



Université ABBES LAGHROUR Khenchela  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Industriel  
جامعة عباس لغرور خنشلة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الصناعية



N° Série : .....

## Mémoire de fin d'étude

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commandes Electriques**

Présenté par

**Menzer Anouar**

**&**

**Zeraoulia Riadh**

### THEME

## **Commande d'une Génératrice Synchrones à Aimants Permanents(GSAP) par Backstepping**

*Soutenu le : 29 juin 2022 devant la commission d'examen composée de :*

*Dr KHAMIS ABED RAHMAN MCA : à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela Président*

*Dr LAGGOUN Louanasse MCB : à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela Encadreur*

*Dr BEN FERROUDJ Hafiza MAA: à L'Université Abbes Laghrou de Khenchela Examineur*

*Promotion 2021/2022*

# Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Avant tous, je remercie «Allah» le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents : Grâce à leurs tendres encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont pu créer le climat affectueux et propice à la poursuite de mes études.*

*Aucune dédicace ne pourrait exprimer mon respect, ma considération et mes profonds sentiments envers eux,*

*Je prie le bon Dieu de les bénir, de veiller sur eux, en espérant qu'ils seront toujours fiers de moi.*

*A ma sœur et à mon frère.*

*A tous les membres de ma famille*

*A tous mes professeurs*

*A mes chères ami(e)s : Abd Elhakim, Gassoum, Riadh, Malek, Zouhir, Lakhder, Ziyad, Akram, Gillesse, Marwan, dhia, feysel.*

*A tous les membres de Etterkib Société kais Qui a eu l'amabilité de répondre à mes questions et de fournir les explications nécessaires dans mon stage*

*Tous mes camarades de la promotion commandes électriques 2021-2022*

**MENZER ANOUAR**

# Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*Je remercie tout d'abord «Allah» le tout puissant, de m'avoir donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce travail.*

*A mon chère ami «Zouaoui Khaled» (que Dieu ait son âme)*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents, que dieu les gardes et les protèges pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

*A mes sœurs et mes frères.*

*A tout la famille.*

*Ils vont trouver ici l'expression de mes sentiments de respect et de reconnaissance pour le soutien qu'ils n'ont cessé de me porter.*

*A tous mes professeurs : Leur générosité et leur soutien m'oblige de leurs témoigner mon profond respect et ma loyale considération.*

*A tous mes amis « Menzer Anouar, Ali tebib, walid zouaoui, karim, aymen, chahin » : Ils vont trouver ici le témoignage d'une fidélité et d'une amitié infinie.*

# *Remerciement*

*Notre remerciements avant, après, et à l'infini DIEU de nous entouré  
De ses grâce et claire de ses lumière, et nous avoir donné la patience,*

*Le courage, pour établir ce modeste travail.*

*Nous remercions chaleureusement notre cher encadreur et*

*Enseignant :*

*Mr : Laggoune Louanesse*

*Nous tenons aussi à remercier toutes les personnes de nous avoir*

*Aidés durant la réalisation de ce travail de près et de loin.*

*Nous remercions tous les professeurs de notre spécialité*

*"Commandes électriques"*

*Nous remercions tous ceux qui méritent d'être remerciés sur cette page.*

## Listes des symboles et notations

### Paramètres de modélisation de la Génératrice synchrone à aimant permanent(GSAP)

$R_{ch}$	( $\Omega$ )	La résistance de charge.
$R_s$	( $\Omega$ )	La résistance des phases statoriques.
$L_{ch}$	(H)	Inductances de charge.
$L_q, L_d$	(H)	Les inductances directe et en quadrature.
$C_{em}$	(N.m)	Le couple électromagnétique.
P	(-)	Le nombre de paires de pôles.
J	(Kg $\cdot$ m <sup>2</sup> )	moment d'inertie total de la machine.
$\Omega$	(rad/s)	Vitesse de rotation mécanique du rotor.
$\psi_f$	(-)	Pulsation électrique statorique.
$C_m$	(N.m)	Le couple moteur appliqué sur la génératrice.
f	(Nm/rd/s)	Coefficient de frottement visqueux.

### Paramètres de modélisation de la turbine éolienne (TE)

$\rho$	(m <sup>3</sup> )	La masse volumique de l'air à 15°C.
$J_{pale}$	(Kg $\cdot$ m <sup>2</sup> )	Inertie.
$\lambda$	(-)	Ratio de vitesse (vitesse relative).
M	(-)	La masse d'air en mouvement.
V	(m/s)	Vitesse du vent.
$R_T$	(m)	Rayon de la surface balayée.
S	(m <sup>2</sup> )	La surface circulaire balayée par la turbine.
$J_g$	(Kg $\cdot$ m <sup>2</sup> )	Inertie de la génératrice.
G	(-)	l'arbre d'entraînement.
G	(-)	Gain de multiplication.
kb	(-)	Élasticité.
$C_f$	(N.m)	Le couple résistant dû aux frottements.
$C_{em}$	(N.m)	Le Couple électromagnétique de la génératrice.
$P_{éol}$	(W)	La puissance éolienne de la turbine.
$C_m$	(N.m)	Le couple après le multiplicateur.
Db	(Nm/rd/s)	coefficient de frottement par rapport à l'air.
$J_T$	(Kg $\cdot$ m <sup>2</sup> )	Inertie de la turbine.

## Listes des symboles et notations

---

$\Omega_{\text{turbine}}$	(rd/s)	vitesse de rotation de la turbine.
$C_{\text{aér}}$	(N.m)	Le couple statique fournie par l'éolienne.
$C_p$	(-)	Coefficient de puissance de la Turbine.
$\omega_T$	(m/s)	Vitesse de rotation de la turbine éolienne.
$w_a$	(m/s)	vitesse angulaire de la turbine.
$w_m$	(m/s)	Vitesse de rotation après multiplicateur ou vitesse mécanique.
$C_m$	(N.m)	Le couple moteur appliqué sur la génératrice.
$f_m$	(Nm/rd/s)	Coefficient de frottement de la machine.
$P_m$	(W)	La puissance mécanique du vent.
$P_v$	(W)	Puissance totale du vent.

### Paramètres de commande Backstepping

$V(x)$	(-)	Fonction de Lyapunov.
$e_i$	(-)	Erreur.
$v_{dref}, v_{qref}$	(V)	Composantes directe et en quadrature de tension de référence.
$i_{dref}, i_{dref}$	(A)	Composantes directe et en quadrature de courant de référence.
$\Omega_{ref}$	(m/s)	Vitesse de référence.

### Repères

$a, b, c$		Axes magnétiques liés aux enroulements triphasés statoriques.
$(d, q)$		Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme).
$\theta$		Position angulaire du stator par rapport à l'axe (d).

### Grandeurs électriques au stator

$v_a, v_b, v_c$	(V)	Les tensions de phases statoriques.
$v_d, v_q$	(V)	Composantes directe et en quadrature de tension.
$i_a, i_b, i_c$	(A)	Les courants de phases statoriques.
$i_d, i_q$	(A)	Composantes directe et en quadrature de courants.

### Grandeurs magnétiques

$\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$	(Wb)	Les flux totaux traversant les bobines statoriques.
$\Psi_f$	(Wb)	Le flux d'excitation des aimants.

## *Listes des symboles et notations*

---

$\Psi_s$	(Wb)	<i>Le flux de la phase statorique.</i>
$\Psi_d, \Psi_q$	(Wb)	<i>Composantes directe et en quadrature du flux.</i>

### *Sigles utilisés pour la modélisation de la machine*

<i>MS</i>	(-)	<i>Système utilisant une Machines synchrones.</i>
<i>GSRB</i>	(-)	<i>Générateur synchrones à rotor bobiné.</i>
<i>GSAP</i>	(-)	<i>Générateur synchrones à aimant permanent.</i>
<i>MAS</i>	(-)	<i>Système utilisant une machines Asynchrones.</i>
<i>GACE</i>	(-)	<i>Générateur Asynchrones à cage d'écureuil.</i>
<i>GARB</i>	(-)	<i>Générateur asynchrone à rotor bobiné.</i>
<i>GADA</i>	(-)	<i>Générateur Asynchrones doublement alimenté.</i>

### *Sigles utilisés dans l'énergie renouvelable*

<i>GSAP</i>	(-)	<i>Génératrice Synchrone à aimant permanent.</i>
<i>MSAP</i>	(-)	<i>Machine Synchrone à aimants Permanent.</i>
<i>AFPM</i>	(-)	<i>Axial flux permanent-magnet.</i>
<i>RFPM</i>	(-)	<i>Radial flux permanent-magnet.</i>

<b>Dédicace</b> .....	<b>3</b>
<b>Remerciement</b> .....	<b>4</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>1</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>2</b>

## **I Chapitre : Généralité sur l'énergie renouvelable..... 4**

<b>I.1 Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 L'énergie renouvelable</b> .....	<b>4</b>
<b>I.3 Les différents types d'énergie renouvelable</b> .....	<b>5</b>
I.3.1 L'énergie géothermique .....	5
I.3.2 L'énergie Biomasse.....	6
I.3.3 L'énergie hydraulique.....	6
I.3.4 L'énergie solaire .....	7
I.3.5 L'énergie éolienne.....	9
I.3.5.1 Principe de Fonctionnement d'une éolienne .....	9
I.3.5.2 Constitution d'un système éolien.....	10
I.3.5.3 Différents types d'éolienne .....	11
I.3.5.4 Topologies éoliennes .....	13
I.3.5.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	13
<b>I.4 Systèmes de conversion d'énergie éolienne</b> .....	<b>13</b>
I.4.1 Système utilisant une Machines synchrones (MS).....	14
I.4.1.1 Générateur synchrones à rotor bobiné (GSRB) .....	14
I.4.1.2 Générateur synchrones à aimant permanent (GSAP).....	15
I.4.2 Système utilisant une machines Asynchrones (MAS) .....	15
I.4.2.1 Générateur Asynchrones à cage d'écureuil (GACE) .....	16
I.4.2.2 Générateur asynchrone à rotor bobiné (GARB).....	16
I.4.2.3 Générateur Asynchrones doublement alimenté (GADA).....	16
<b>I.5 Conclusion</b> .....	<b>17</b>

## **II Chapitre : Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)..... 18**

<b>II.1 Introduction</b> .....	<b>19</b>
<b>II.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents</b> .....	<b>19</b>
II.2.1 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents .....	19
II.2.2 Les aimants permanents.....	20
II.2.3 Principe de fonctionnement MSAP.....	21
II.2.4 Structures des machines synchrones à aimants permanents .....	21
II.2.4.1 Structures à flux radial (RFPM).....	21
II.2.4.2 Structures à flux axial (AFPM) .....	22
II.2.5 Types des machines synchrones .....	22
II.2.5.1 Machines à pôles lisses .....	22
II.2.5.2 Machine à pôles saillants .....	23
II.2.6 Les avantages et Inconvénient de la MSAP.....	23

<b>II.3</b>	<b>Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....</b>	<b>23</b>
II.3.1	Hypothèses simplificatrices.....	23
II.3.2	Équations de la génératrice synchrone à aimants dans le repère (abc) .....	24
II.3.2.1	Équations électriques .....	24
II.3.2.2	Équations magnétique .....	25
II.3.2.3	Équation mécanique .....	25
II.3.3	Transformation de Park .....	25
II.3.4	Génératrice synchrone à aimants permanents dans le repère de Park (d, q) .....	27
<b>II.4</b>	<b>Simulation de GSAP.....</b>	<b>29</b>
II.4.1	Modélisation de la génératrice d'Essai à vide .....	29
II.4.2	Modélisation de la génératrice en charge.....	31
<b>II.5</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>35</b>
<b>III Chapitre : Modélisation et simulation de l'énergie éolienne..... 36</b>		
<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>36</b>
<b>III.2</b>	<b>Conversion de l'énergie mécanique.....</b>	<b>36</b>
III.2.1	Loi de Betz .....	36
III.2.2	Le coefficient de puissance .....	37
<b>III.3</b>	<b>Modélisation de vent.....</b>	<b>38</b>
<b>III.4</b>	<b>Modélisation de la turbine éolienne.....</b>	<b>39</b>
III.4.1	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la Turbine.....	39
III.4.2	Modèle de la turbine .....	40
<b>III.5</b>	<b>Modèle du multiplicateur .....</b>	<b>42</b>
<b>III.6</b>	<b>Modélisation de l'arbre Mécanique. ....</b>	<b>43</b>
<b>III.7</b>	<b>Zones de fonctionnement de l'éolienne .....</b>	<b>44</b>
<b>III.8</b>	<b>Simulation de la turbine éolienne .....</b>	<b>46</b>
<b>III.9</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>IV Chapitre : Commande Backstepping d'une génératrice synchrone à aimants permanents ..... 49</b>		
<b>IV.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.2</b>	<b>Principe de la commande Backstepping.....</b>	<b>49</b>
<b>IV.3</b>	<b>Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires .....</b>	<b>50</b>
IV.3.1	La première méthode .....	50
IV.3.2	La deuxième méthode.....	51
<b>IV.4</b>	<b>Conception de la commande Backstepping .....</b>	<b>51</b>
<b>IV.5</b>	<b>Application du Backstepping à la commande du GSAP .....</b>	<b>55</b>
IV.5.1	Etape 01 Calcul de la loi de commande $v_{ref}$ .....	56
IV.5.2	Etape 02 Calcul de la loi de commande virtuelle $i_{qref}$ .....	57

<i>IV.5.3</i>	<i>Etape 03 Calcul de la loi de commande finale <math>v_{qref}</math></i>	<i>58</i>
<b><i>IV.6</i></b>	<b><i>Résultats de simulation de la commande par Backstepping</i></b>	<b><i>60</i></b>
<b><i>IV.7</i></b>	<b><i>Conclusion</i></b>	<b><i>62</i></b>
	<b><i>Conclusion générale</i></b>	<b><i>63</i></b>
	<b><i>Références</i></b>	<b><i>64</i></b>
	<b><i>Annexes</i></b>	<b><i>67</i></b>

## ***Chapitre I*** ***Généralité sur l'énergie renouvelable.***

<b>FIGURE I-1</b> STRUCTURE DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE DANS LE MONDE EN 2019.....	5
<b>FIGURE I-2</b> LE PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT DE L'ENERGIE GEOTHERMIQUE. ....	5
<b>FIGURE I-3</b> LE PROCESSUS DE FONCTIONNEMENT DE L'ENERGIE BIOMASSE. ....	6
<b>FIGURE I-4</b> LE PROCESSUS DE PRODUCTION D'ELECTRICITE A PARTIR DES BARRAGES. ....	7
<b>FIGURE I-5</b> SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE .....	8
<b>FIGURE I-6</b> PROTOTYPE D'UNE EOLIENNE. ....	9
<b>FIGURE I-7</b> PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE.....	10
<b>FIGURE I-8</b> TURBINE EOLIENNE AVEC UN SYSTEME D'ORIENTATION .....	10
<b>FIGURE I-9</b> LES COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE. ....	10
<b>FIGURE I-10</b> ELEMENTS D'UNE NACELLE .....	11
<b>FIGURE I-11</b> ÉOLIENNE A AXES VERTICAL. ....	12
<b>FIGURE I-12</b> ÉOLIENNE A AXES HORIZONTAL. ....	12
<b>FIGURE I-13</b> EOLIENNE COUPLEE AU GSRB .....	15
<b>FIGURE I-14</b> EOLIENNE COUPLEE AU GSAP .....	15
<b>FIGURE I-15</b> EOLIENNE COUPLEE AU (GADA). ....	16

## ***Chapitre II*** ***Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).***

<b>FIGURE II-1</b> CONSTITUTION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS .....	20
<b>FIGURE II-2</b> EXEMPLE DE STRUCTURES A ROTOR INTERNE [A] ET A ROTOR EXTERNE [B]. ....	21
<b>FIGURE II-3</b> DIFFERENTES CONFIGURATIONS D'UNE STRUCTURES A FLUX AXIAL (AFPM). ....	22
<b>FIGURE II-4</b> REPRESENTATION DE LA TRANSFORMATION DE PARK .....	26
<b>FIGURE II-5</b> SCHEMAS BLOC DE SIMULATION DE LA GENERATRICE A AIMANTS PERMANENTS A VIDE. ....	30
<b>FIGURE II-6</b> LES RESULTATS DE LA GSAP A VIDE. ....	31
<b>FIGURE II-7</b> BLOC DE SIMULATION DE LA GSAP EN CHARGE.....	33
<b>FIGURE II-8</b> SIMULATION GSAP SUR UNE CHARGE.....	35

