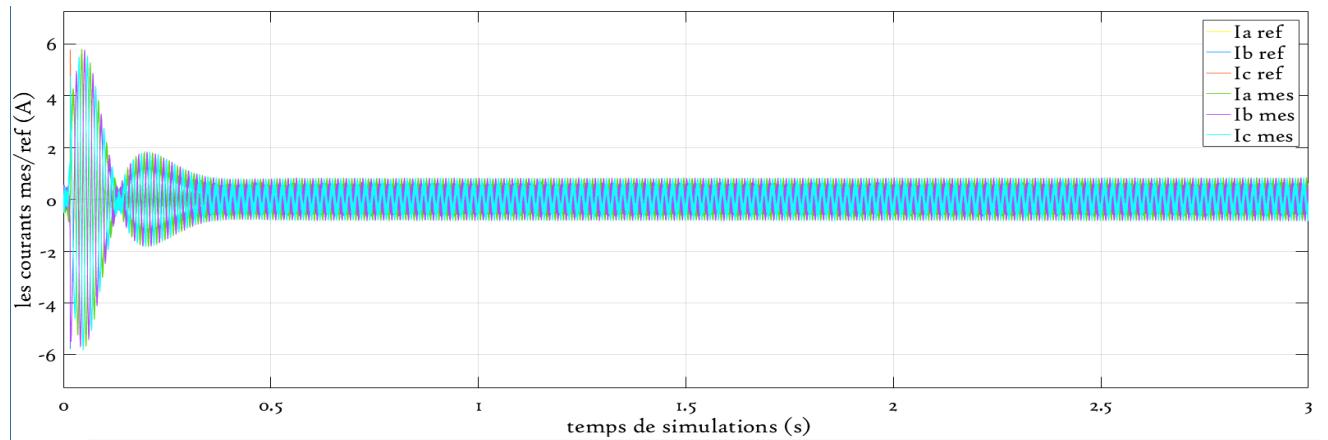
Phase stable (~0.2 s à ~2.5 s) ;La tension se stabilise autour d'une valeur moyenne, ici proche de 690 V.

Cela indique que le système a atteint un régime permanent, avec une tension continue bien régulée sur le bus DC.Cela montre aussi que le contrôleur de tension fonctionne correctement pendant cette période.



Figure(IV.6) : la tension de bus continu.

La figure(IV.7) représente les courants de références avec les courants mesurées cotée réseau, le système de commande côté réseau est précis et performant. Après une courte phase transitoire, les courants injectés dans le réseau suivent fidèlement leurs références, garantissant ainsi la qualité de l'énergie injectée et la stabilité du système.



Figure(IV.7) : les courants références avec les courants mesurées cotée réseau .

La figure(IV.8) représente les courants références et mesurées cotée réseau, les deux courbes confirment le bon fonctionnement du contrôle de courant côté réseau ;Après une courte phase de stabilisation, les courants mesurés suivent presque parfaitement les courants de référence.

donc ;

- Un temps de réponse rapide du contrôleur,
- Une commande robuste et bien réglée,
- Une injection de courant de qualité dans le réseau (sinusoïdal, équilibré, conforme aux consignes).

## Chapitre IV : Résultats de la chaîne éolienne connectées au réseau

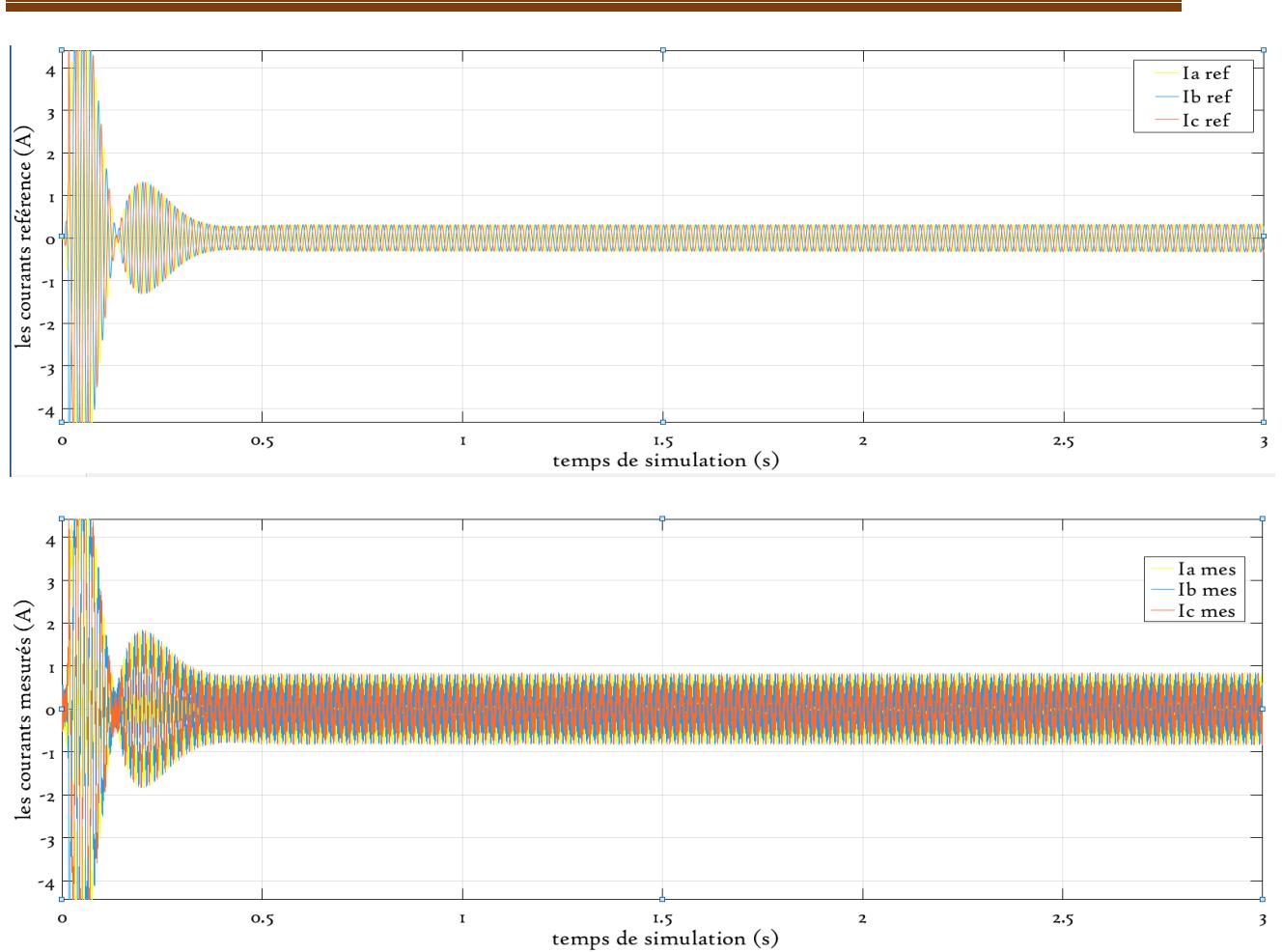


Figure (IV.8) : les courants références et mesurées cotée réseau.