**Chapitre III**  
**Modélisation et simulation de l'énergie éolienne.**

**FIGURE III-1** TUBE DE COURANT D'AIR AUTOUR D'UNE EOLIENNE ..... 36

**FIGURE III-2** LA VITESSE SPECIFIQUE OU RATION DE VITESSE  $\lambda$  ..... 38

**FIGURE III-3** MODELE DU VENT SOUS MATAB/SIMULINK. .... 39

**FIGURE III-4** SCHEMA DE FONCTIONNEMENT DE LA TURBINE EOLIENNE. .... 40

**FIGURE III-5** COEFFICIENT DE PUISSANCE CP EN FONCTION LA VITESSE SPECIFIQUE  $\lambda$  DE LA  
TURBINE ..... 42

**FIGURE III-6** LE MODELE MATHEMATIQUE DE DIFFERENTES PARTIES DU SYSTEME EOLIEN ..... 44

**FIGURE III-7** ZONES DE FONCTIONNEMENT D'UNE TURBINE EOLIENNE. .... 44

**FIGURE III-8** LA VITESSE DU VENT..... 46

**FIGURE III-9** VITESSE DE ROTATION DE LA TURBINE EN FONCTION DU TEMPS ..... 46

**FIGURE III-10** COUPLE DE LA TURBINE EN FONCTION DU TEMPS ..... 47

**FIGURE III-11** COEFFICIENT DE PUISSANCE EN FONCTION DU TEMPS ..... 47

**FIGURE III-12** PUISSANCE DE TURBINE ET LA PUISSANCE DE GENERATEUR EN FONCTION DU  
TEMPS ..... 47

**Chapitre IV**  
**Commande Backstepping d'une génératrice synchrone à  
aimants permanents**

**FIGURE IV-1** SCHEMA DE PRINCIPE DU CONTROLE PAR BACKSTEPPING ..... 54

**FIGURE IV-2** STRUCTURE INTERNE DU BLOC REGULATEUR BACKSTEPPING ..... 56

**FIGURE IV-3** LA VITESSE DE ROTATION (RAD/S). .... 60

**FIGURE IV-4** LE COUPLE MECANIQUE CEM (N.M)..... 60

**FIGURE IV-5** LES COURANTS ID ET IQ DE LA MACHINE EN (A)..... 61

**FIGURE IV-6** LA PUISSANCE GENEREE EN (WAT) ..... 61

<b>TABLEAU I-1</b>	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE. ....	7
<b>TABLEAU I-2</b>	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE .....	8
<b>TABLEAU I-3</b>	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE .....	13
<b>TABLEAU I-4</b>	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES GENERATRICES SYNCHRONES. ....	14
<b>TABLEAU II-1</b>	AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MSAP. ....	23
<b>TABLEAU III-1</b>	CARACTERISTIQUES DE LA TURBINE EOLIENNE .....	41

## *Résumé*

**Résumé**

Le présent travail s'intéresse à l'étude de comportement d'une éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) par la commande Backstepping. Cette commande présente une procédure récursive qui combine entre le choix de la fonction de Lyapunov et la synthèse de la loi de commande. La modélisation de cette Systèmes de conversion d'énergie éolienne et la simulation ont été mises en œuvre dans l'environnement virtuel Matlab/Simulink, et validées par comparaison des résultats obtenus aux essais expérimentaux réalisés sur (GSAP).

**Mots clés** : énergies renouvelables, turbine éolienne, génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), Commande par Backstepping, Théorie de Lyapunov.

**Abstract**

This work focuses on the study of the behavior of a wind turbine based on a permanent magnet synchronous generator (PMSG) by the Backstepping command. This control presents a recursive procedure which combines between the choice of the Lyapunov function and the synthesis of the control law. The modeling of this Wind energy conversion systems and the simulation were implemented in the virtual environment Matlab/Simulink, and validated by comparing the results obtained with the experimental tests carried out on (PMSG).

**Key words:** renewable energy, wind turbine, Permanent magnet synchronous generator (PMSG), Control via Backstepping, Lyapunov theory.

**ملخص**

يركز هذا العمل على دراسة سلوك توربينات الرياح بناءً على مولد متزامن مغناطيسي دائم (GSAP) بواسطة أمر Backstepping يقدم عنصر التحكم هذا إجراءً تعاودياً يجمع بين اختيار وظيفة Lyapunov وتوليف قانون التحكم. تم تنفيذ نمذجة أنظمة تحويل طاقة الرياح هذه والمحاكاة في البيئة الافتراضية Matlab / Simulink ، وتم التحقق من صحتها من خلال مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع الاختبارات التجريبية التي أجريت على (GSAP).

**الكلمات المفتاحية:** الطاقات المتجددة, توربينات الرياح, المولد المتزامن بمغناطيس دائم, تحكم عن طريق backstepping, نظرية Lyapunov .

# *Introduction générale*

### *Introduction générale*

L'augmentation rapide de la consommation d'énergie, en particulier au cours des dernières décennies, a soulevé des craintes d'épuisement des réserves mondiales de pétrole et d'autres ressources, pour cette raison les pays industrialisés à recourir à des énergies renouvelables pour répondre à leurs besoins énergétiques tout en maintenant une marge de sécurité économique et environnementale. L'énergie éolienne est devenue l'un des secteurs d'énergie renouvelable les plus attractifs ces dernières années, dans le domaine de l'énergie renouvelable. [1] [2]

L'utilisation de l'énergie éolienne n'a cessé de croître au cours des dernières années. Cela a conduit à une augmentation de la recherche et du développement d'éoliennes plus grandes et efficaces afin d'offrir de l'énergie renouvelable aux clients. Dans ce contexte, notre travail s'intéresse aux éoliennes basées sur le générateur synchrone à aimants permanents (GSAP). [3]

Les générateurs synchrones étaient principalement utilisés pour produire de l'énergie électrique à partir de sources mécaniques provenant de différentes sources, fonctionnant dans une gamme de puissance allant de quelques watts à quelques centaines de mégawatts. [4]

Dans des applications à vitesse variable qui nécessitent des réponses précises malgré différents types de perturbations et incertitudes paramétriques, les contrôleurs linéaires classiques comme les PI et PID sont difficiles à régler face à un problème de type non linéaire et ont des performances qui peuvent être améliorées par des techniques de commande non linéaire. Les deux dernières décennies ont connu des progrès rapides de la commande des systèmes non linéaires. Plusieurs méthodes ont été inventées. Ensuite, à la fin des années 1980, la commande adaptative des systèmes non linéaires a connu un grand essor avec la première version de la linéarisation entrée-sortie adaptative. Plus tard, Peter Kokotović, Ioannis Kanellakopoulos, et Miroslav Krstić ont proposé une nouvelle conception systématique des contrôleurs adaptatifs dans lesquels est introduite la technique du « Backstepping ».

Cette commande est très récente, elle présente une procédure récursive qui combine entre le choix de la fonction de Lyapunov et la synthèse de la loi de commande. [5] [6]

Pour une meilleure compréhension, le mémoire est divisé en quatre chapitres

Faisant l'objet du premier chapitre, la 1<sup>ère</sup> partie consacrée au thème des énergies renouvelables. Et La 2<sup>ème</sup> partie sera consacrée une vue générale de l'énergie éolienne et Systèmes de conversion d'énergie éolienne.

Le deuxième chapitre est consacré à les machines synchrones à aimants permanents son fonctionnement, Constitution et modélisation.

Le troisième chapitre est consacré à l'étude et la modélisation de l'ensemble d'une chaîne éolienne, Après nous établissons un modèle de simulation pour chacun.

Le quatrième chapitre porte essentiellement sur la commande non linéaire par Backstepping d'ordre général, puis on applique sur notre système éolien à machine synchrone à aimant permanent.

*Chapitre I*  
*Généralité sur l'énergie renouvelable.*

## ***1.1 Introduction***

La pollution est le plus grand défi qui menace l'avenir de l'humanité. Eau et énergie, ces deux derniers sont considérés comme l'épine dorsale de toute civilisation. Pour cette raison l'homme doit rationaliser son utilisation et se trouve dans l'obligation de découvrir des solutions alternatives capables de répondre l'état actuel de la pollution de l'eau, de l'atmosphère, ainsi que le développement du réchauffement climatique, ce phénomène a entraîné la planète en cas d'instabilité climatique accompagnée de catastrophes naturelles (température haute, éruption volcanique, tremblements de terre, inondations, ouragans, etc.) Cela est dû à la grande quantité de CO<sub>2</sub> émise dans l'atmosphère. [7]

Il y a aussi le problème des combustibles fossiles qu'ils puisent dans des ressources finies qui finissent par diminuer, devenant trop chers ou trop dommageable pour l'environnement à récupérer [1]. C'est pourquoi il est nécessaire de trouver une alternative, des énergies propres qui constituent une solution pour répondre aux besoins de la société d'aujourd'hui. Ces énergies ont été longtemps négligées, et ce sont des énergies renouvelables.

Ces énergies reprennent la place qui leurs est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires. [8]

D'abord, et après cette introduction, la première partie du premier chapitre sera consacrée au thème des énergies renouvelables, leurs types, leur fonctionnement, et certaines de leurs caractéristiques. La deuxième partie sera consacrée une vue générale de l'énergie éolienne et Systèmes de conversion d'énergie éolienne.

## ***1.2 L'énergie renouvelable***

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, ce qui soulève des questions dans le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, aussi le déclin progressif des énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon...). [8]

On observe ainsi un développement remarquable des énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire, biomasse, etc.). Elles ont le double avantage d'utiliser des flux inépuisables d'énergie naturelle (soleil, vent, eau, bois, etc.) et de ne pas nuire à l'environnement. Ce type d'énergie ne couvre encore que 20% de la consommation mondiale d'électricité. [7]

La production d'électricité à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement [9].

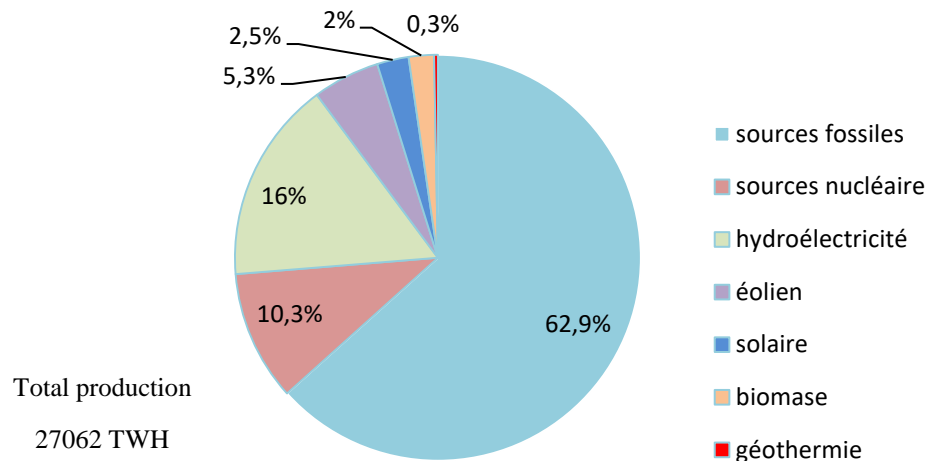


Figure I-1 Structure de la production d'électricité dans le monde en 2019

### I.3 Les différents types d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables sont nombreuses, la plupart sont issues directement ou indirectement du soleil : son rayonnement réchauffe l'atmosphère terrestre provoque le vent, les courants, le cycle de l'eau, les plus célèbres formes de l'énergie renouvelable sont :

#### I.3.1 L'énergie géothermique

La géothermie c'est un terme signifiant à capter la chaleur de l'intérieur du globe terrestre pour produire du chauffage ou de la convertir en électricité par des turbines et générateurs électriques.

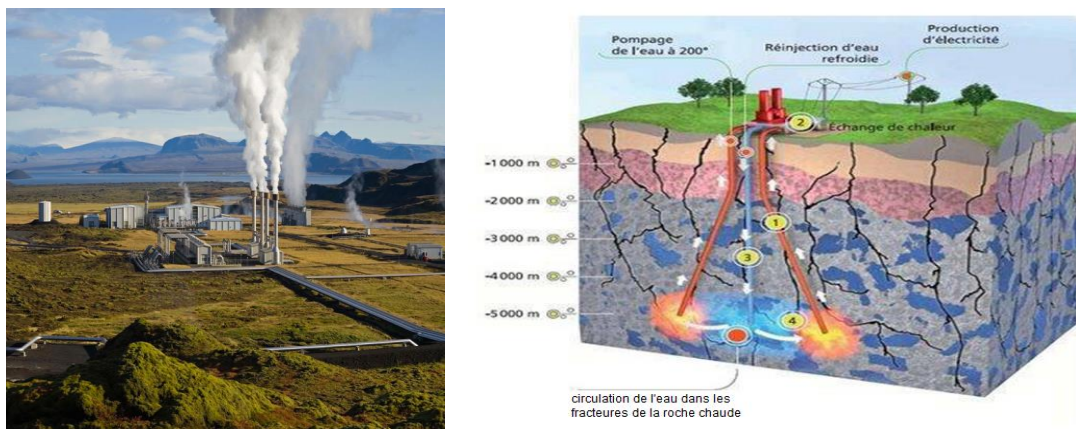


Figure I-2 Le processus de fonctionnement de l'énergie géothermique. [7]

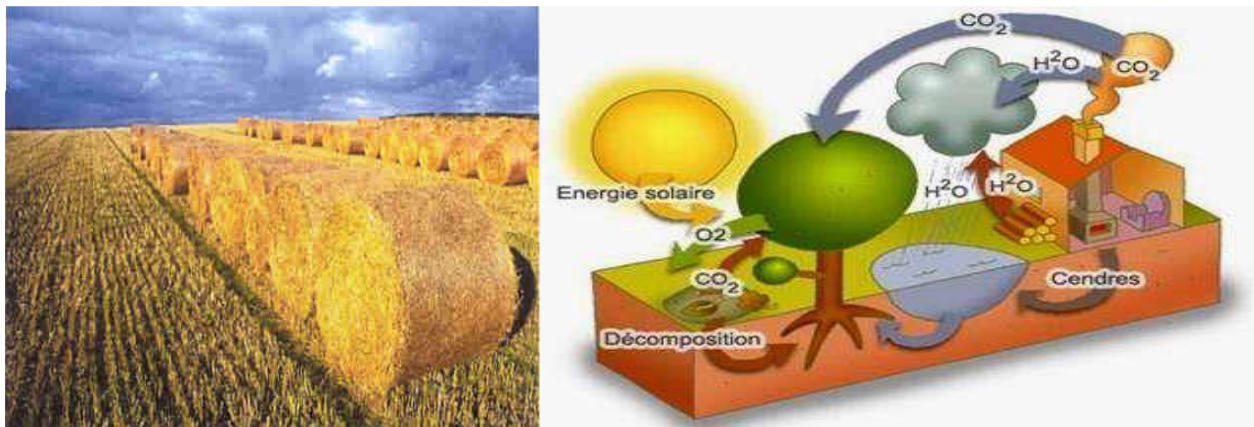
La chaleur de la terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre. Pour capter l'énergie géothermique, un fluide est mis en circulation dans les profondeurs de la terre. Ce fluide peut être celui d'une nappe captive naturelle, de l'eau injectée dans une roche chaude imperméable ou dans des puits spéciaux. Dans tous les cas, le fluide se réchauffe et remonte avec une température supérieure. [7] [8] [9]

### I.3.2 L'énergie Biomasse

La biomasse est la source la plus importante pour les productions énergétiques fournies par des déchets et des résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture et de l'élevage des animaux, de la pêche et l'aquaculture ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux. [7] [8] [9]

Il est stocké sous forme organique grâce à la photosynthèse, et exploitée par combustion:

- ✓ le bois et déchets agricoles (paille), déchets urbains ordures ménagères et déchet industriels du secteur agroalimentaire.
- ✓ Carburant bioéthanol : l'amidon et le glucose extraits des cultures sucrières et céréalières produisent de l'éthanol par procédé de fermentations alcooliques.
- ✓ Carburants bio gazole : il produit bio gazole avec les végétaux riches en huile comme les fleurs de colza ou de tournesol, le soja ou les cacahuètes. Qui peut remplacer le gazole actuel pour moteur diesel.



*Figure I-3 Le processus de fonctionnement de l'énergie Biomasse. [9][10]*

### I.3.3 L'énergie hydraulique

L'énergies hydraulique est la plus âgée des renouvelables énergies au monde, se distingue par sa souplesse d'utilisation, ses atouts écologiques et économiques. Comme les roues entraînées par le débit d'un cours d'eau, les turbines des centrales hydrauliques sont activées par la force de l'eau passant d'un niveau supérieur à un niveau inférieur. Plus la hauteur de la chute d'eau et le débit sont importants plus la puissance électrique développée sera élevée. [8]

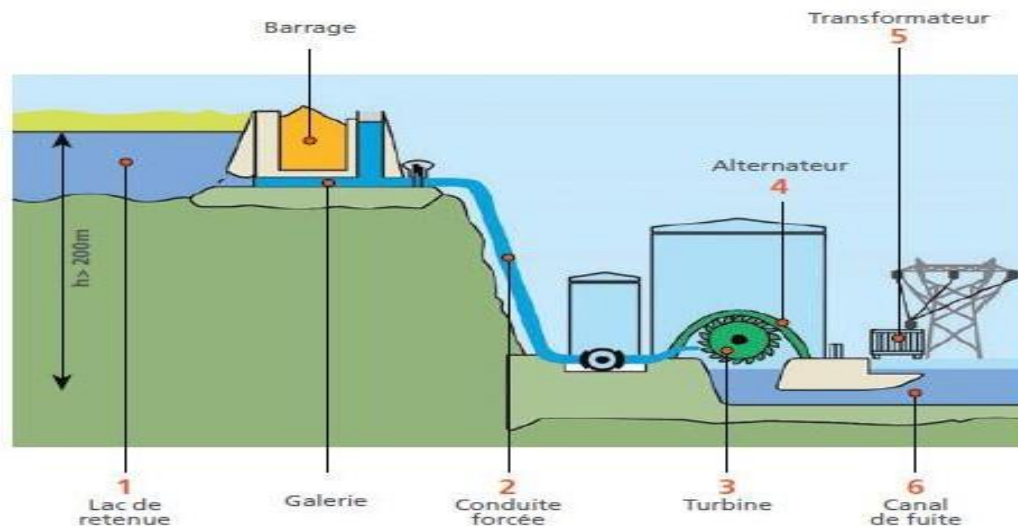


Figure I-4 Le processus de production d'électricité à partir des barrages. [7]

La production d'électricité à l'aide de l'énergie hydraulique présente certains avantages par rapport aux autres méthodes de production d'électricité. Cependant, l'énergie hydraulique n'est pas parfaite et présente certains désavantages :

Tableau I-1 Avantages et Inconvénients de l'énergie hydraulique. [9][10][11]

Avantage	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ une source d'énergie propre</li> <li>▪ non polluante</li> <li>▪ économique et fiable</li> <li>▪ faible Coûts de maintenance</li> <li>▪ La mise en service est simple et très rapide</li> <li>▪ Propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Coûts d'investissement élevé</li> <li>▪ installations complexées</li> <li>▪ sites limités</li> <li>▪ l'impact sur la vie aquatique</li> <li>▪ dépendante des conditions météorologiques</li> </ul>

### I.3.4 L'énergie solaire

La lumière du soleil est l'une des sources d'énergie les plus abondantes et les plus disponibles sur notre planète. La quantité d'énergie solaire qui atteint la surface de la terre un est représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique humaine totale. Bien que cela ressemble à une source d'énergie renouvelable parfaite, la quantité d'énergie solaire que nous pouvons utiliser varie en fonction de (l'heure, la journée et de la saison de l'année) ainsi que de l'emplacement géographique. [1] [12]

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

- **Le solaire thermique** : L'énergie solaire thermique est une technologie qui utilise le rayonnement solaire tel qu'il est capté pour chauffer un liquide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le liquide peut alors être utilisée directement dans les chauffe-eau solaires qui sont très répandus en Europe, plus de 600.000 familles ont en équipé leurs habitations. Ou (production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique, production de froid, etc.).[13] [8]
- **Le solaire photovoltaïque** : L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est produite à partir de la conversion directe de l'énergie provenant de Photons compris dans le rayonnement lumineux (solaire ou autre) en énergie électrique. Cette énergie sera durable et ne devra nécessiter aucun entretien. Elle peut répondre aux besoins en énergie électrique d'une maison. [9][11]



**Figure I-5** Source photovoltaïque [12]

Les avantages de l'énergie solaire sont plusieurs et leur application se développe d'un moment à l'autre, mais il ya des points faibles peuvent se manifester au niveau de fonctionnement et de la fabrication. [11] [9]

**Tableau I-2** Avantages et Inconvénients de l'énergie solaire

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inépuisable et non polluante</li> <li>▪ Propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre</li> <li>▪ totalement silencieuse</li> <li>▪ haute fiabilité</li> <li>▪ l'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Le cout d'investissement Elevé en particulier dans les pays en développement comme l'Algérie, la Tunisie et le Maroc.</li> <li>▪ Le cycle de vie des panneaux solaires n'est pas éternel (20 à 30 ans).</li> <li>▪ Le niveau de production d'électricité n'est pas stable il dépend du niveau d'ensoleillement</li> </ul>

### ***1.3.5 L'énergie éolienne***

L'énergie éolienne est un type d'énergie renouvelable qui utilise le vent comme source. Le vent est une source d'énergie traditionnelle, économique, inépuisable et non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles. Le vent est le résultat des déplacements de l'air, sa vitesse est variée selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. Il souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions.

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent. Apparus à l'an 600 tout d'abord en orient puis en Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à mouliner les grains. [7]

En 1891, Paul La Cour a donné l'idée de combiner une turbine éolienne à une génératrice, ce qui était sans doute fut le Pionnier dans ce domaine après cela les recherches sur cette énergie ont bien avancé. Ces différentes utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable

Actuellement, et après la crise pétrolière de 1973, on constate une prise de conscience du danger (réchauffement climatique, gaz à effet de serre et épuisement des ressources fossiles) relancera la recherche où la consommation mondiale d'énergie continue de croître, ce qui pose des défis qui nécessitent des études et des expérimentations répétées. [8]



***Figure I-6*** Prototype d'une éolienne. [12]

#### ***1.3.5.1 Principe de Fonctionnement d'une éolienne***

Les conditions de fonctionnement des éoliennes dépendent principalement des conditions de vent, l'énergie est effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique avant transfert vers le réseau. [14]

- ✓ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils

aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.

- ✓ Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. [9]

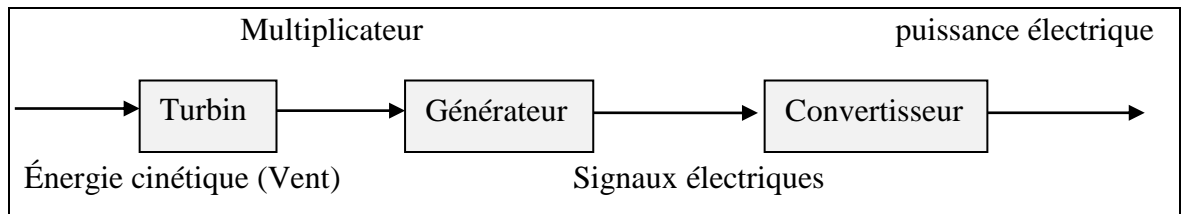


Figure I-7 Principe de Fonctionnement d'une éolienne.

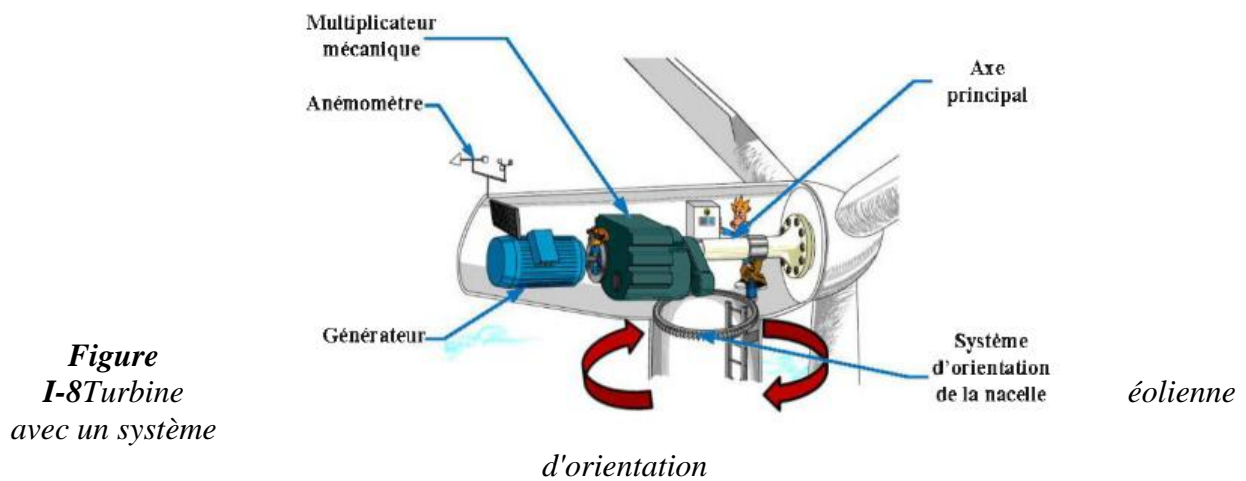


Figure I-8 Turbine avec un système d'orientation

### I.3.5.2 Constitution d'un système éolien

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux ci-après **Figure I-8**. [8] [15]

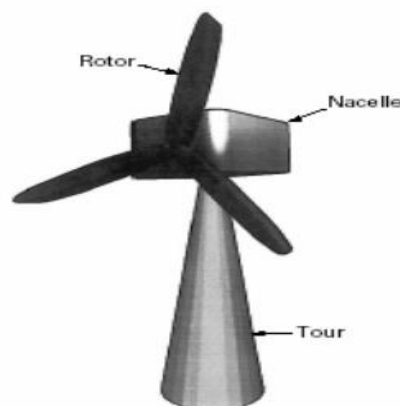


Figure I-9 Les Composants d'une éolienne. [15]

- **Le mât :** « Tour » c'est un tube d'acier. qui supporte l'ensemble des équipements (nacelle + rotor), Permet de placer le rotor à une hauteur suffisante (entre 10 et 100m) pour permettre

son mouvement ou placer ce rotor à une hauteur lui permettant d'être entraîné par un vent plus fort et régulier qu'au niveau du sol à l'intérieur sont disposés des câbles de transport de l'énergie électrique, les appareillages de connexions au réseau de distribution (transformateur) ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle.

- **La nacelle** : C'est la plus importante partie dans l'éolienne, montée au sommet de la tour qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique tel que le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent. Elle est liée à la tour par une liaison de type pivot motorisée permettant de choisir son orientation et éventuellement de positionner l'éolienne au vent. La Figure I-9 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants.
- **Le rotor** : Leur utilisation est de capter des vents forts et réguliers et transformer cette énergie du vent reçue en énergie mécanique. est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. En effet un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité. [7][8][15]

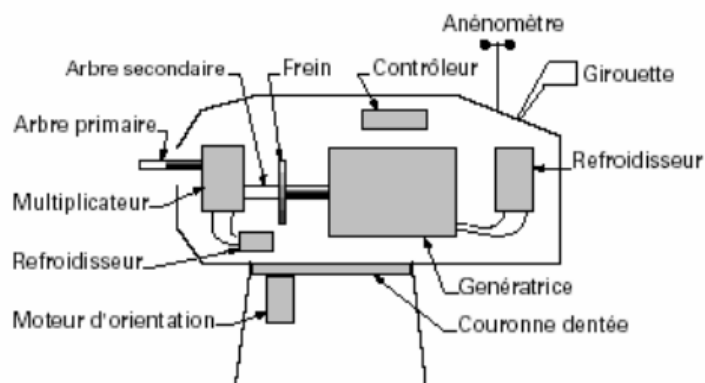


Figure I-10 Eléments d'une nacelle [14]

### I.3.5.3 Différents types d'éolienne

Il existe différentes façons de classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal et celles à axe vertical.

#### ➤ Éolienne à axes vertical

Ce type d'éolienne est marqué par un axe de rotation vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Cet avantage de la conception verticale offre de mettre le multiplicateur et le générateur directement sur le sol, ce qui a simplifié la maintenance du système. [7]

Ce type d'éoliennes ne peuvent pas démarrer toute seule, Un système de lancement s'avère donc nécessaire. En ce qui concerne leur emplacement, ils ont une empreinte plus

importante qu'éoliennes à tour parce qu'elles sont haubanées sur de longues distances. En effet, les câbles les haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur pour une installation sur un site agricole par exemple. [7] [9]

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour [9]



*Figure I-11 Éolienne à axes vertical. [12] [9]*

➤ **Éolienne à axes horizontal**

Ces éoliennes sont basées sur la technologie des moulins à vent. Aujourd'hui Elles sont toutes construites avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal (c'est-à-dire un arbre principal horizontal). Elles sont composées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion.

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol ; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical.

Leur principal avantage revient sur leur rendement très supérieur et l'emprise au sol qui est très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical. [7] [9]



*Figure I-12 Éolienne à axes horizontal. [9] [12]*

### I.3.5.4 Topologies éoliennes

Il existe deux technologies de base pour les éoliennes, une à vitesse constante et une à vitesse variable.

#### ➤ *Éoliennes à vitesse fixe*

Les éoliennes installées en standard fonctionnent à vitesse fixe. Cela signifie que quelle que soit la vitesse du vent, la vitesse de rotation d'une éolienne est constante et est déterminée par la fréquence du réseau d'alimentation. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable. Certaines éoliennes à vitesse fixe ont deux jeux de bobines :

- L'une est utilisée à des vitesses de vent inférieures (généralement 8 pôles).
- L'autre est à moyenne et haute vitesse (typiquement 4 à 6 pôles). [15] [16]

#### ➤ *Éoliennes à vitesse variable*

Les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. Elles ont été très populaires au cours de ces dernières années. Avec un fonctionnement à vitesse variable, il est devenu possible d'adapter en continu (accélérer ou décélérer) la vitesse de rotation de l'éolienne à la vitesse du vent. [15][16]

### I.3.5.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

*Tableau I-3 Avantages et Inconvénients de l'énergie éolienne [7] [9]*

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ L'énergie éolienne est propre et fiable</li> <li>▪ économique et écologique</li> <li>▪ gratuite et inépuisable</li> <li>▪ La durée de vie des éoliennes modernes est désormais de 20 à 25 ans</li> <li>▪ aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne d'émissions de CO<sub>2</sub></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Grand diamètre de la machine</li> <li>▪ L'incapacité à contrôler le vent</li> <li>▪ Le bruit des éoliennes est parfois fort et dérangeant</li> <li>▪ La production dépend entièrement de l'intensité du vent et non de la demande en énergie</li> </ul>

## I.4 Systèmes de conversion d'énergie éolienne

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique par les générateurs. Pour cela, l'utilisation d'un générateur électrique est nécessaire et indispensable. Différents types des

machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Le choix de type de la machine utilisée pour chaque application, il dépend des facteurs techniques et économiques.

- ✓ pour les petites puissances (< 20 kW), on utilise générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP).
- ✓ pour les fortes puissances, jusqu'à 2 MW, on utilise générateurs asynchrones (GAS). [15][17]

#### ***1.4.1 Système utilisant une Machines synchrones (MS)***

La machine synchrone est composée d'un rotor et d'un stator, dans le fonctionnement en mode générateur, le stator comporte un ensemble de trois bobinages qui alimentent une charge externe, alors que le rotor produit le champ magnétique nécessaire au fonctionnement du générateur. Elle peut utiliser en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), grâce à leurs performances, leur fréquence étant alors incompatible avec celle du réseau, le convertisseur de fréquence s'impose naturellement. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable [15][17][18]. Le tableau suivant résume les principaux avantages et inconvénients des génératrices synchrones.