### IV.3. Résultats pour une vitesse du vent variable

Dans cette partie, nous simulons le système pour une vitesse de vent variable durant un temps de simulation de 3s, figure (IV.9)

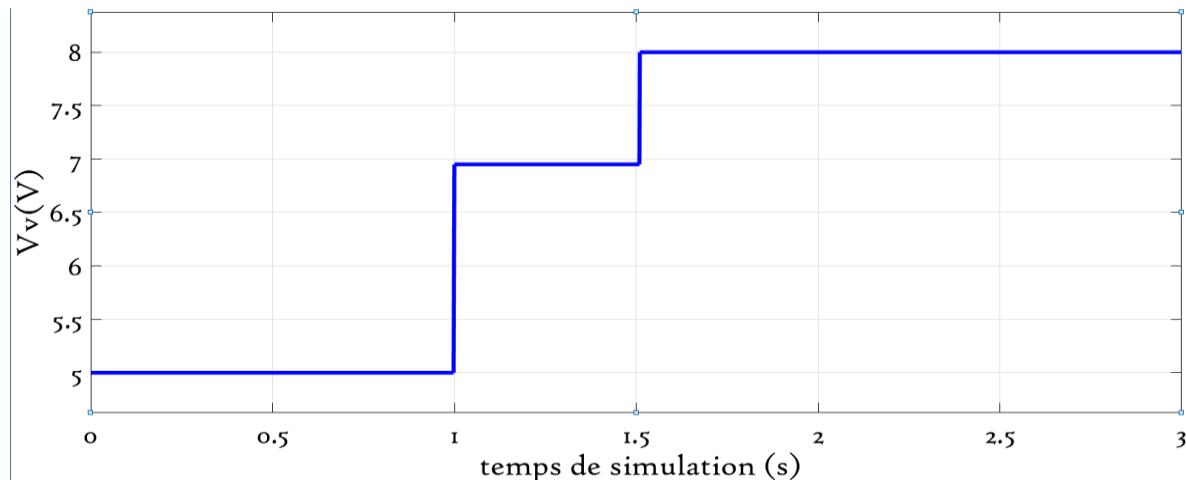


Figure (IV.9): La vitesse du vent appliquée au système éolien

### IV.3.1 Résultats de l'MPPT avec asservissement de vitesse

Les résultats de simulation de la figure (IV.10), montrent que la vitesse réelle du rotor de la GSAP suit parfaitement la vitesse optimale, ce qui témoigne d'un contrôle efficace et par conséquent une parfaite optimisation de la puissance de la turbine figure (IV.11).

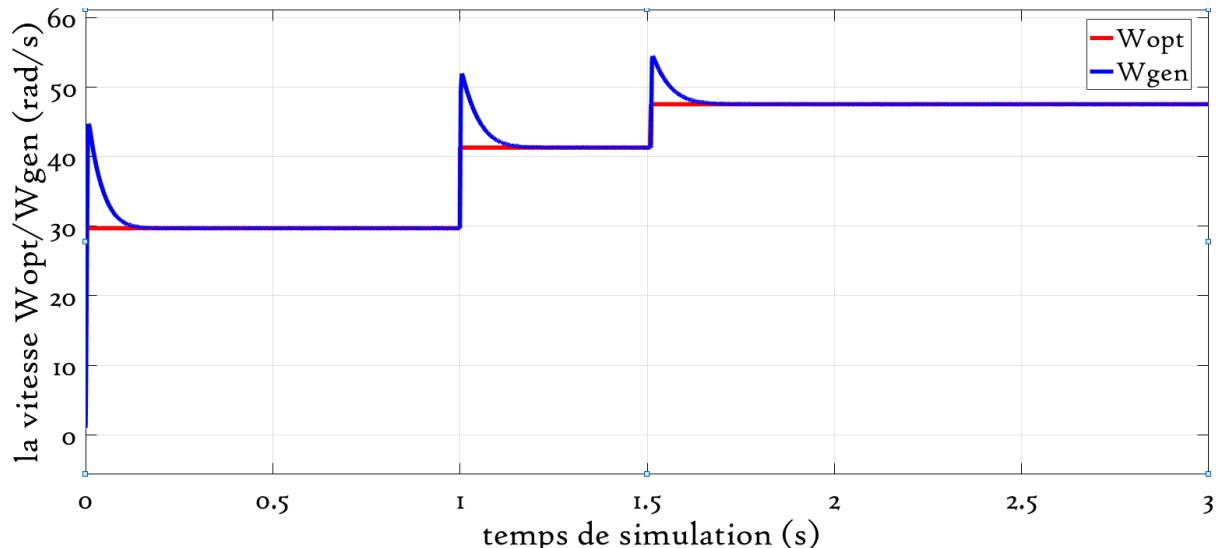


Figure (IV.10): Allures de la vitesse optimale avec la vitesse de rotation de la génératrice

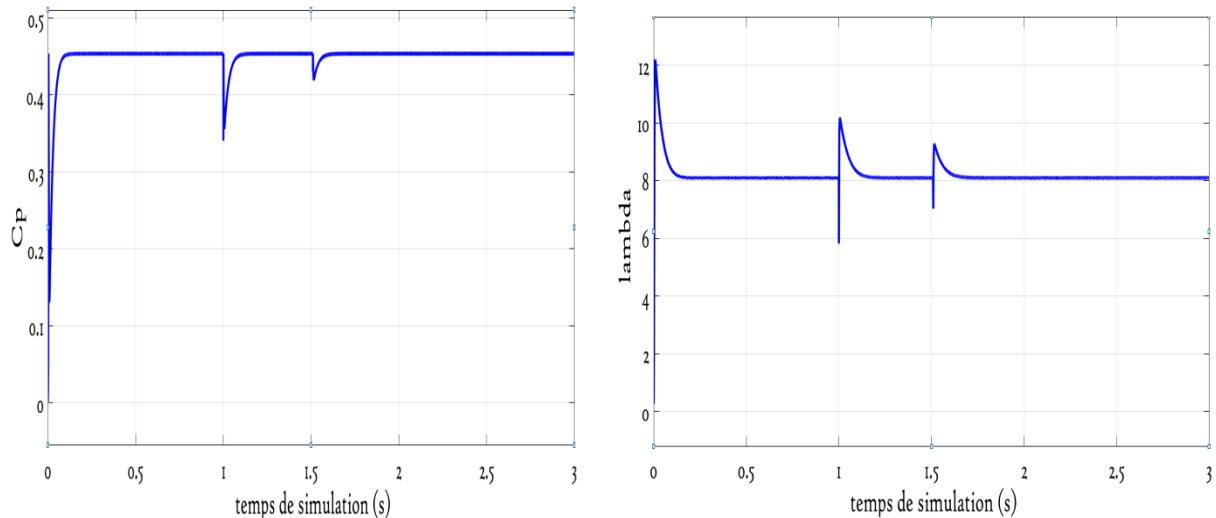


Figure (IV.11): Évolution du coefficient de puissance ( $C_p$ ) et de la vitesse spécifique ( $\lambda$ )

#### IV.3.1.1 Résultats du control vectoriel de la GSAP

La figure (IV.12) représente les allures des courants direct et en quadrature de la GSAP avec leurs références. Les courants dans le repère (dq) de la génératrice suivent précisément

leurs consignes en régime permanent après quelques oscillations d'un régime transitoire court acceptable. Le courant  $ids$  est bien maintenu à la valeur zéro ( $idsref$ ), tandis que le courant  $iqs$  est égale à la valeur  $iqsref$  calculée du Cemref issu de la régulation de la vitesse. Ce control vectoriel est assuré par des simples régulateurs PI.

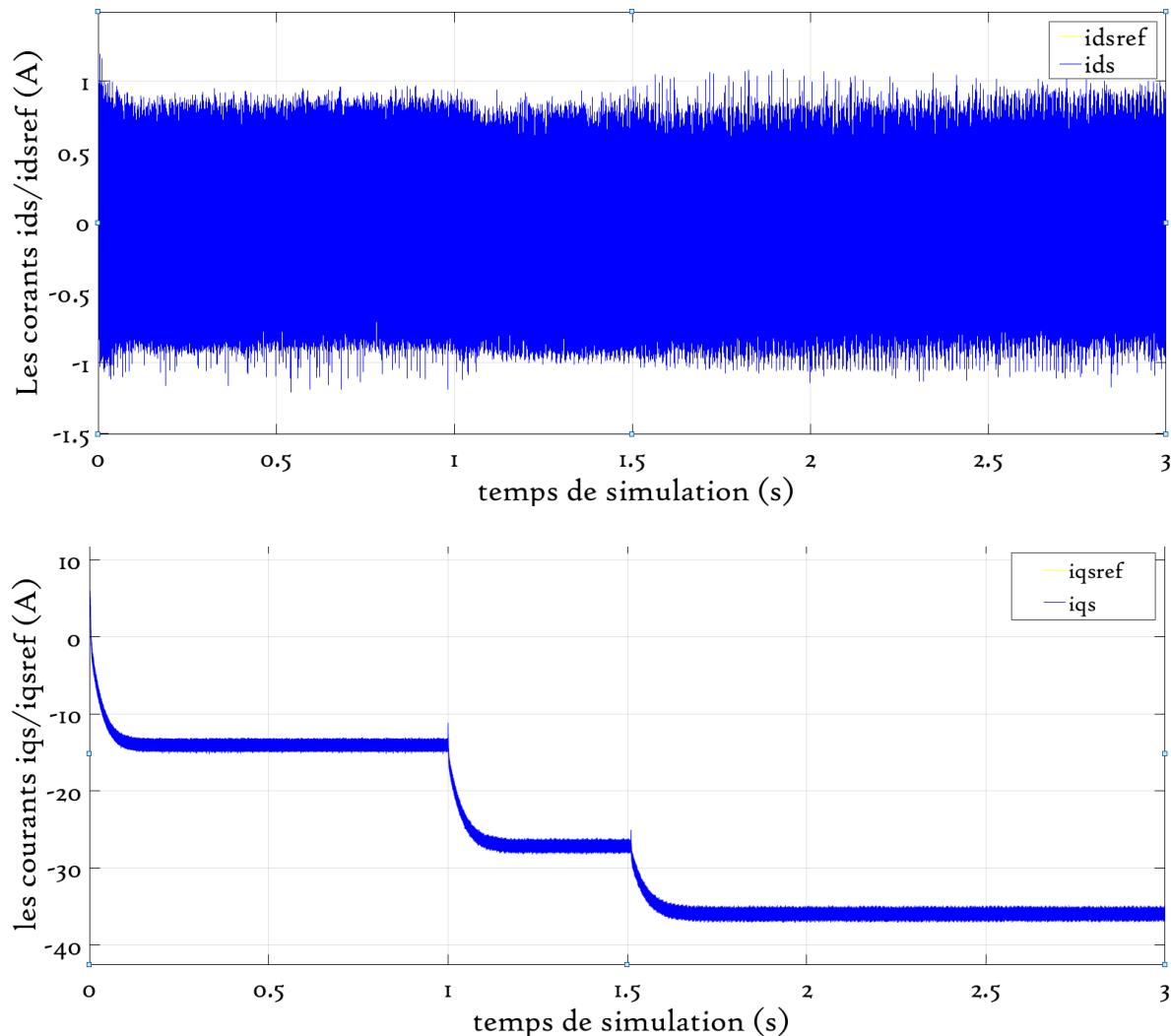


Figure (IV.12): Les courants  $ids$  et  $iqs$  dans la GSAP.

La figure (IV.13) montre les courbes du couple électromagnétique ( $Cem$ ) de la génératrice et du couple côté turbine ( $Cg$ ) en fonction du temps de simulation. On observe que les deux courbes évoluent de manière similaire avec des transitions nettes lors des changements de régime. Le signe négatif des deux couples indique clairement un fonctionnement en mode générateur.

On remarque également que le couple  $Cg$  reste légèrement supérieur au couple  $Cem$ , ce qui s'explique par la présence du couple de frottement dans le système. En régime permanent

cette différence est conforme à l'équation dynamique suivante :  $Cg = Cem + f\Omega g$

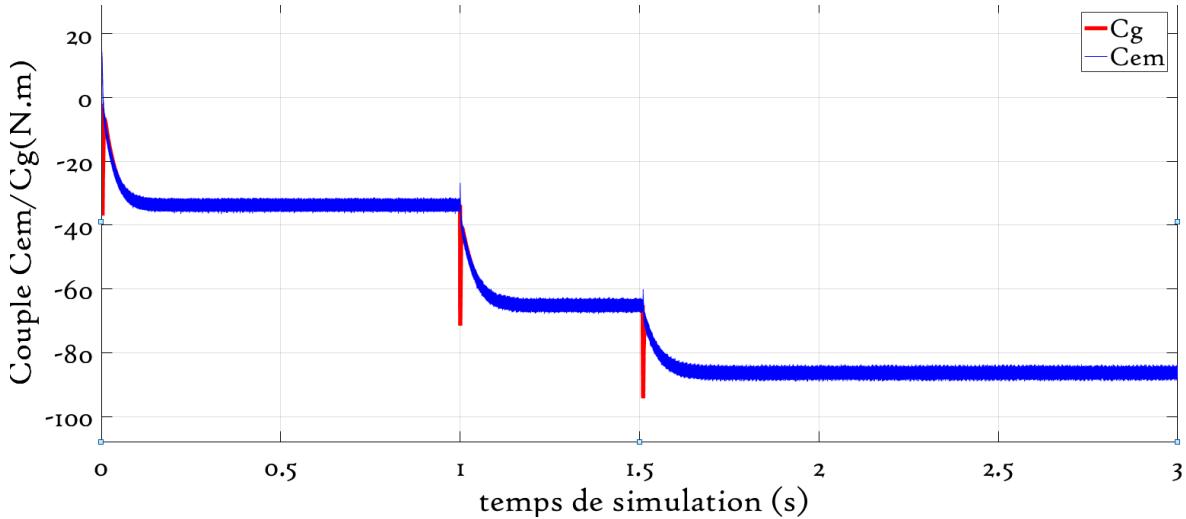
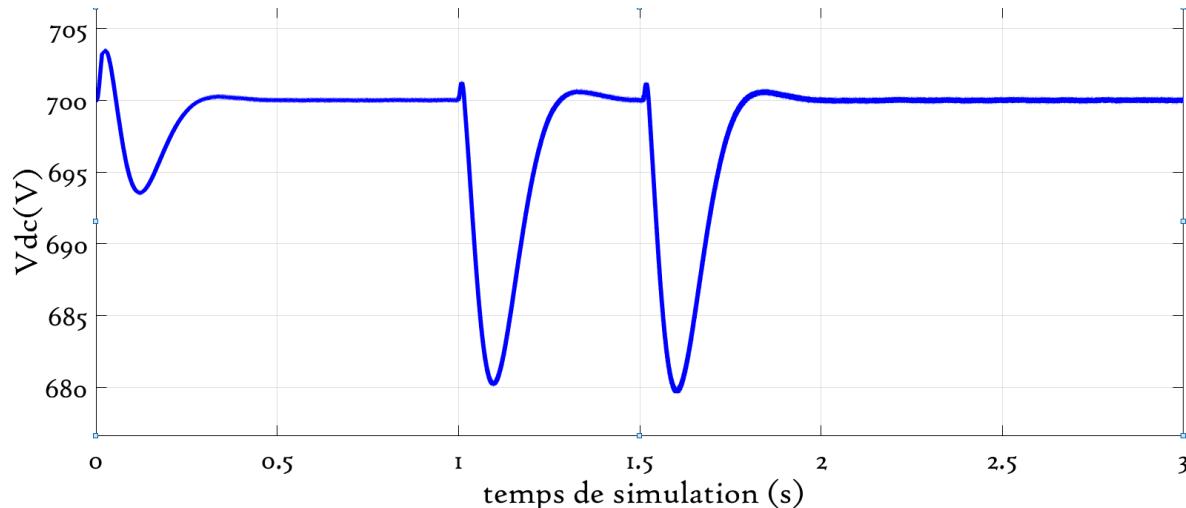


Figure (IV.13): Couple électromagnétique (Cem) avec le couple coté turbine (Cg)

### IV.3.2 Résultats dans le coté réseaux

La figure (IV.14) montre que la tension reste stable autour de 700 V, avec de légères chutes transitoires, preuve de l'efficacité



Figure(IV.14) :la tension de bus continue

Dans la figure (IV.15), les courants mesurés suivent fidèlement les courants de référence, malgré quelques perturbations transitoires autour de 1 s et 1,5 s. Cela confirme la bonne performance du régulateur. C'est ce que l'on confirme sur la figure (IV.16), qui montre

## Chapitre IV : Résultats de la chaîne éolienne connectées au réseau

une bonne concordance entre les courants de référence et mesurés, indiquant un contrôle efficace.