**Tableau I-4** Avantages et inconvénients des génératrices synchrones. [7][15][19]

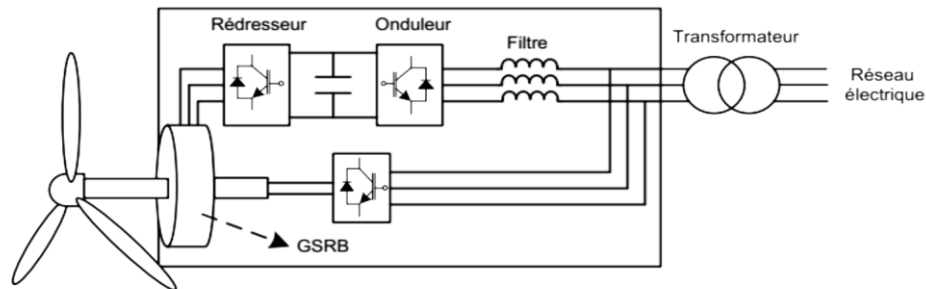
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Ne nécessitent pas de boîte de vitesses</li> <li>▪ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens</li> <li>▪ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>▪ l'absence de courant réactif de magnétisation</li> <li>▪ Augmentation de la fiabilité.</li> <li>▪ Absences des contacts glissants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Machine spécifique.</li> <li>▪ Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.</li> <li>▪ sont des grandes tailles machines.</li> <li>▪ Risque de désaimantation (irréversible) : limite de température maximale et Interaction magnétique due au changement de structure Pour (GSAP).</li> </ul>

Suivant la composition du rotor on distingue deux types de générateurs synchrones :

##### ***1.4.1.1 Générateur synchrones à rotor bobiné (GSRB)***

La fréquence et la tension de la Générateur Synchrone à Rotor Bobiné GSRB aux bornes du stator est variable en fonction de la vitesse du rotor, Le rotor peut être à pôles lisses ou

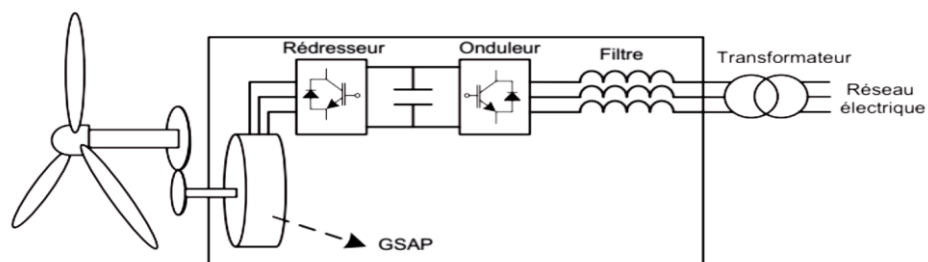
saillants et est généralement équipé de circuits amortisseurs. et le champ tournant est créé par un enroulement alimenté en courant continu (roue polaire) au moyen d'un redresseur connecté au réseau. Nous voyons que la connexion directe du GSRB avec le réseau électrique est impossible. Pour cette raison, la connexion est faite à l'aide d'un système de conversion énergie comme celui de la figure. [15] [18]



**Figure I-13** Eolienne couplée au GSRB [15]

#### **I.4.1.2 Générateur synchrones à aimant permanent (GSAP)**

Ce type de générateur fonctionne avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne (Ackermann, 2005). Elle utilise un aimant permanent à rotor multi-pôles, ce qui donne l'avantage d'avoir un grand couple massique. Donc le Générateur ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor. Il existe plusieurs types de ces Générateurs destinés aux applications éoliennes comme : les générateurs à flux radiaux, et à flux axial. [15][19]



**Figure I-14** Eolienne couplée au GSAP [16]

#### **I.4.2 Système utilisant une machines Asynchrones (MAS)**

Les machines asynchrones sont les plus simples à fabriquer (grande quantité et dans une très grande échelle des puissances) et les moins coûteuses. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

Les Générateurs synchrones sont largement utilisés dans le domaine de la production d'énergie renouvelable et largement répandue dans les turbines éoliennes. En raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Elles ont l'avantage d'être standardisées,

fabriquées en grande quantité et Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens. Il existe trois types de Générateur Asynchrone pouvant être couplés avec une éolienne : [15] [19] [18]

#### I.4.2.1 Générateur Asynchrones à cage d'écureuil (GACE)

Le générateur asynchrone à cage est le plus utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne à cause de sa réversibilité, sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite. Son principal inconvénient est d'une part l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d'autre part les problèmes d'accrochage / décrochage au réseau. [15][19][17]

#### I.4.2.2 Générateur asynchrone à rotor bobiné (GARB)

Le générateur asynchrone à rotor bobiné offre un avantage indispensable Pour la variation de vitesse. Grâce à un système de bagues et de balais, la tension appliquée au rotor peut être commandée par un convertisseur électronique, ce qui permet de faire fonctionner des variateurs électroniques de faible puissance. Son principal inconvénient est le surcoût (construction plus compliquée). [15][19]

#### I.4.2.3 Générateur Asynchrones doublement alimenté (GADA)

Les Générateur Asynchrones doublement alimenté est très populaire dans le marché des turbines éoliennes. Constitué de Le stator qui est connecté directement au réseau et le rotor qui est connecté à un convertisseur de puissance. La commande du redresseur permet de contrôler le fonctionnement de la génératrice en imposant la tension des enroulements rotoriques. La commande de l'onduleur permet de maintenir constante la tension du bus continu. [7][19]

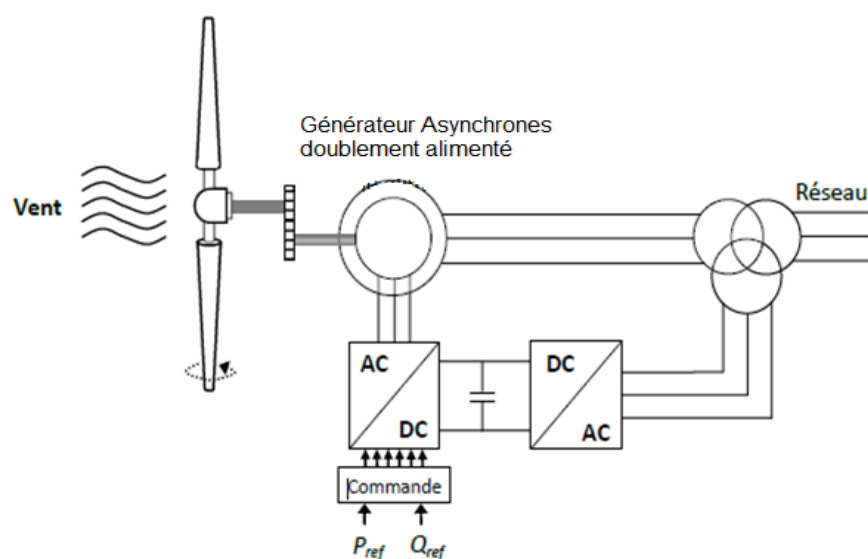


Figure I-15 Eolienne couplée au (GADA). [7]

### ***I.5 Conclusion***

Dans ce chapitre, nous avons donné une description générale des énergies renouvelables et de la manière dont l'électricité est produite par ses différents moyens. Nous avons également fourni différents types d'énergie renouvelable, notamment l'énergie Biomasse, l'énergie géothermique, l'énergie hydraulique, l'énergie solaire et l'énergie éolienne. D'autre part, nous avons tout mentionné des définitions aux types jusqu'aux avantages et inconvénients de l'énergie solaire et de l'énergie hydraulique, pour l'énergie éolienne nous avons présenté aussi une définition, constitution, principe de fonctionnement et les composants du système éolien (axes vertical et axes horizontal), en plus on a étudié les systèmes de conversion d'énergie éolienne. La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation et simulation d'une génératrice à aimant permanent.

*Chapitre II*  
*Modélisation de la génératrice synchrone à*  
*aimants permanents (GSAP).*

## **II.1 Introduction**

Une machine synchrone à aimants permanents est un convertisseur électromécanique d'énergie réversible soit produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor (fonctionnement génératrice) dans deux quadrants du plan couple – vitesse. Soit absorbe un courant électrique dont la fréquence détermine la vitesse de rotation du rotor (fonctionnement moteur). [20][4][21]

Les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre est égale à la vitesse de rotation du champ tournant sont classifiées avec les machines synchrones. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique. [22]

Les machines synchrones étaient principalement utilisées pour produire de l'énergie électrique à partir de sources mécaniques provenant de différentes sources, sous la forme de générateurs. Par exemple les générateurs éoliens, elles sont utilisées pour améliorer la fiabilité du système d'entraînement, en réduisant le nombre de pièces en rotation. [4][21]

Dans ce chapitre, on va présenter des Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents son fonctionnement et Constitution. D'autre part on va donner une définition à l'aimant permanent et leur types. Enfin nous présentons la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle simple et fiable pour la simulation.

## **II.2 Généralités sur les machines synchrones à aimants permanents**

### **II.2.1 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents**

Toutes machines triphasées sont constituées d'une partie fixe (stator) et d'une partie mobile (rotor) (Figure II-1). Le stator renferme un bobinage alimenté en triphasé, et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation. Mais dans ce cas-là (MSAP) le rotor est remplacé par des aimants, et ceci présente l'avantage d'éliminer le système balais bague, les pertes rotoriques ainsi que la présence d'une source d'alimentation afin de fournir le courant d'excitation. [21][5]

Le stator de structure ordinairement lisse, porte des encoches à l'intérieur desquels sont disposés des enroulements de phases. En mode générateur la machine fournit de l'énergie au réseau, tandis qu'en mode moteur elle en consomme plutôt. Le rotor est généralement à pôles lisses ou à pôles saillants. [4]



*Figure II-1 Constitution de la machine synchrone à aimants permanents [4] [23]*

### **II.2.2 Les aimants permanents**

Un aimant comprend un pôle nord et un pôle sud. Deux pôles de types contraires (N-S) s'attirent alors que deux pôles de même type (N-N ou S-S) se repoussent. Les matériaux utilisés pour leurs propriétés magnétiques se classent en fonction de la largeur de leur cycle d'hystérésis et forment deux grandes familles. La première est celle des matériaux magnétiques durs (à large cycle), appelés communément « aimants permanents » car leur aimantation ne varie pas sous l'effet d'un champ magnétique extérieur. La seconde est celle des matériaux magnétiques dits « doux ». [20][22]

Un aimant permanent est tout corps ayant la capacité ou la propriété de conserver une très grande aimantation rémanente et qui est difficile de se désaimanter lorsqu'il est aimanté. [21]

Les aimants permanents peuvent être subdivisés en plusieurs groupes. Il existe une grande variété de matériaux, pour aimants permanents, dont les propriétés et les applications sont diverses. Dans le cas des machines tournantes, on distingue trois types : [20][22]

#### ➤ *Aimants en ferrites*

Une ferrite est un matériau céramique composé d'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ , rouille) de baryum et de strontium et donc électriquement non-conducteurs et quasiment ferromagnétiques. Caractérisés par une induction rémanente n'est pas très élevée et un champ coercitif élevé. Ces aimants possèdent des performances modestes mais se sont imposés dans de très nombreuses applications en raison de leur faible coût. [20][21][22]

#### ➤ *Aimants métalliques (ALNICO)*

Les aimants en Alnico sont les alliages de fer, d'aluminium, de nickel, et de cobalt. Caractérisés par une induction rémanente élevée, sensibles aux champs antagonistes et un champ coercitif faible, ils sont donc de caractéristiques énergétiques médiocres, leur part de marché est assez réduite et leur coût est moyen. [21][22]

➤ *Aimants terres-rares*

Les aimants en Alnico sont les alliages de samarium cobalt. Caractérisés par une induction rémanente et un champ coercitif élevés, ils sont, actuellement, les plus performants des aimants permanents utilisés dans la construction des machines synchrones, leur inconvénient reste le prix est cependant élevé. [21][22]

### II.2.3 Principe de fonctionnement MSAP

Le principe de fonctionnement est basé sur la création d'une variation de flux magnétique par la rotation d'un aimant (nommé rotor) passant devant les faces de trois bobines fixes (appelées stator) alimentées par le réseau, les f.é.m. induites dans ces bobinages provoquent la circulation du courant induit qui créent à leur tour un champ statorique dans l'entrefer, qui tourne à la même vitesse que celle de champ inducteur. Dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant. [5][24]

### II.2.4 Structures des machines synchrones à aimants permanents

On classe les structures des machines synchrones à aimants permanents à la disposition des aimants sur le rotor. Leurs différentes configurations incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). On va donc donner des simplifications des deux types de machines : [22]

#### II.2.4.1 Structures à flux radial (RFPM)

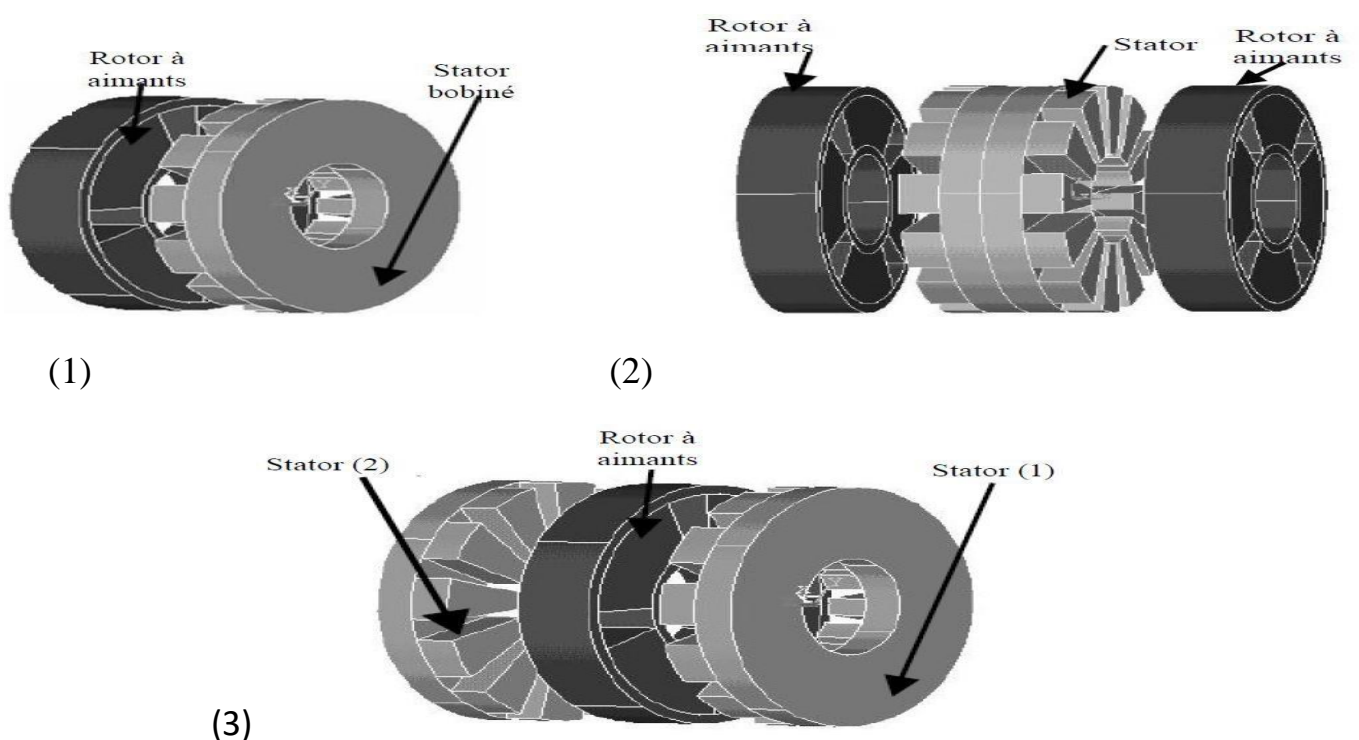
La machine synchrone à flux radial (RFPM) est considérée comme la machine à aimants la plus conventionnelle. Elle est appliquée couramment pour l'entraînement direct. Son stator est similaire à une machine d'induction classique. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure II.6). La première machine synchrone à flux radial à avoir été développée est une machine dont le bobinage est réparti et les aimants placés en surface. Il est possible de la retrouver pour équiper un turbo-compresseur (50 kW, 70000 tr/min, 8 pôles) ou pour des applications dans le domaine de l'automobile (40 kW, 6000 tr/min, 4 pôles). [21][22]



**Figure II-2** Exemple de structures à rotor Interne [A] et à rotor Externe [B]. [22]

### II.2.4.2 Structures à flux axial (AFPM)

La machine synchrone à flux Axial (AFPM) comporte un ou plusieurs disques fixes bobinés et un ou plusieurs disques mobiles supportant les aimants permanents. Elle consiste Plusieurs configurations qui peuvent être trouvés concernant les positions de rotor et les arrangements d'enroulement donnant des degrés de libertés en vue de choisir la structure de la machine la plus appropriée dans l'application considérée celle à structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (1) et celles à double entrefer avec soit, un seul stator inséré entre deux rotors(2) ou un seul rotor inséré entre deux stators(3) comme montrer par la (Figure II-6). [20][22]



**Figure II-3** Différentes configurations d'une Structures à flux axial (AFPM). [22]

## II.2.5 Types des machines synchrones

Le rotor d'une machine synchrone divisée à deux familles de machines, à pôles lisses et à pôles saillants.

### II.2.5.1 Machines à pôles lisses

Les machines à pôles lisses est caractérisé par un bobinage inducteur réparti dans des encoches fraisées dans la masse du rotor cylindrique, ces machines sont destinées à fonctionner à grande vitesse de rotation, elles sont à entrefer constant. [5]

### II.2.5.2 Machine à pôles saillants

La machine à pôles saillants comporte souvent hormis l'enroulement inducteur placé sur les pôles. Un enroulement logé dans des encoches circulaires semi-fermées disposées à la surface de l'épanouissement polaire, cet enroulement est appelé amortisseur. [21]

### II.2.6 Les avantages et Inconvénient de la MSAP

La MSAP a plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

**Tableau II-1 : Avantages et inconvénients de la MSAP. [21][22][23][25][6]**

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Absences des contacts glissants.</li> <li>➤ Un bon rendement.</li> <li>➤ Absence des balais et d'alimentation continue.</li> <li>➤ Fonctionnement à très haute vitesses.</li> <li>➤ Construction et maintenance plus simple.</li> <li>➤ un couple massique élevé.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La présence de pulsation de couple.</li> <li>➤ Interaction magnétique due au changement de structure.</li> <li>➤ Pertes par courants de Foucault dans les aimants.</li> <li>➤ Technologie coûteuse liée au coût des aimants.</li> <li>➤ Impossibilité de régler l'excitation.</li> <li>➤ Le prix des aimants le rend plus cher.</li> <li>➤ Problème de tenue en température des aimants.</li> </ul>

## II.3 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

La modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce cela permet d'étudier le comportement de différentes variables de manière dynamique et statique et d'utiliser ce modèle dans les simulations. [26][21]

### II.3.1 Hypothèses simplificatrices

Pour simplifier la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents, nous imposons quelques hypothèses simplificatrices : [21] [22] [6] [3]

- ✓ On néglige la saturation de circuit magnétique.
- ✓ L'effet d'encoche est négligeable.
- ✓ La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- ✓ Les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés.
- ✓ On néglige les courants de Foucault et le phénomène d'hystérésis.