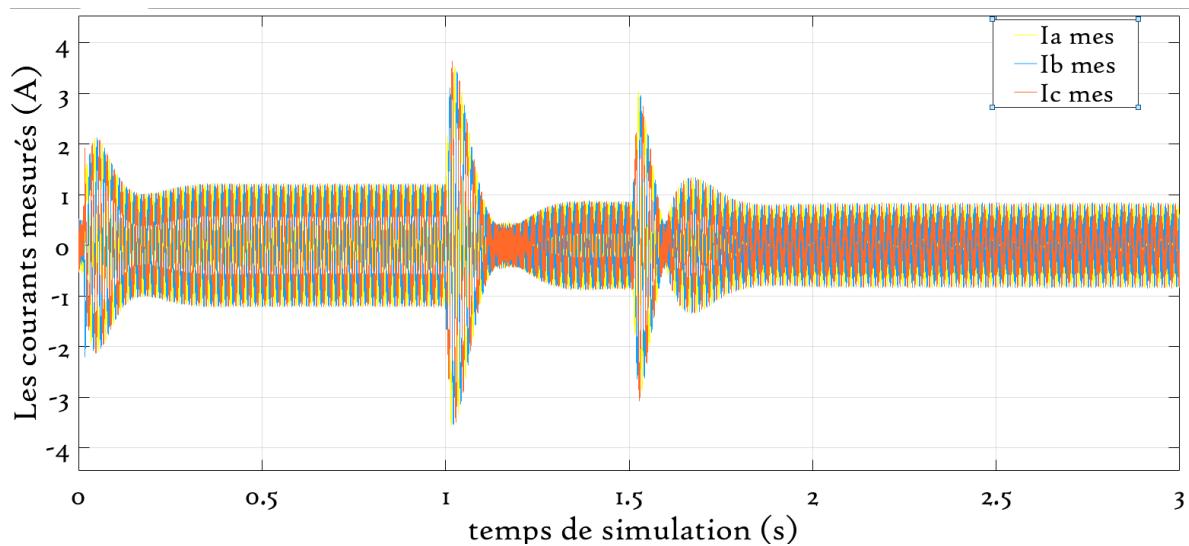
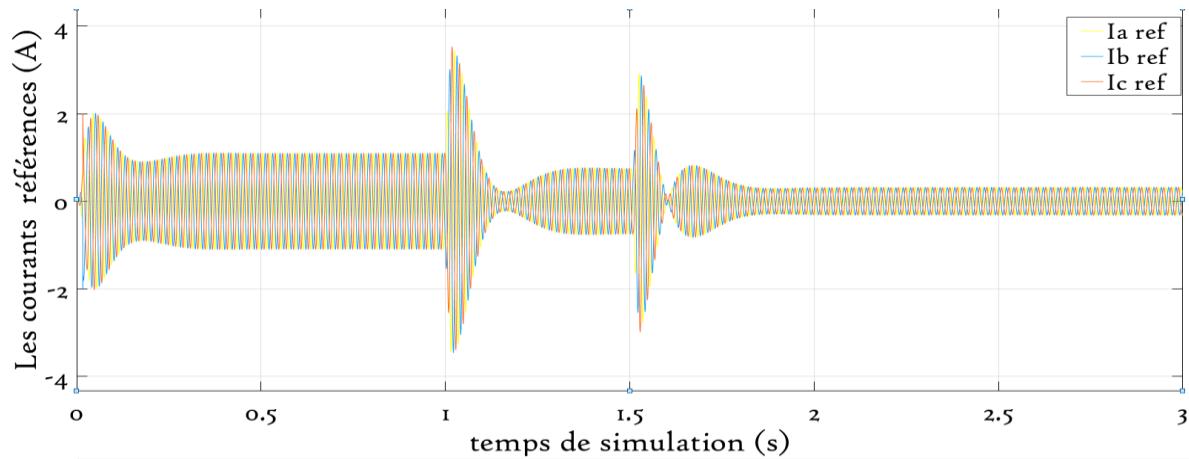
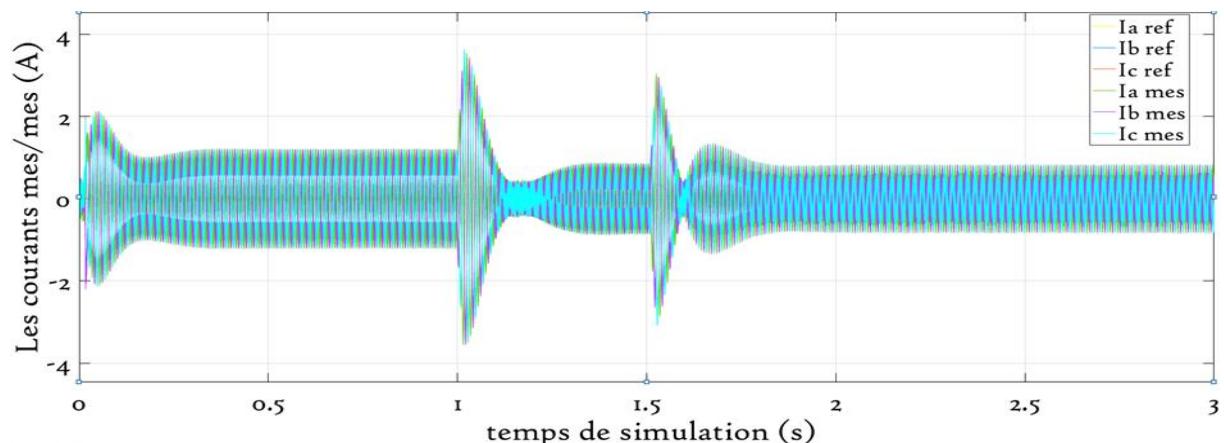


Figure (IV.15) : Les courants mesurés et références cotée réseau



Figure(IV.16) : Les courants mesurés et références dans même courbe

### IV.4. Conclusion

*Ce chapitre a permis de valider les performances de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau électrique à travers une série de simulations détaillées. Les résultats obtenus montrent une réponse dynamique satisfaisante du système, avec une régulation efficace des grandeurs électriques et mécaniques.*

*L'analyse des courbes du coefficient de puissance ( $C_p$ ) et de la vitesse spécifique ( $\lambda$ ) a mis en évidence le bon fonctionnement de l'algorithme MPPT, qui permet de maintenir la turbine à son point de fonctionnement optimal, garantissant ainsi une extraction maximale de puissance.*

*Les signaux de tension DC présentent une stabilité remarquable après une courte période transitoire, ce qui atteste du bon dimensionnement et de la performance du redresseur et du bus continu. Par ailleurs, la commande côté réseau montre un excellent suivi des courants de référence par les courants mesurés, confirmant la qualité de l'injection de courant dans le réseau, avec des formes d'ondes sinusoïdales équilibrées et bien synchronisées.*

*En résumé, les résultats obtenus démontrent que la stratégie de commande adoptée assure une conversion optimale de l'énergie éolienne, une stabilité du système, et une qualité de puissance conforme aux exigences du réseau.*