✓ L'effet de peau de la température négligé.

### II.3.2 Équations de la génératrice synchrone à aimants dans le repère (abc)

La modélisation d'une GSAP comprend trois types d'équations : électrique, mécanique et électromagnétique.

#### II.3.2.1 Équations électriques

La génératrice synchrone à aimant permanent est constituée d'un stator avec des Enroulements connectés en étoile (neutre isolé) ; d'où la somme instantanée des courants Statorique est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple. Les équations électriques dans le plan (a, b, c) peuvent s'écrire comme suit : [21] [27] [29]

$$\begin{cases} v_a = -R_s \cdot I_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ v_b = -R_s \cdot I_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ v_c = -R_s \cdot I_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{cases} \quad II-1$$

Les équations II-1 peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [-R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad II-2$$

$$[-R_s] = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} \quad II-3$$

Avec :

$[v_a v_b v_c]^t$  : Le vecteur des tensions statoriques.

$[i_a i_b i_c]^t$  : Le vecteur des courants statoriques.

$[\psi_a \psi_b \psi_c]^t$  : Le vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$R_s$  : La résistance d'une phase statoriques.

### II.3.2.2 Équations magnétique

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme [3] [28]

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + \psi_f \cos(\theta) \\ \psi_b = M_{ba} i_a + L_b i_b + M_{bc} i_c + \psi_f \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \psi_c = M_{ca} i_a + M_{cb} i_b + L_c i_c + \psi_f \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{array} \right\} \quad II-4$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} L_a = L_b = L_c = L \\ M_{ca} = M_{ab} = M_{cb} = M \\ M_{ac} = M_{ba} = M_{bc} = M \end{array} \right\} \quad II-5$$

Donc, l'expression s'écrit sous la forme matricielle : [5]

$$[\psi_s] = [L_s][i_s] + [\psi_f] \quad II-6$$

$$[\psi_s] = [\psi_a \psi_b \psi_c]^T \quad II-7$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \quad II-8$$

$$[\psi_{s_f}] = \psi_f \left[ \cos(\theta) \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right]^T \quad II-9$$

### II.3.2.3 Équation mécanique

L'équation mécanique de la GSAP est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f \cdot \Omega \quad II-10$$

$C_m$ : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$f \cdot \Omega$  : Le couple de frottement.

$J$  : Moment d'inertie total de la machine.

### II.3.3 Transformation de Park

Le modèle synchrone dans le référentiel (a, b, c) étant fort complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, le but des transformations matricielles est de le simplifier. [6]

La transformation de Park est un outil mathématique consiste à transformé le système biphasé (d, q) par deux bobines décalées  $\pi/2$  dans l'espace, on peut créer un champ tournant identique à celui par un triphasé (a, b, c) décalées par  $2\pi/3$ , statoriques (a b c) sont remplacés par deux enroulement (d, q) en quadrature. [28]

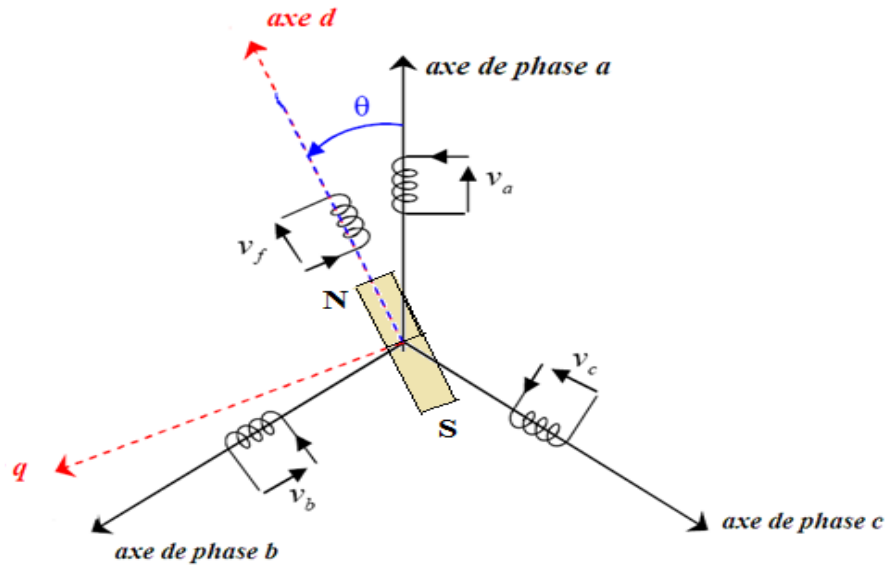


Figure II-4 Représentation de la transformation de Park [6]

La transformation de Park est définie par : [6]

$$\left\{ \begin{array}{l} [v_{dqo}] = [T(\psi)][v_{abc}] \\ [v_{abc}] = [T(\psi)]^{-1}[v_{dqo}] \end{array} \right. \quad \text{II-11}$$

➤ Passage biphasé au triphasé [22]

$$[v_{dqo}] = [T(\psi)][v_{abc}] \quad \text{II-12}$$

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} = [T(\psi)] \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad \text{II-13}$$

➤ Passage triphasé au biphasé [22]

$$[v_{abc}] = [T(\psi)]^{-1}[v_{dqo}] \quad \text{II-14}$$

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = [T(\psi)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_o \end{bmatrix} \quad \text{II-15}$$

X : représente soit le courant soit la tension soit le flux.

$[T(\psi)]$  Sont les matrices de passage directe, qui sont données par : [5]

$$[T(\psi)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\Pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\Pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad II-16$$

La transformation inverse de PARK est la suivante : [5]

$$[T(\psi)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi + \frac{2\Pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi + \frac{2\Pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad II-17$$

### II.3.4 Génératrice synchrone à aimants permanents dans le repère de Park (d, q)

La modélisation d'une GSAP comprend quatre types d'équations : électrique, mécanique et puissance et électromagnétique

#### ➤ Équations électriques

Le modèle de Park de la génératrice synchrone à aimants permanents est défini par les Équations suivantes : [10]

$$\begin{cases} v_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \omega \cdot i_q \\ v_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega \cdot i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad II-18$$

Avec :

$v_d, v_q, i_q, i_d$ : Les composantes directes et en quadrature de la tension et de courant.

$\psi_d, \psi_q$  : Les composantes directes et en quadrature du flux.

#### ➤ Équations magnétique

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\psi_d$  et  $\psi_q$  sont Fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$  : [27] [6]

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad II-19$$

$L_d$  Et  $L_q$  sont les inductances directes et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de  $\theta$ . [6]

$\psi_f$  : Le flux constants des aimants permanents.

➤ **Équation mécanique**

L'équation mécanique de la GSAP est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f\Omega \quad II-20$$

➤ **Équations de puissance**

La puissance instantanée d'entrée peut être écrite comme suit: [21] [22] [6] [3] [27]

$$P_a = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c \quad II-21$$

Dans le plan de Park cette puissance s'écrit :

$$P_a = \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \quad II-22$$

On remplaçant  $v_d$  ET  $v_q$  par leur expressions, et on obtienne :

$$P_a = \frac{3}{2} \left[ \left( R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - i_q \omega \cdot i_q \right) i_d + \left( R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega \cdot i_d + \omega \psi_f \right) i_q \right] \quad II-23$$

Donc l'expression de la puissance absorbée est donnée par l'équation suivante:

$$P_a = \frac{3}{2} \left[ \omega \left[ (L_d - i_q) i_d i_q + \psi_f \cdot i_q \right] + R_s (i_q^2 + i_d^2) + \left( i_q I_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_d \frac{di_d}{dt} \right) \right] \quad II-24$$

➤ **Equation électromagnétique**

L'expression du couple électromagnétique est donnée par la Relation suivante : [24][27]

$$P_{em} = C_{em} \Omega \quad II-25$$

$$\Omega = \frac{\omega}{P}$$

P : nombre de paires de pôles

On peut écrire la formule (II-23) sous la forme:

$$P_a = P_{em} + P_{mag} + P_j \quad II-26$$

Cette puissance est composé de:

✓ Les pertes Joule :

$$P_j = \frac{3}{2} R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad II-27$$

✓ La variation de l'énergie magnétique emmagasinée :

$$P_{mag} = \frac{3}{2} \left( L_q i_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_d \frac{di_d}{dt} \right) \quad II-28$$

✓ Représente la Puissance électromagnétique :

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega \left[ (L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q \right] \quad II-29$$

À partir de la puissance électromagnétique, on peut déduire l'expression du couple électromagnétique avec :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \left[ (L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q \right] \quad II-30$$

## **II.4 Simulation de GSAP**

### **II.4.1 Modélisation de la génératrice d'Essai à vide**

Le fonctionnement à vide est caractérisé par des courants nuls :

$$\begin{cases} i_d = 0 \\ i_q = 0 \end{cases} \quad II-31$$

Les expressions de tension et du couple deviennent :

$$\begin{cases} v_d = 0 \\ v_q = \omega \psi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad II-32$$

Avec  $\psi_f = 0.9 \text{wb}$ ,  $J = 0.00141 \text{kg.m}^2$ ,  $c_m = 6 \text{Nm}$ ,  $f = 0 \text{Nm / rad / s}$ ,  $P = 4$ .

D'après cette équation on aboutit au schéma de simulation bloc suivant :

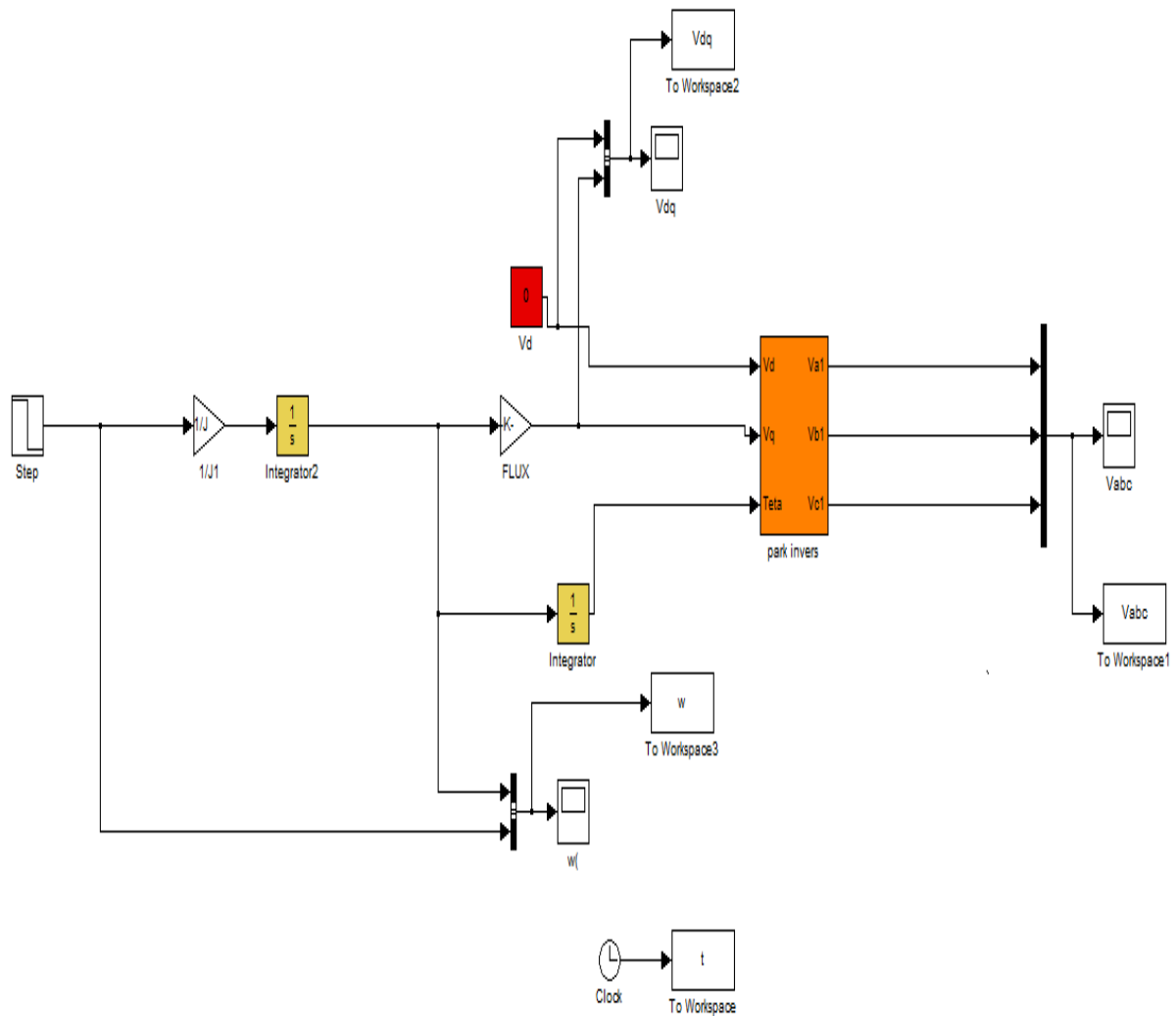
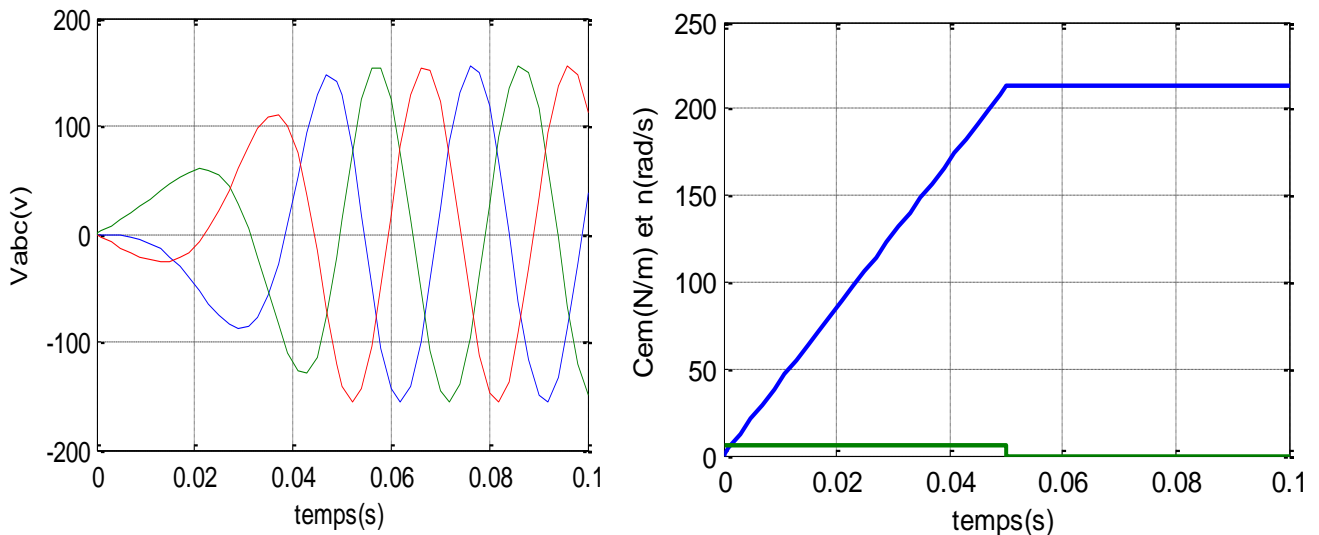


Figure II-5 Schémas bloc de simulation de la génératrice à aimants permanents a vide.

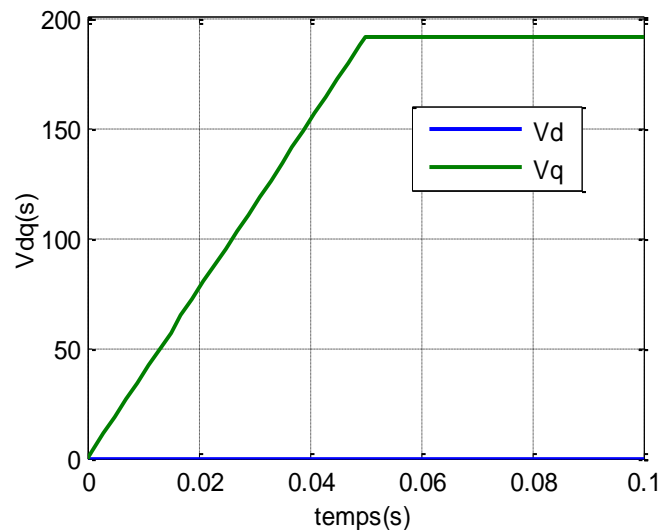
➤ Résultats de simulation

On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 6.28Nm pour une durée de 0.1 (s), puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (II-7) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 215 (rad/s). Alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable



(a) : la tension  $v_{abc}$

(b) : vitesse de rotation et couple moteur



(c) : la tension  $v_d$  et  $v_q$

Figure II-6 Les résultats de la GSAP à vide.