## Conclusion générale

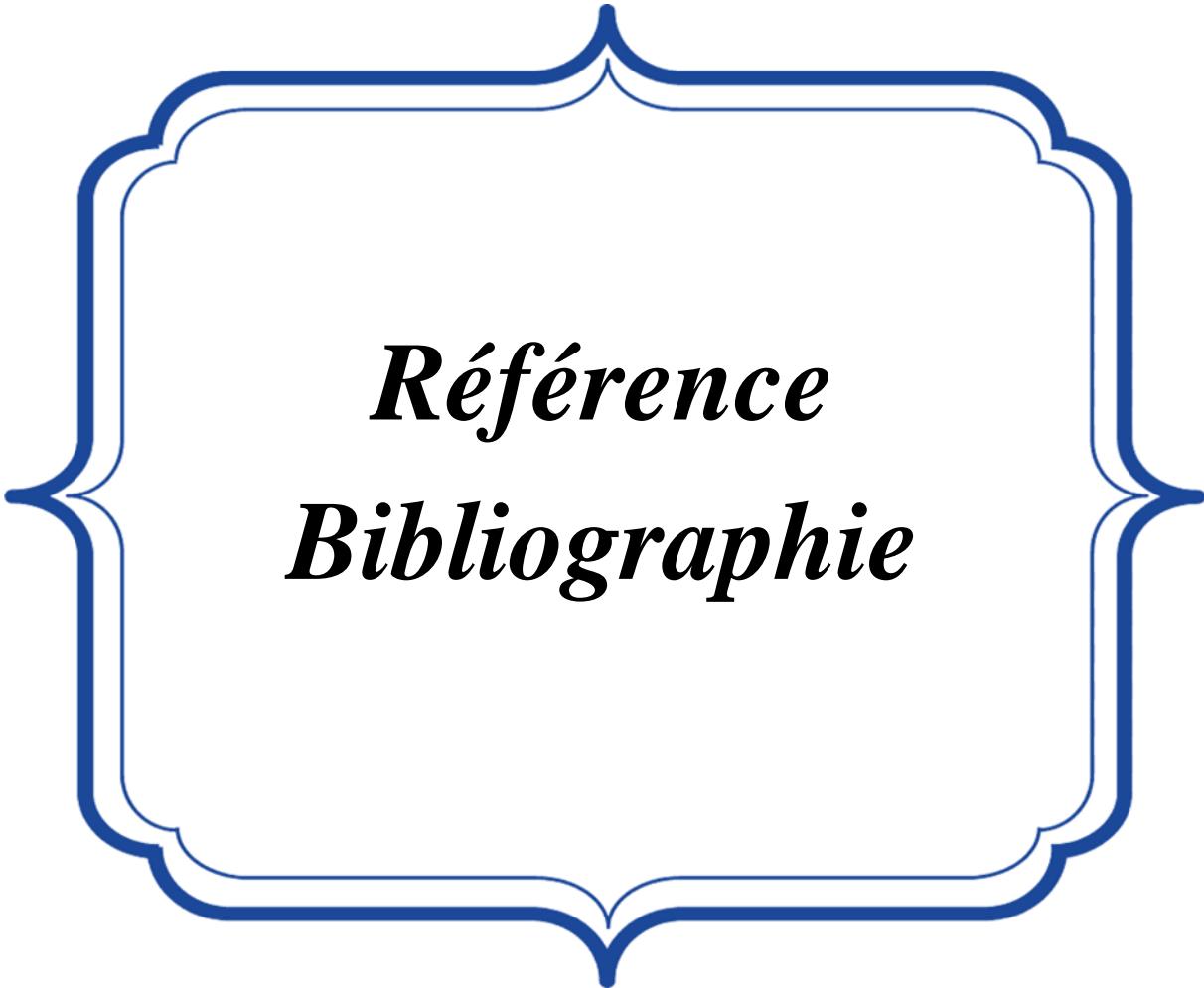
### **Conclusion**

*Dans ce travail, a été étudié le comportement du système éolien constitué d'une génératrice synchrone GSAP connectée au réseau électrique. Nous avons donné un aperçu de l'énergie éolienne dans le monde, et nous avons présenté les types d'éoliennes utilisés dans l'industrie et les avantages et les inconvénients de chaque type. La modélisation et la simulation de la turbine éolienne sous des conditions de fonctionnement variables, avec l'utilisation de la commande MPPT qui nous a permis d'extraire une puissance maximale, tout en contrôlant la vitesse mécanique et le couple de l'éolienne avec et sans asservissement de la vitesse du vent. L'étude du comportement de la GSAP ; nous avons présenté le modèle dynamique et la commande vectorielle de la GSAP entraînée par une turbine éolienne.*

*La simulation du système avec une vitesse du vent variable a montré que la stratégie de commande présentée donne des résultats très satisfaisants.*

*Les convertisseurs multiniveaux et les stratégies de commande les plus répandues ont été étudiés, avec une attention particulière portée aux onduleurs. Dans ce cadre, nous avons mené une analyse approfondie de l'onduleur en utilisant la commande par hystérésis du courant comme technique de régulation. La simulation de différents types de convertisseurs sous MATLAB/Simulink a mis en évidence l'amélioration de la qualité de l'énergie injectée, notamment grâce à la rapidité de réponse et à la capacité de suivi du courant offertes par la commande à hystérésis*

*Nous avons présenté les différentes composantes du système global de la chaîne éolienne connecté au réseau, avec les stratégies de contrôle du convertisseur côté GSAP et du convertisseur côté réseau, Ces deux stratégies nous ont permis d'obtenir une puissance extraite maximale de l'éolienne et de contrôler les puissances actives et réactives ( $P$ ,  $Q$ ) injectées au réseau par le système éolien, avec la régulation de la tension du bus continu.*



*Référence*  
*Bibliographie*

### Les références

[I] :S. El Aimani, “Modélisation De Différentes Technologies D’éoliennes Intégrées Dans Un Réseau De Moyenne Tension”, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille ,2005.

[1] *DISCOVER THE GREENTECH. Histoire de l’énergie éolienne [en ligne]*. © 2025. Disponible à l’adresse : <https://www.discoverthegreentech.com/enr/energie-eolienne/histoire/>

[2] *SIRENERGIES. L’histoire de l’énergie éolienne [en ligne]*. Disponible à l’adresse : <https://www.sirenergies.com/article/histoire-energie-eolienne/>

[3] *BEN KHELIFA, « Mohamed, Etude et conception du montage d’une ferme éolienne dans un milieu saharien (centrale KABERTENE –ADRAR-) »*. Mémoire de Master – UNIVERSITE AHMED DRAIA -ADRAR-, Département des sciences de la matière, 2015.

[4] *CHEMIDI, Abdelkarim. Analyse, modélisation et commande avancée d’une éolienne utilisée dans une ferme*. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen-, Département de Génie Électrique et Electronique, 2015.

[5] *ZOUAGHI, Iskander. Étude des performances énergétiques d’une éolienne terrestre à trois pales*. Mémoire de Master – Université Badji Mokhtar – Annaba, Faculté des Sciences de l’Ingénierat, Département de Génie Mécanique, 2021.

[6] *KHELFAT, Lotfi. Étude et simulation d’une éolienne à base d’une machine asynchrone doublement alimentée*. Mémoire de Master – Université Badji Mokhtar – Annaba, Faculté des Sciences de l’Ingénierat, Département de Génie Électrique, 2017.

[7] *BELTRAN, Brice. Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation: du mode glissant classique au mode glissant d’ordre supérieur*. Thèse de doctorat – Université de Bretagne Occidentale, Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes (LBMS), 2010.

[8] *O. De Vries, “On the theory of the horizontal axis wind turbine”, Ann. Rev. Fluid. Mech, Vol. 15, pp. 77-96, 1983.*

[9] *YAHDOU, Adil. Commande hybride par mode glissant d’ordre 2 d’un système éolien à double rotor*. Thèse de doctorat en sciences – Spécialité : Automatique. École Nationale Polytechnique, Département d’Automatique, Laboratoire de Commande des Processus, Alger, 2017.

[10] *AMMANI, Soumia, ZAIDI, Sarra et TASFAOUT, Ikram Manal. Amélioration de l’intégration d’énergie éolienne dans les réseaux électriques par l’introduction des systèmes FACTS*. Mémoire de Master – Centre Universitaire Salhi Ahmed – Naâma, Institut des Sciences et Technologies, Département de Technologie, 2020.

[11] *WINDTECH INTERNATIONAL. Global wind energy capacity grows by 117GW in 2024. 23 avril 2025*. Disponible en ligne : <https://www.windtech-international.com/industry-news/global-wind-energy-capacity-grows-by-117gw-in-2024>

[12] *Y. Djeriri, “Commande directe du couple et des puissances d’une MADA associée à un système éolien par les techniques de l’intelligence artificielle”, Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université Djillali Liabès, Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2015.*

## Référence Bibliographique

---

- [13] FRIKH, Mohamed Lamine. *Contribution à l'étude d'un système de production d'énergie éolienne. Thèse de doctorat en sciences – Spécialité : Énergies renouvelables et systèmes de stockage. Université Badji Mokhtar – Annaba, Faculté de Technologie, Département d'Électrotechnique, 2022.*
- [14] FRANCE RENOUVELABLES. *Énergie éolienne : étapes de raccordement des parcs au réseau. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-eolienne/energie-eolienne-etapes-raccordement-parcs-reseau/>*
- [15] ALIBI, Abdelali. *Modélisation, commande et optimisation énergétique d'un système à base de sources renouvelables : application aux bâtiments à basse consommation. Thèse de doctorat. Université de Batna 2, 2023.*
- [16] A. Teninge ; « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire » ; thèse de doctorat de l'INPG ; Spécialité : Génie électrique ; 04 décembre 2009.
- [17] ZIRAOUI, Salah Eddine. *Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau. Mémoire de Master en électromécanique, Université Badji Mokhtar - Annaba, 2017.*
- [18] ABB. *Générateurs à aimants permanents – Générateurs pour éoliennes. Disponible en ligne : <https://new.abb.com/motors-generators/fr/generators/generateurs-pour-eoliennes/generateurs-a-aimants-permanents>*
- [19] REZZOUGUI Amal, BOUZIDI Soumya. *Conception d'une machine asynchrone à cage. Mémoire de master. Centre universitaire de Naama, 2021.*
- [20] Burton, T, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi (2001). *Wind EnergyHandbook*, Wiley.
- [21] Abdullah, M.A., Yatim, A.H.M., Tan, C.W. and Saidur, R (2012). *A review of maximum power point tracking algorithms for windenergysystems. RenewSustainEnergyRev 16:3220–3227.*
- [22]- IulianManteanu, AntonetaIuliana, Bratcu Nicolas, Antonio Cutululis and Emil Ceanga, "Optimal control of windenergysystems, towards a global approach", Springer, 2008.
- [23]- C. Gavriluta, S. Spataru, I. Mosincat, C. Citro, I. Candela, P. Rodriguez, "Complete methodology on generating realistic wind speed profiles based on measurements", Int Conf on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Spain, 2012.
- [24] AL ANFAF, Mohamed Mladjao Mouhammad, "Contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges ", Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016
- [25] Guy Cunty, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide dl'énergie éolienne », © Edissud, Aixen-Provence, 2001, [www.edisud.com](http://www.edisud.com).
- [26] M. Rapin, J.M. Noel «Energies éoliennes, Principes et étude de cas», 1 ère Edition unod, Paris, 2010.
- [27] Abad G, Lopez J, Rodriguez ML, Marroyo L, Iwanski G. *Doublyfed induction machine modeling and control for windenergygeneration. Wiley-IEEE Press, 2011.*

## Référence Bibliographique

---

[28] M. Lopez, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de doctorat, Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'Information des Télécommunications et des Systèmes » Université Paris sud 2011.

[29] G. lekhmissi « étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne en utilisant une Voilure mécanique », thèse de Master en Génie électrique, université d'Oum el Bouaghi. Le 20/06/2013.

[30] « Modélisation Et Commande D'une Générateur Synchrone A Aimants Permanents Dédiée A La Conversion De L'énergie Eolienne » Article · March 2010

[31] H. Bourekache « étude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents » projet de fin d'étude d'ingénieur d'état en électrotechnique, 2013.

[32] Kerrouche Mohammed -Gagaa Ali Abdullah Ali - Hathroubi Kamel « Commande Prédictive D'une Générateur Synchrone A Aimant Permanent (Gsap) » Université Echahid Hamma Lakhdar D'el-Oued, 2020-2021.

[33] Madi Siham Mr : S. Taraft Lamamra Wassim « Application D'une Commande Non Linéaire Dans Une Chaîne De Conversion Eolienne A Base D'une Machine Synchrone A Aimant Permanent » Université A. Mira Bejaïa 2021.

[34] Abdelkader Berhail « Commande D'une Eolienne A Base De Gsap Connectée Au Réseau Electrique Par Convertisseur Multiniveaux », Université Du Québec A Trois- Rivières, 2020

[35] DAHBI, A., H. Mabrouk, N. Nait-said and M-S. Nait-said. Realization and control of a wind turbine connected to the grid by using PMSG. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 84, pp.

[36] Hamid Gualous, Morlaye Sekou Camara, Mamadou Baïlo Camara Camara, Brayima Dakyo « Modélisation Et Commande D'une Générateur Synchrone A Aimant Permanent Pour La Production Et L'injection Des Energies Offshores Dans Un Réseau »

[37] BOUHEDDA Ali « Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne ». Merbah–Ouargla 2013

[38] AllaliLoubna , « Commande Vectorielle De La Générateur Synchrone A Aimants Permanents, Diplome De Master, Ain El Beida Le : 04 Juin 2016 »

[39] Gergaud, Olivier. Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur. Diss. École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.

[41] Lemkak Hayat, Optimisation d'un système de conversion éolien basé sur la MSAP, Université Mohamed Khider – Biskra -2015.

[42] GEVAERT, Louis FM., J.D.M De Kooning, Tine L. Vandoorn., et al. Evaluation of the MPPT performance in small wind turbines by estimating the tip-speed ratio. In: 2013 48th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2013. pp. 1-5.

[43] MARMOUH, S., M. Boutoubat and L. Mokrani. MPPT fuzzy logic controller of a wind energy conversion system based on a PMSG. In: 2016 8th International Conference on

## Référence Bibliographique

---

*Modelling, Identification and Control (ICMIC). IEEE, 2016. pp. 296-302. ISBN 978-0 9567157-7-7.*

[44] DAHBI, A., H. Mabrouk, N. Nait-said and M-S. Nait-said. *Realization and control of a wind turbine connected to the grid by using PMSG*. *Energy Conversion and Management*, 2014, vol. 84, pp. 346-353. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.085>.

[45]: Abdeddaim Sabrina, "Optimisation d'un système de génération renouvelable (Photovoltaïque et éolienne) connecté au réseau ". *Mémoire de doctorat, université Mohamed Khider – Biskra ; 2013 .*

[46] SMAILI Mokrane, "Modélisation et commande d'un aérogénérateur à machine asynchrone à double alimentation en vue de simulation des problèmes de cogénération", *Thèse de doctorat. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2013.*

[47] Triki, Yacine. *Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production d'énergies renouvelables*. Diss. Université de Haute Alsace – Mulhouse ; Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou, Algérie), 2020.

[48] Hassanien Ramadan · Abdel-Raheem Youssef · Hossam H. H. Mousa .. Essam E. M. Mohamed « An efficient variable-step P&O maximum power point tracking technique for grid-connected wind energy conversion system », 22 November 2019

[49] Moualdia, " Stratégies de Commande DTC-SVM et DPC appliquées à une MADA utilisée pour la production d'énergie éolienne "; *Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Algérie, Juin 2014.*

[50] Noureddine Bounasla « Commande Par Mode De Glissement D'ordre Supérieur De La Machine Synchrone A Aimants Permanents » *Université Ferhat Abbas Sétif -1 (Algérie) Thèse De Master 2014*

[51] Benariba Hassan « Contribution A La Commande D'un Véhicule Electrique » *Docteur En Sciences Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen 2018.*

[52] Assam Azzeddine Mdm Ben Smail.S Boukerma Redouane « Optimisation Et Commande D'une Chaîne De Conversion Eolienne Par La Logique Floue Adaptative » *Université De Bouira 2018/2019*