#### II.4.2 Modélisation de la génératrice en charge

La génératrice alimente une charge électrique ( $R_{ch} \cdot L_{ch}$ ). Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice. On applique d'une part, les équations données par II-6 [21][3]

$$\begin{cases} v_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \omega \cdot i_q \\ v_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega \cdot i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad \text{II-33}$$

D'autre part, l'application des tensions  $v_d$  et  $v_q$  sur la charge donne :

$$\begin{cases} v_d = -R_{ch} \cdot i_d - L_{ch} \frac{di_d}{dt} + L_{ch} \omega \cdot i_q \\ v_q = -R_{ch} \cdot i_q - L_{ch} \frac{di_q}{dt} - L_{ch} \omega \cdot i_d \end{cases} \quad II-34$$

En remplaçant les expressions de  $v_d$  et  $v_q$  dans (II-33), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})i_d - (L_d + L_{ch}) \frac{di_d}{dt} + \omega(L_q + L_{ch})i_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})i_q - (L_q + L_{ch}) \frac{di_q}{dt} - \omega(L_d + L_{ch})i_d + \omega\psi_f \end{cases} \quad II-35$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations, elles deviennent :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} \left[ -(R_s + R_{ch})i_d + \omega(L_q + L_{ch})i_q \right] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{(L_q + L_{ch})} \left[ -(R_s + R_{ch})i_q - \omega(L_d + L_{ch})i_d + \omega\psi_f \right] \end{cases} \quad II-36$$

Considérons le flux d'excitation  $\psi_f$  comme grandeur de commande, et les courants  $i_d, i_q$  comme variables d'état.

➤ **Équations d'état**

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

$$[\dot{X}] = [A][x] + [B][v] \quad II-37$$

$$[x] = [i_d \ i_q]^T ; [v] = [0 \ \psi_f]^T \quad II-38$$

Les équations II-36, peuvent s'écrire sous la forme matricielle II-39.

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega\psi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad II-39$$

On peut écrire la matrice [A] comme suit :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad II-40$$

On peut écrire la matrice [A] comme suit :

$$[B][v] = \frac{\omega}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \tag{II-41}$$

Avec

$R_s = 2.875\Omega, R_{ch} = 50\Omega, L_q = 0.0211H, L_d = 0.012H, L_{ch} = 0.002H, \psi_f = 0.9wb, J = 0.00141kg.m^2,$   
 $f = 0Nm / rad / s, P = 4.$

➤ *Simulations de GSAP en charge*

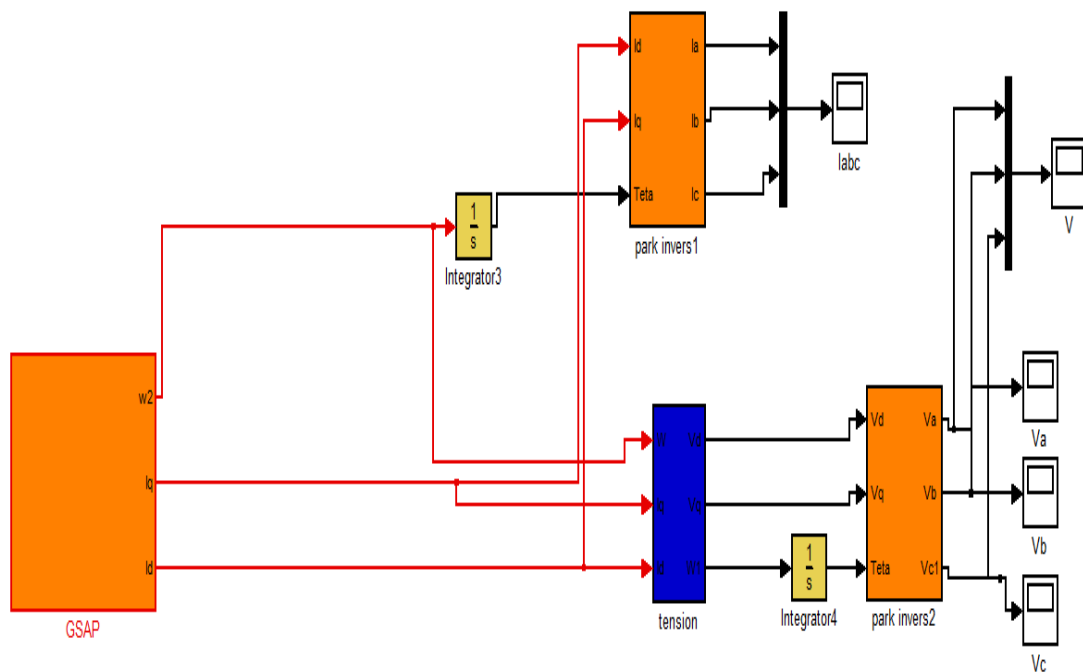
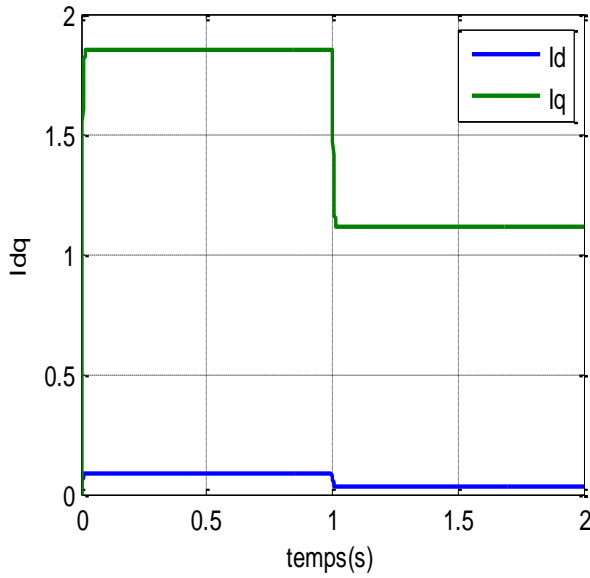


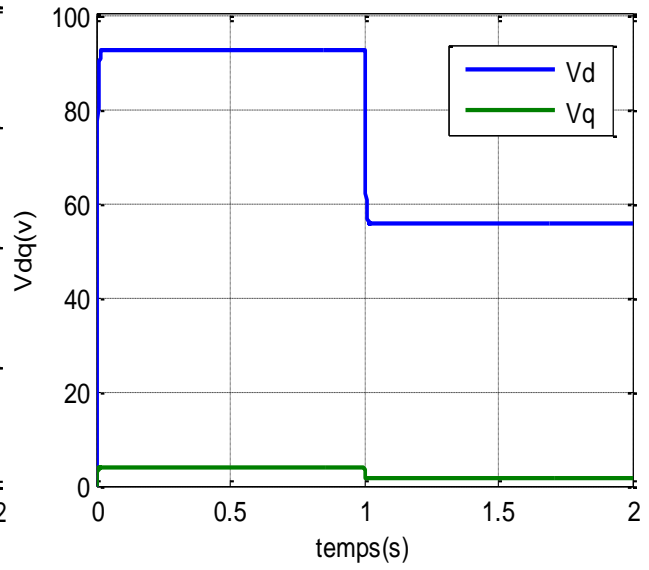
Figure II-7 Bloc de simulation de la GSAP en charge

➤ Résultats de simulation

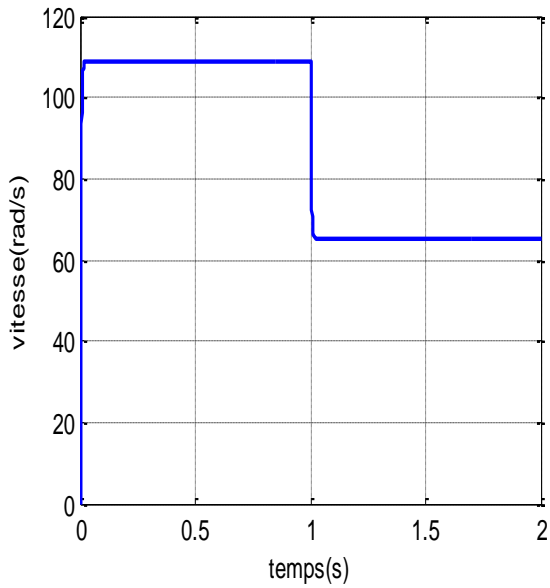
Les résultats de simulation obtenue sont montés par les figures suivant :



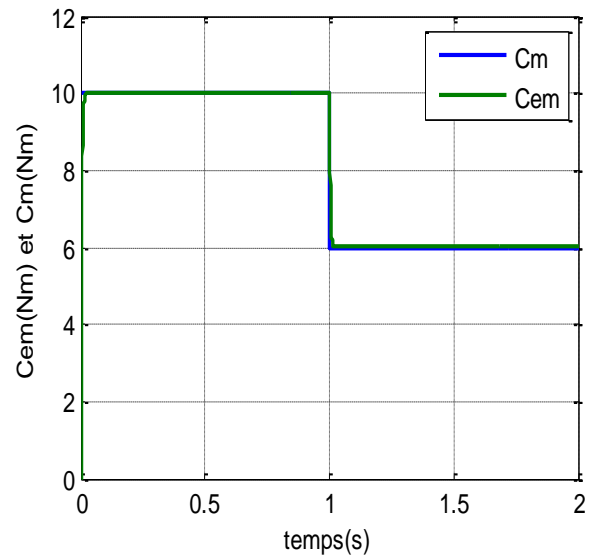
(a): Composantes  $i_d$  et  $i_q$



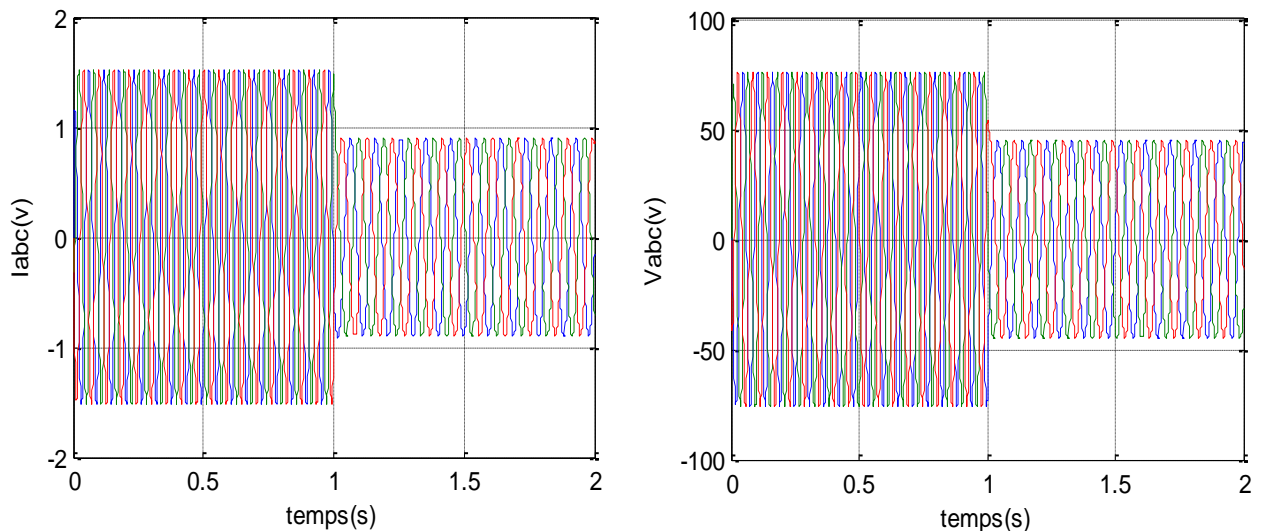
(b): Composantes  $v_d$  et  $v_q$



(c): vitesse de rotation



(d) : Couples électromagnétiques et moteur



(e): courant statorique

(f): Tension statorique

**Figure II-8** simulation GSAP sur une charge.

### ➤ *Interprétation des résultats*

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués Figure (II.9.d). On constate sur la Figure (II.9.c) que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés sur les figures(II.9.e), et(II.9.f). Ce-ci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 10 (Nm), à 6(Nm), la vitesse mécanique varie de 109.04 (tr/mn) jusqu'à 65.33 (tr/mn). La tension et le courant diminuent respectivement de 75.75 (V), à 45.40 (V), et de 1.515 (A), à 0.9078 (A). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.

## II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur les machines synchrone à aimant et le différent type de cette machine en ce basant sur les caractéristiques et les différents types des aimants permanents, les avantages et les inconvénients, en suite nous avons abordé la modélisation de génératrice synchrone a aiment permanant dans sa structure générale ce modèle. En fin, nous avons présenté la simulation de la génératrice GSAP à vide et en charge.

*Chapitre III*  
*Modélisation et simulation de l'énergie*  
*éolienne*

### III.1 Introduction

Le système de Conversion de l'énergie éolienne est un système complexe a cause de la multiplicité des domaines existants, a savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, électrique et les facteurs déterminant la puissance mécanique. Un modèle globale rassemblant tous ces paramétrés est nécessaire de modéliser chaque élément constituant ce système individuellement.

Dans ce chapitre, On s'intéresse essentiellement à l'étude et la modélisation de l'ensemble d'une chaîne éolienne de vent et la turbine, Après nous établissons un modèle de simulation pour chacun. [3][5]

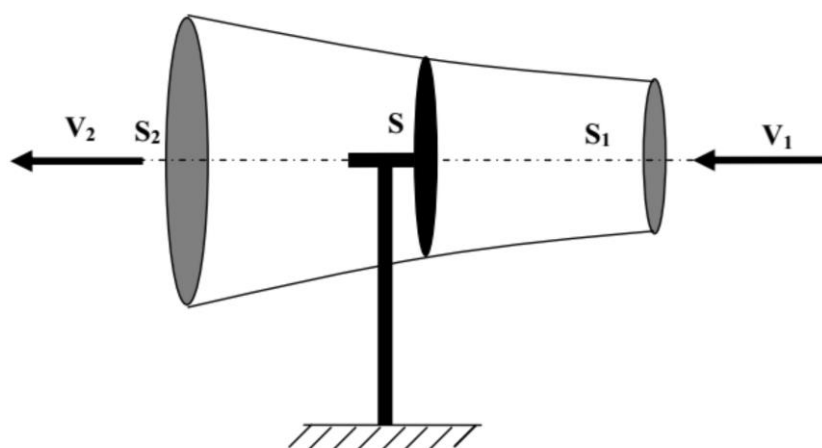
### III.2 Conversion de l'énergie mécanique

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique du vent qui traverse les pales de la turbine éolienne en énergie mécanique, pour faire tourner le rotor de cette dernière. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. [15][35]

#### III.2.1 Loi de Betz

La loi de Betz est une loi physique créée par l'Allemand Albert Betz qui, en 1929 confirme qu'une éolienne ne peut jamais être convertie en énergie mécanique plus de 59% de l'énergie cinétique (vent).

De la loi d'Albert Betz, on peut voir sur la figure III.1 que la vitesse  $V_2$  absorbée par le rotor est nécessairement inférieure à la vitesse  $V_1$  située dans en amont de l'éolienne. [15][34][35]



**Figure III-1** Tube de courant d'air autour d'une éolienne [15]

Après, nous supposons que la vitesse du vent qui traverse le rotor soit égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé avant l'éolienne  $V_1$  et la vitesse après passage du rotor  $V_2$ :

$$V_m : \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{III-1}$$

La Masse d'air en mouvement (M) : est donnée en fonction de la densité de la zone et de la surface et la vitesse moyenne.

$$M = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad \text{III-2}$$

La puissance mécanique extraite par le rotor des pales P<sub>m</sub> est donnée par :

$$P_m = \frac{M \cdot (V_1^2 + V_2^2)}{2} \quad \text{III-3}$$

En remplaçant III-2 par son expression dans III-3 la puissance devient:

$$P_m = \frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 + V_2^2)}{4} \quad \text{III-4}$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent. En mettant V<sub>2</sub>=0 dans l'expression III-4:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho s V_1^3 \quad \text{III-5}$$

S : Surface balayée par les pales (m<sup>2</sup>).

V : Vitesse du vent (m/s).

ρ : Densité de l'air (kg/m<sup>3</sup>).

### III.2.2 Le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance est le rapport entre la puissance mécanique extraite par le rotor et la puissance totale théoriquement disponible sur la surface S.

$$C_p = \frac{P_m}{P_v} \quad \text{III-6}$$

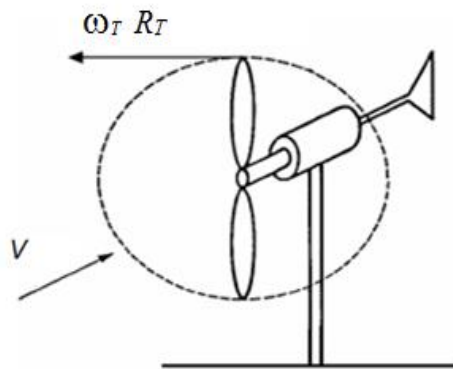
$$C_p = \frac{\frac{\rho \cdot s \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 + V_2^2)}{4}}{\rho s V_1^3} \cdot \frac{1}{2} \quad \text{III-7}$$

$$C_p = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad \text{III-8}$$

Le coefficient  $C_p$  est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, est de  $\frac{16}{27}$  soit **0.593**. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte. [15][34]

$$\lambda = \frac{\omega_T \cdot R_T}{V}$$

III-9



**Figure III-2** La vitesse spécifique ou Ration de vitesse  $\lambda$

$R_T$ : Rayon de la surface balayée en m.

$\lambda$ : Le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

$\omega_T$ : Vitesse de rotation de la turbine éolienne en rad/s.

### III.3 Modélisation de vent

L'énergie cinétique du vent est le principal élément du système de conversion d'énergie éolienne. Le vent est un champ de déplacement de masses d'air au niveau de la turbine éolienne crée des forces sur les surfaces de ses pales, qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif.

Cette énergie caractérisée par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour. Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes, ...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesses. [5] [15] [33] [27]

La vitesse de vent est vecteur tridimensionnelle. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent considéré dans ce modèle se limite à une dimension. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps

$$V = f(t)$$

III-10

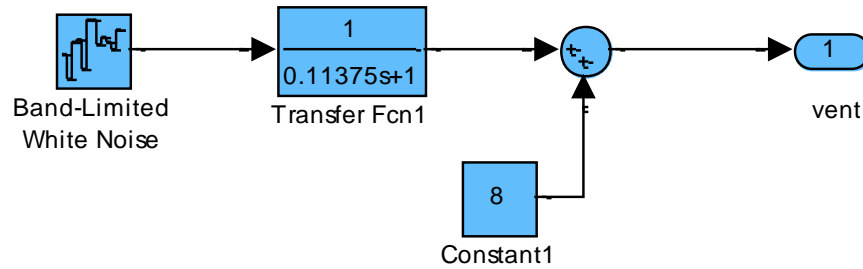


Figure III-3 Modèle du vent sous Matlab/Simulink.

### III.4 Modélisation de la turbine éolienne

#### III.4.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la Turbine

Chaque éolienne formée par trois pales réglables, fixées sur un arbre du Turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ce permet de déduire que chaque partie de cet ensemble est soumise à trois contraintes, à savoir sa propre inertie  $J_{pale}$ , frottement  $Db$  et contrainte élastique  $Kb$ .

La vitesse de rotation de l'ensemble est nommée vitesse angulaire de la turbine et est nommée  $\omega_a$  cette vitesse est relativement faible, et pour cela l'arbre d'entraînement est relié à un multiplicateur qui est caractérisé par son rapport de transmission  $G$  et qui vise à ramener la vitesse de l'éolienne à une valeur suffisante pour faire tourner la génératrice électrique.

Car à la complexité du système, il est impossible de décrire un modèle complet prenant en compte tous les paramètres influant sur le fonctionnement de la turbine l'éolienne ; pour composer avec cela, il faut faire des hypothèses simplificatrices, afin d'obtenir Les modèles les plus fréquemment, simples et obéissent rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique.

- ✓ La répartition de la vitesse du vent doit être identique et uniforme sur les trois pales
- ✓ le coefficient de frottement par rapport à l'air  $Db$  doit être ignoré.
- ✓ le coefficient de frottement par rapport au support est négligeable.
- ✓ Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté générateur. [5][24][34][27]

$J_{pale}$  : Inertie

$Kb$  : Élasticité

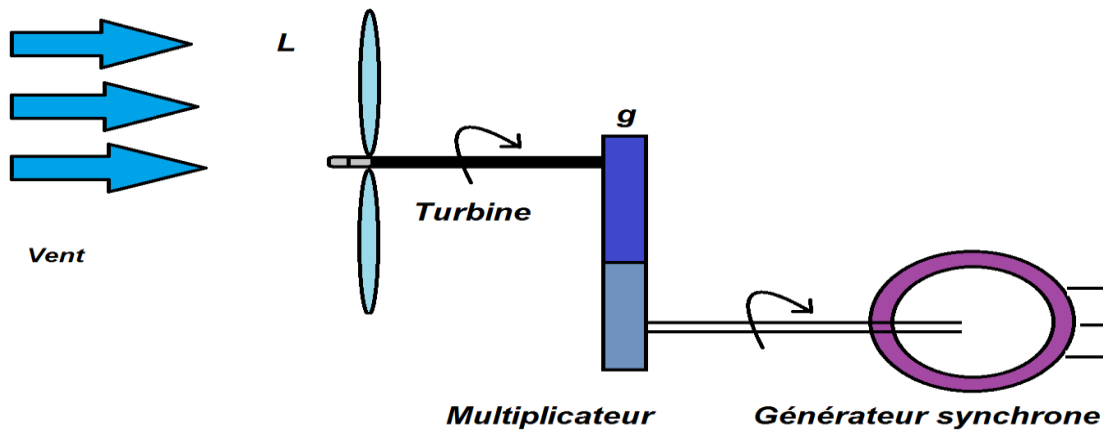
$Db$  : coefficient de frottement par rapport à l'air

$G$  : l'arbre d'entraînement

$\omega_a$  : vitesse angulaire de la turbine

### III.4.2 Modèle de la turbine

Dans ce travail on va étudier une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $L$  entraînant une génératrice synchrone à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $g$ .



**Figure III-4** Schéma de fonctionnement de la turbine éolienne.

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse  $V$  à un moment donné et traverse une certaine surface  $S$ , la puissance du vent est donnée par la relation suivante : [3]

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{III-11}$$

$\rho$  : La densité de l'air, qui vaut approximativement  $1.22 \text{ kg/m}^3$ .

$V$  : La vitesse du vent.

$S$  : La surface balayée par la turbine. Le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

$C_p$  : Coefficient de puissance.

En utilisant le coefficient de puissance  $C_p(\lambda)$  La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine, s'écrit avec : [5]

$$P_{\text{aér}} = P_v \cdot C_p = C_p(\lambda, \alpha) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad \text{III-12}$$

La vitesse spécifique ou Ration de vitesse  $\lambda$  est défini comme montent dans la figure III-5.

$$\lambda = \frac{\omega_m \cdot R_T}{V} \quad \text{III-13}$$

La turbine, utilisée dans le cadre de notre travail, est une éolienne "Voilure tripale." A axe horizontal. La surface  $S$  donnée par la formule suivant :

$$S = \pi \cdot R^2 \quad \text{III-14}$$

On regroupe les équations précédentes, La puissance aérodynamique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{\text{aér}} = C_p \cdot P_V = C_p(\lambda, \alpha) \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2} \quad \text{III-15}$$

Avec :

$\omega_T$ : vitesse de rotation de l'éolienne (rd/s)

R: Rayon de la turbine en mètre (m)

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la vitesse du vent  $V$  et des caractéristiques de la turbine éolienne elle-même (nombre de pales, leur rayon R, leur angle de calage  $\alpha$  et de leur vitesse de rotation  $\omega_T$ ) Plusieurs littératures ont présenté la variation du coefficient de puissance  $C_p$  par la formule. [24] [5]

$$C_p = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \alpha - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad \text{III-16}$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\alpha} - \frac{0.035}{\alpha^3 + 1} \quad \text{III-17}$$

$C_1$  jusqu'à  $C_6$  : les coefficients liés aux caractéristiques de la turbine.

**Tableau III-1** Caractéristiques de la turbine éolienne

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

la figure III-5 représente la variation de  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de la pale  $\alpha$  La première remarque qui peut être apportée est la diminution du coefficient de puissance  $C_p$  (0.4 à 0.35) avec l'augmentation de l'angle de calage ( $\alpha = 2^\circ$  à  $\alpha = 4^\circ$ ) et ainsi de suite avec les autres valeurs mais nous qu'avec un angle de calage  $\alpha = 2^\circ$ , nous observons que la courbe de puissance couvre une large gamme de vitesse, avec un coefficient  $C_p = 0.4$  et ne dépasse pas la valeur 0.59.

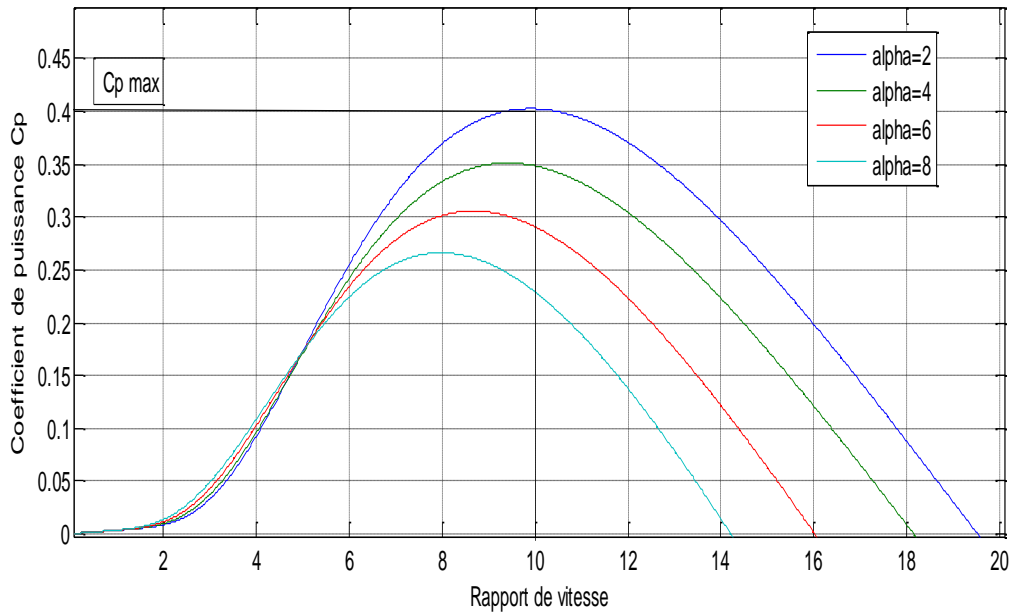


Figure III-5 coefficient de puissance Cp en fonction la vitesse spécifique  $\lambda$  de la turbine

Le couple aérodynamique est déterminé par :

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\omega_T} \tag{III-18}$$

$$P_{aér} = C_p \cdot P_V \cdot \frac{1}{\omega_T} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\omega_T} \tag{III-19}$$

$C_{aér}$ : Le couple statique fournie par l'éolienne.

### III.5 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est un convertisseur mécanique qui augmente la vitesse de l'arbre lent de la turbine éolienne à une vitesse plus rapide, ce qui permet l'entraînement de la génératrice électrique Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes : [24] [5]

Le couple après multiplicateur est déterminé par:

$$C_m = \frac{P_{aér}}{\omega_m} \tag{III-20}$$

Avec  $\omega_m = G \cdot \omega_T$  III-21

Donc

$$C_m = \frac{C_{aér} \cdot \omega_T}{\omega_m} \quad III-22$$

$$C_m = \frac{C_{aér} \cdot \frac{\omega_m}{G}}{G \cdot \omega_T} \quad III-23$$

$$C_m = \frac{C_{aér}}{G} \quad III-24$$

$\omega_m$  : Vitesse de rotation après multiplicateur ou vitesse mécanique en (rad/s).

$C_m$ : Couple après multiplicateur ou couple électromagnétique (N.m).

G: Gain de multiplication.

### III.6 Modélisation de l'arbre Mécanique.

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor, elle est définie entre la pale et le multiplicateur. [35][15]

$$C_{mec} = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad III-25$$

Où J : Inertie totale ramenée au rotor de la génératrice, elle est donnée par:

$$J = \frac{J_T}{G^2} + J_g \quad III-26$$

Avec

$J_T$ : Inertie de la turbine.

$J_g$  : Inertie de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_m - C_{ém} - C_f \quad III-27$$

Où

$$C_f = f \cdot \omega_m \quad III-28$$

$C_m$  : Le couple après le multiplicateur en (N.m).

$C_{em}$ : Le Couple électromagnétique de la génératrice en (N.m).

$C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements en (N.m).

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

On aura :

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + f \cdot \omega_m = C_m - C_{ém}$$

III-29

La figure III-6 présente un schéma de commande basé sur le modèle mathématique de différentes parties du système éolien.

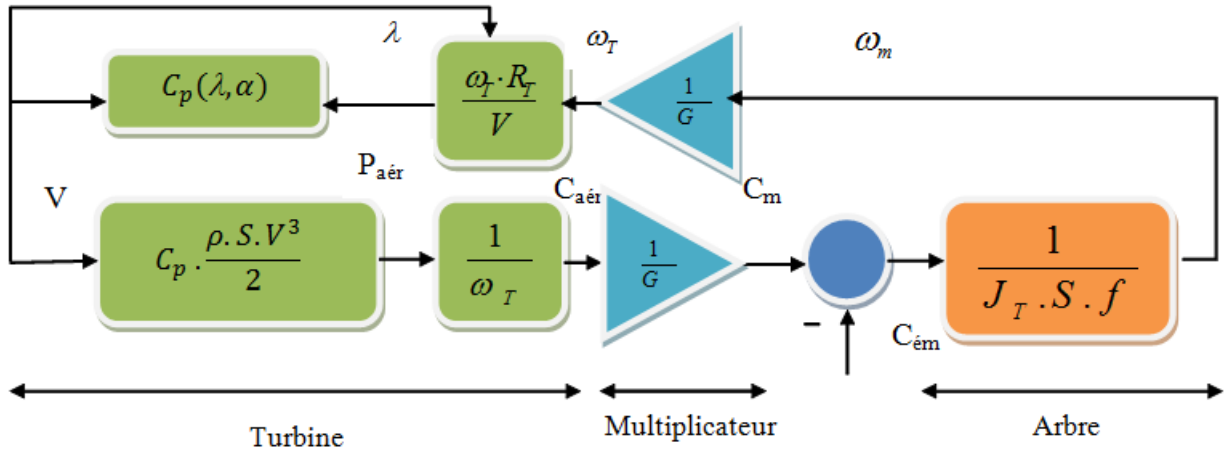


Figure III-6 le modèle mathématique de différentes parties du système éolien

### III.7 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale  $P_n$  obtenue à partir d'une vitesse du vent nominale,  $V_n$ . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$ , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante le fonctionnement d'une turbine éolienne peut être déterminé dans quatre zones en fonction de la vitesse du vent ( $V_n$ ,  $V_d$  et  $V_m$ ). [35][24]

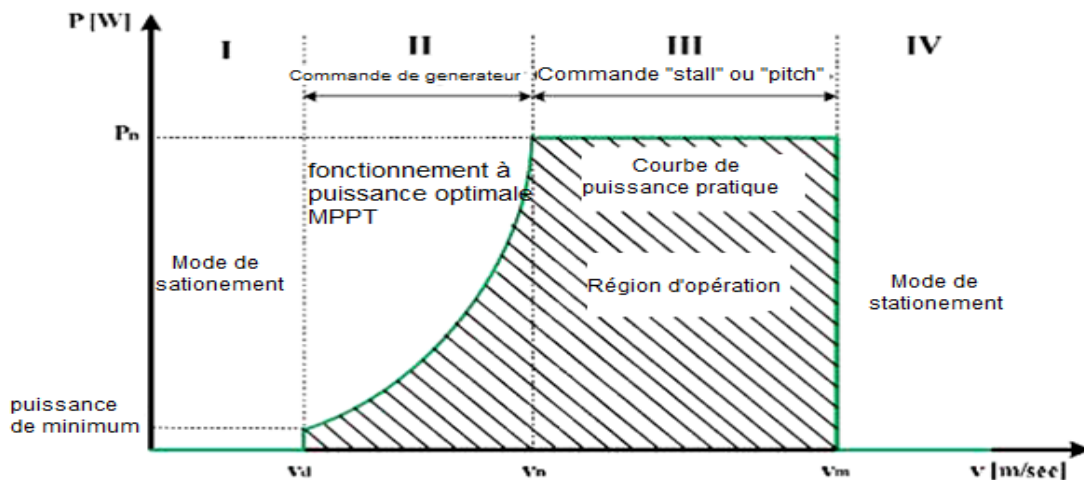


Figure III-7 Zones de fonctionnement d'une turbine éolienne. [5]

La zone équivalente mesurée sur l'éolienne est représentée : [35] [29] [5]

- Zone 01 : elle représente la zone de démarrage où la vitesse du vent est très faible elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieur à certain
- Zone 02 lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximal du vent est applique. L'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est-à-dire  $\alpha=0^\circ$ . Ce processus continue jusqu'à atteindre la valeur nominale de la vitesse mécanique de la génératrice.
- Zone (3) : où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à la puissance nominale Pn. (pitch angle).
- Zone (4) : dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie

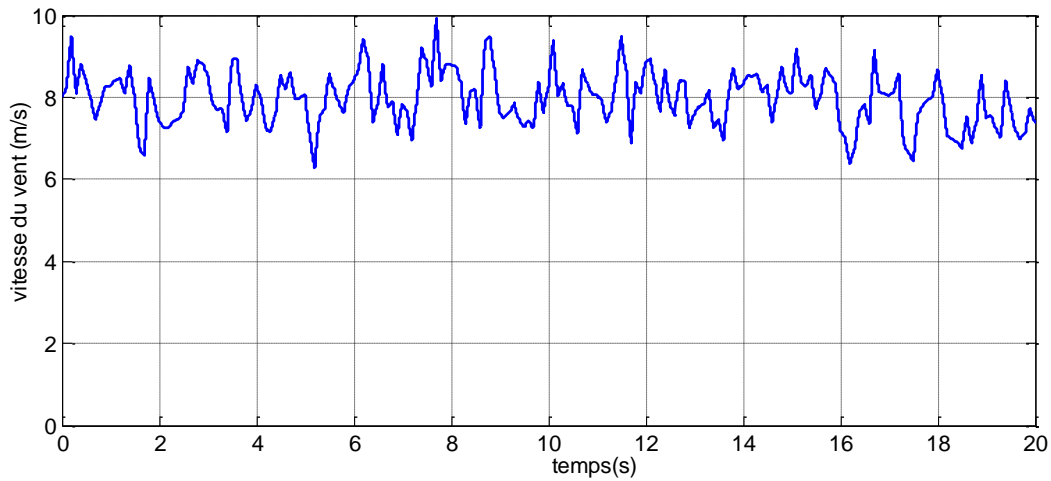
Il existe deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite de la turbine à la valeur de la puissance nominale de la génératrice :

- système « pitch » ou « à pas variable » qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone (3) de vitesse
- système « stall » ou à « décrochage aérodynamique », le plus robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse du vent, mais la courbe de puissance chute plus vite: il s'agit donc d'une solution passive.