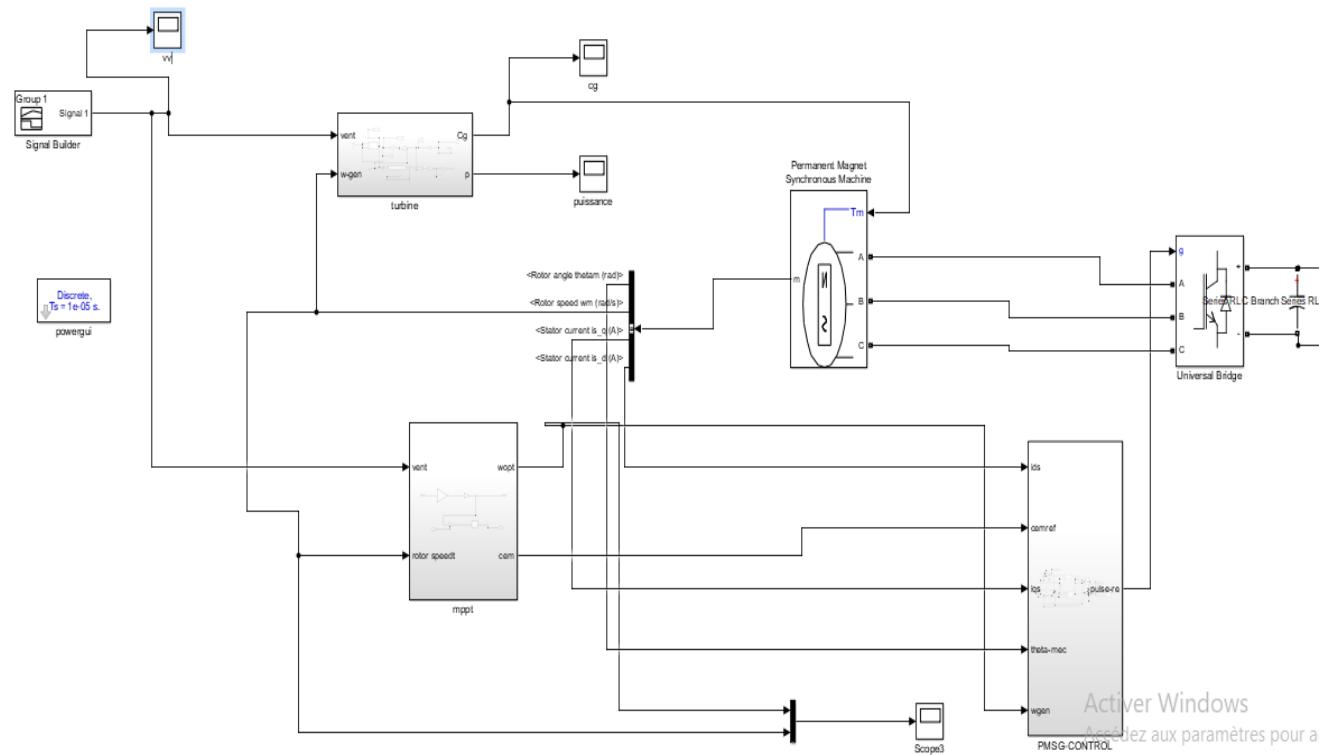
[53] Youcef Saidi, Abdelkader Mezouar, Yahia Miloud « Comportement Dynamique D'un Système De Conversion D'énergie Eolienne A Base D'une Générateur Synchrone A Aimants Permanents En Cas De Creux De Tension Du Réseau Electrique » *Bucarest, 2019.*

[54] MENADI Abdelkrim, Commande Par Les Techniques Intelligentes D'un Système Photovoltaïque Connecté Au Réseau, *Thèse Doctorat LMD Université Mohamed Khider – Biskra 2016.*

## *Annexes*

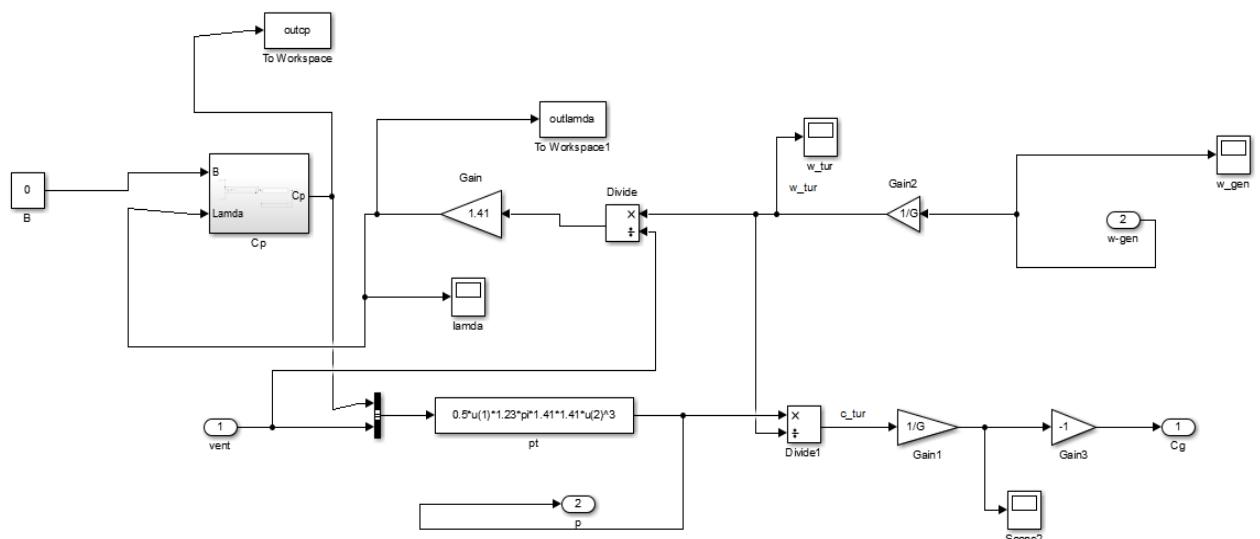
## *Annexes*

Modélisation de la turbine éolienne avec la GSAP par la commande vectorielle sous matlab-sumilink :



**Figure(1) : Simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne avec MPPT et PMSG**

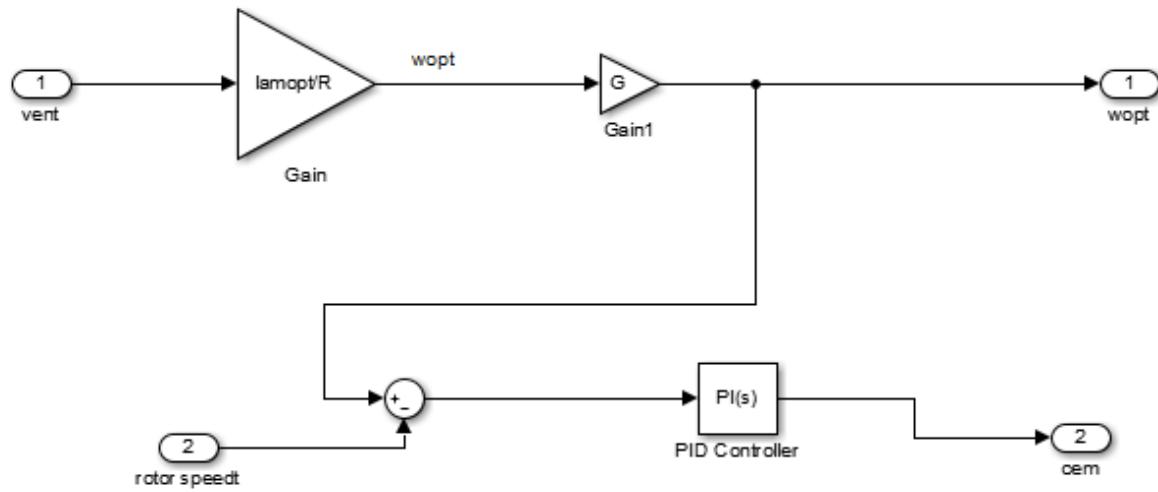
## Modélisation de la turbine éolienne :



**Figure (2) : Modèle de calcul de la puissance et du couple d'une éolienne.**

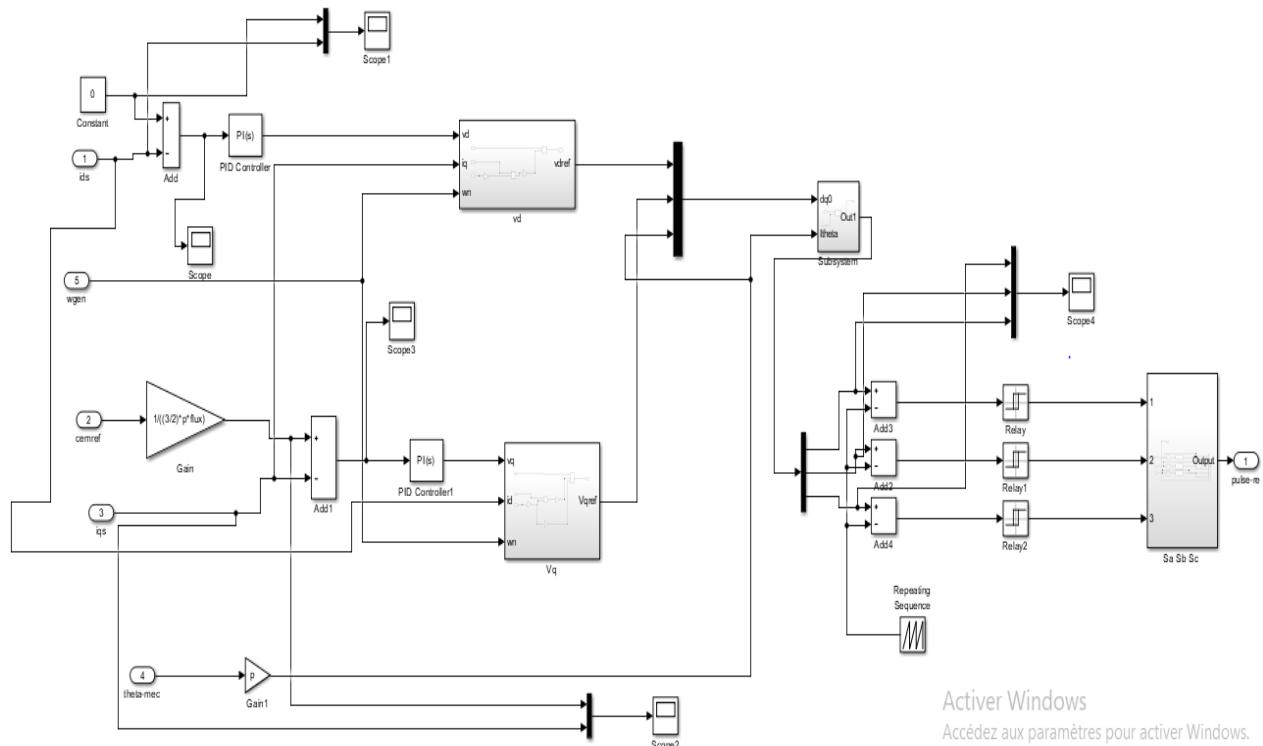
## Annexes

Modélisation de MPPT en vitesse par régulateur :



Figure(3) : Commande PID pour la génération du couple optimal d'une éolienne

Modélisation de la PMSG – contrôle :

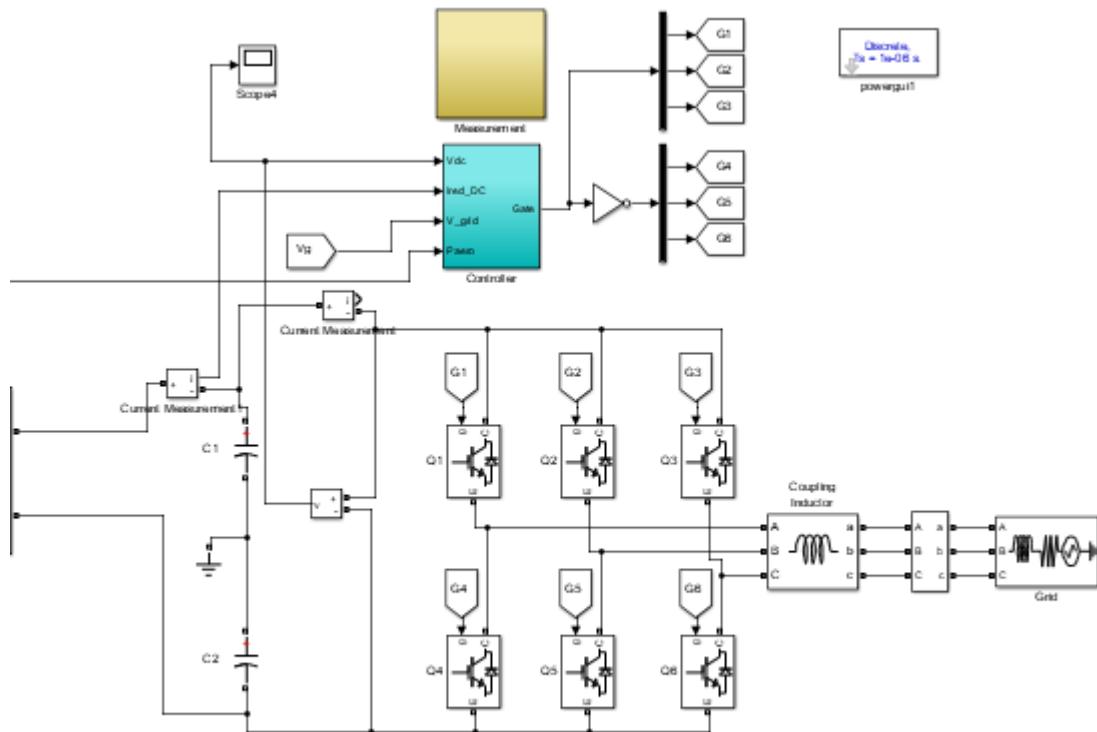


Activer Windows  
Accédez aux paramètres pour activer Windows.

Figure (4) :Commande en quadrature d'une PMSG avec régulateurs PID.

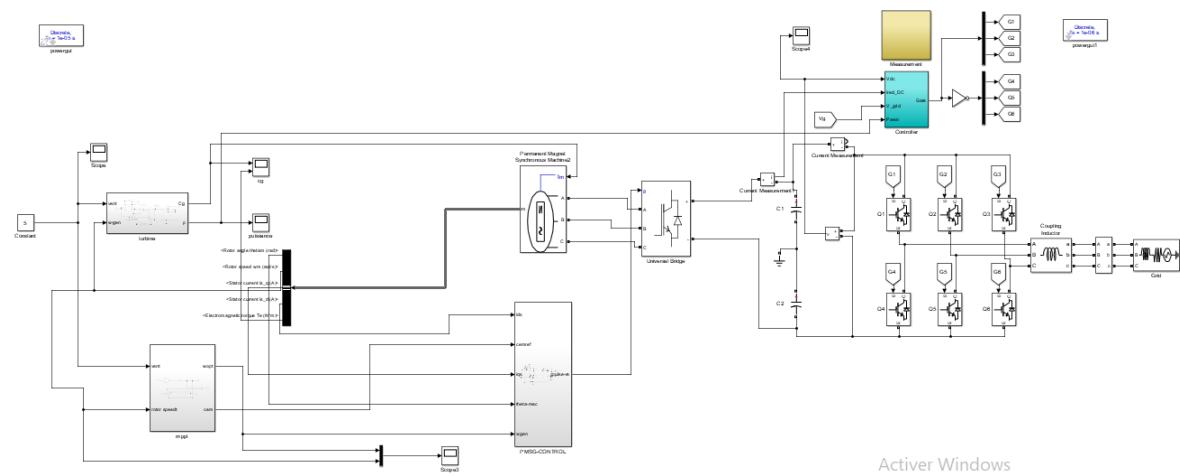
## Annexes

### Contrôle cotée réseau électrique :



Figure(5) : Contrôle de l'onduleur triphasé connecté au réseau – Simulink.

### Shéma global de la chaîne éolienne connectée au réseau :



Figure(6) : Modèle Simulink d'un système de production éolienne connecté au réseau.