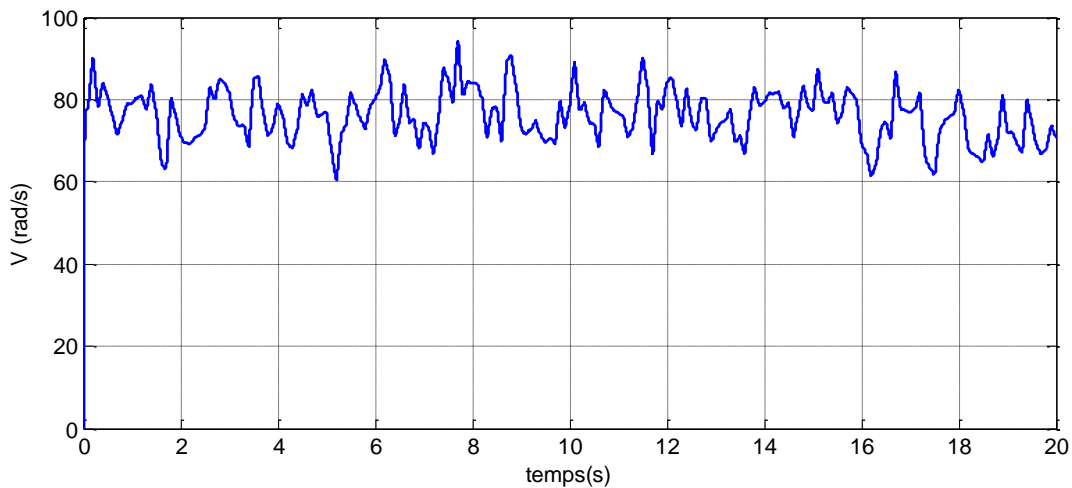
### III.8 Simulation de la turbine éolienne

La simulation des schémas blocs de la figure III-6 dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Le profil de vent qui sera appliqué à l'entrée de ce système est réglé à une vitesse moyenne de 8 m/s. La mise en application du modèle MATLAB/Simulink .



*Figure III-8 la vitesse du vent*



*Figure III-9 Vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps*

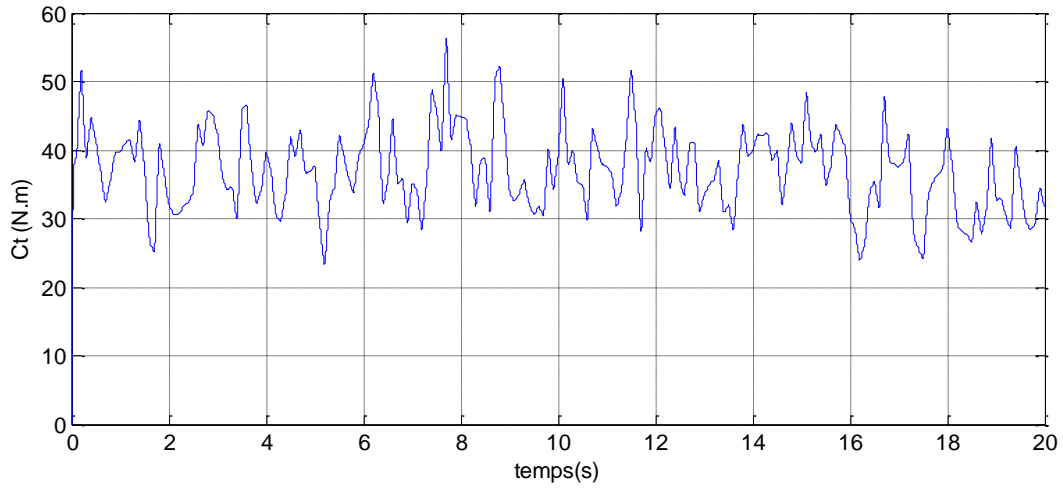


Figure III-10 Couple de la turbine en fonction du temps

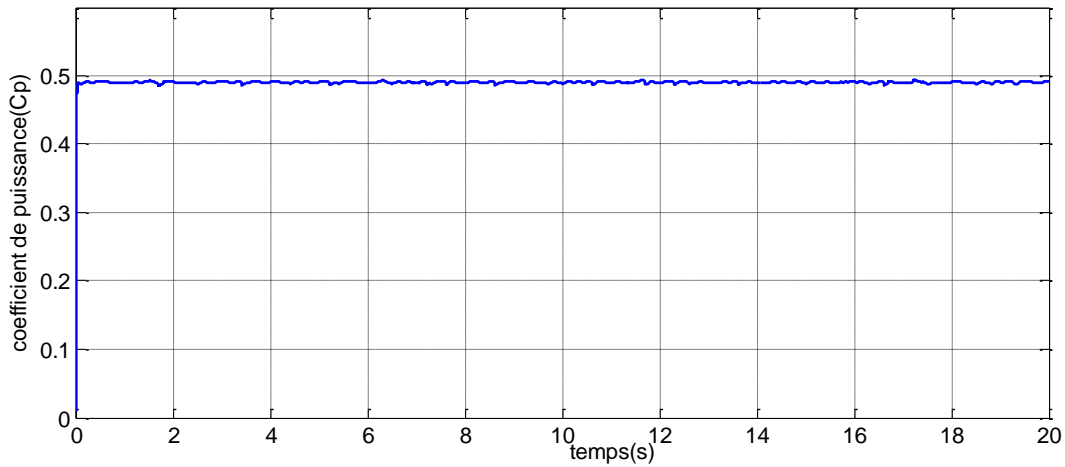


Figure III-11 Coefficient de puissance en fonction du temps

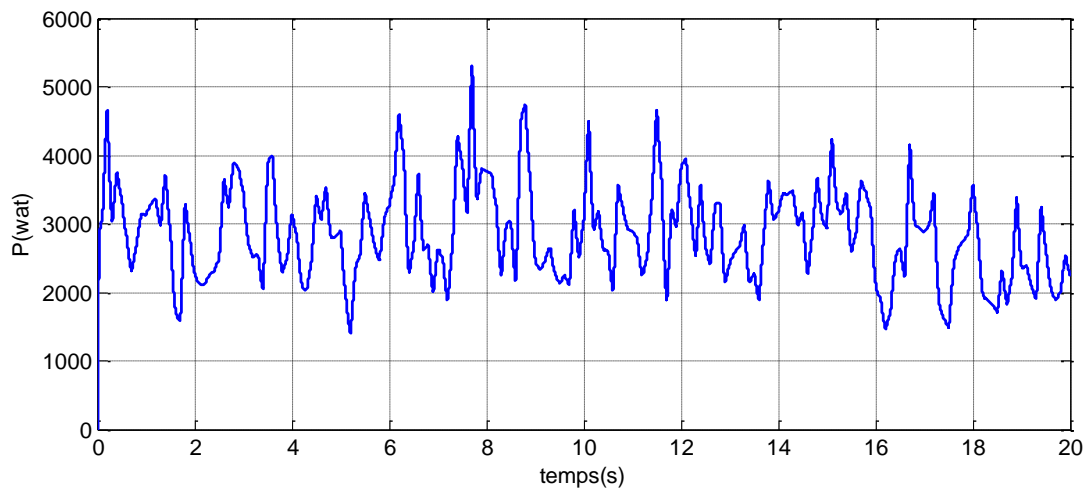


Figure III-12 Puissance de turbine et la puissance de générateur en fonction du temps

### ***III.9 Conclusion***

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de la turbine éolienne Utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique.

Pour meilleure compréhension du fonctionnement des éoliennes, à partir de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (loi de Betz), nous avons décrit les différents éléments constitutifs de la turbine et établi un modèle mathématique basé sur ses équations caractéristiques.

Enfin nous avons effectué la simulation de l'éolienne sous MATLAB/Simulink, avec une vitesse de vent variable.les résultats obtenus montrent que la vitesse mécanique de la turbine et le couple électromagnétique suivent parfaitement la valeur de référence avec le maintien du coefficient de puissance.

***Chapitre IV***  
***Commande Backstepping d'une génératrice***  
***synchrone à aimants permanents***

### **IV.1 Introduction**

La technique du Backstepping est une méthode de commande applicable à une large classe de systèmes non linéaires, Elle combine la notion de fonction de contrôle de Lyapunov qui assure la stabilité avec une procédure de conception récursive. Cela surmonte la barrière dimensionnelle des systèmes d'ordre supérieur et exploite la flexibilité de conception de leurs contrôleurs. Cette méthode à été développée par Kanellakopoulos et al. En 1991 et inspiré par les travaux de Feurer et Morse de 1978 d'une part et Tsiniias en 1989, Kokotovit et Sussmann en 1989 d'autre part.

Son principe est d'établir la loi de commande du système non linéaire en considérant certaines variables d'état comme étant des commandes virtuelles et leurs concevoir des lois de commande intermédiaires.

La commande par la méthode Backstepping donné un nouveau souffle à la commande des systèmes non linéaires, qui malgré les grands progrès réalisés, manquait d'approches générales. Le Backstepping présente une alternative prometteuse aux méthodes de contrôle des systèmes non linéaires.

Dans ce chapitre, on présente le principe, la conception de la commande Backstepping pour un système non linéaire d'ordre général, puis on applique sur notre système éolien à machine synchrone à aimant permanent. [36][37][6][25]

### **IV.2 Principe de la commande Backstepping**

Ces dernières années, grands progrès ont été réalisés dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. La technique du Backstepping est l'une de ces nouvelles percées dans ce domaine. L'idée consiste à calculer une loi de commande afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction (de Lyapunov) soit définie positive et que sa dérivée soit toujours négative. La méthode consiste à fragmenter le système en un ensemble de sous-systèmes imbriqués d'ordre décroissant. L'objectif de cette technique est de calculer, en plusieurs étapes, une commande qui garantit la stabilité globale du système.

On présente quelques définitions conduisant à la compréhension de la méthode de Backstepping.

➤ **Point d'équilibre** : Physiquement, un système est en équilibre quand il conserve son état en absence de forces externes. Mathématiquement, cela équivaut à dire que la dérivée  $\dot{x}$  de son état est nulle.

$$\dot{x} = f(x)$$

➤ **Stabilité** : On dit qu'un système est stable lorsque il revient à son état d'équilibre si l'on excite par une impulsion, il est instable lorsque il s'éloigne.

➤ **Stabilité de Lyapunov** : Considérons le système invariable décrit par l'équation suivante :

$$\dot{x} = f(x)$$

Commençons à l'état initial  $x(0)$ . Supposons que  $x_{eq}$  est un point d'équilibre du système,

$f(x_{eq}) = 0$ . Nous disons que le point d'équilibre est :

➤ Stable, si pour chaque,  $\varepsilon > 0$ , existe,  $\delta(\varepsilon) > 0$ , tel que :

$$\|x(0) - x_{eq}\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_{eq}\| < \varepsilon, \text{ pour tout, } t \geq 0.$$

➤ Asymptotiquement stable, s'il est stable et en plus il existe,  $r > 0$ , tels que,

$$\|x(0) - x_{eq}\| < r \Rightarrow x(t) \rightarrow x_{eq}, \text{ lorsque, } t \rightarrow \infty.$$

➤ Globalement asymptotiquement stable, s'il est asymptotiquement stable pour tous les états initiaux. [37] [28] [38]

### **IV.3 Méthodes d'analyse de la stabilité des systèmes non linéaires**

On appelle systèmes linéaires les systèmes physiques représentés par des équations différentielles linéaires à coefficients constants, l'hypothèse de linéarité équivaut au principe de superposition. Les systèmes non linéaires, par opposition aux systèmes linéaires, sont des systèmes physiques qui ne sont pas régis par des équations linéaires. Autrement dit, le principe de superposition ne peut leur être appliqué.

L'étude de la stabilité des systèmes non linéaires est très complexe. L'approche de Lyapunov est l'approche la plus utilisée pour étudier ce problème. Cette approche a été introduite au 19<sup>ième</sup> siècle par le mathématicien russe Alexandre Mikhailovich Lyapunov.

On distingue deux méthodes de Lyapunov pour l'analyse de la stabilité. [38][28][6]

#### **IV.3.1 La première méthode**

L'objectif de cette méthode est d'analyser la stabilité, d'un système à partir de l'étude de la stabilité locale par linéarisation de la dynamique autour d'un point d'équilibre, Cette méthode est d'une importance limitée, car elle ne permet d'étudier que la stabilité locale et ne donne pas d'information sur le domaine de stabilité globale. [37][25]

**IV.3.2 La deuxième méthode**

Son objectif, est de définir une méthode permettant d'analyser la stabilité d'un système non linéaire sans connaître explicitement les solutions des équations différentielles qui le décrivent. La philosophie de cette méthode n'est que l'extension mathématique d'un phénomène physique observé, car les systèmes mécaniques et électriques perdent de l'énergie pour se stabiliser au point d'équilibre.

L'étude de la stabilité d'un système caractérisé par un vecteur d'état  $x$  consiste alors à chercher une fonction  $V(x)$  (représentative de l'énergie) de signe défini positive, dont la dérivée est semi définie et de signe négative dans le même domaine. [37] [28]

**IV.4 Conception de la commande Backstepping**

Cette méthode s'applique à des systèmes ayant une forme dite triangulaire, telle que L'indique la représentation suivant : [25][ 39][40]

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 \\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 \\ &\vdots \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n)U \end{aligned} \tag{IV-1}$$

Avec  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$  et  $U \in \mathbb{R}$

Afin d'illustrer la procédure récursive de la méthode Backstepping, on considère que la sortie du système  $y = x_1$  désire suivre le signal de référence  $y_{ref}$ . Le système étant d'ordre  $n$ , la mise en œuvre s'effectue en  $n$  étapes.

➤ **Étape 1**

On commence par la première équation du système (III.1), où  $x$  sera considérée comme une commande virtuelle intermédiaire. La première référence désirée est notée :

$$(x_1)_d = \alpha_0 = y_{ref} \tag{IV-2}$$

Ce qui conduit à l'erreur de régulation suivante :

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_0(X_1)} [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \tag{IV-3}$$

Ainsi sa dérivée est :

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 - \dot{\alpha}_0 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 \tag{IV-4}$$

Pour un tel système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov  $v_1$  sous une forme quadratique

$$v_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad IV-5$$

Sa dérivée temporelle est :

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] \quad IV-6$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système d'après Lyapunov, il faut que  $\dot{v}_1$  soit négative.

Pour cela, prenons :  $x_2 = \alpha_1$  telle que :

$$f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0 = -K_1 e_1^2 \quad IV-7$$

Où  $k_1 > 0$  est une constante de conception. En substituant (IV-7) dans (IV-6) on trouve :

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2 - \dot{\alpha}_0] = -K_1 e_1^2 \quad IV-8$$

Ainsi, la loi de commande pour le système (IV-4) sera donnée par :

$$\alpha_1 = \frac{1}{g_0(x_1)} [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \quad IV-9$$

Ce qui implique

$$\dot{v}_1 = -K_1 e_1^2 \leq 0 \quad IV-10$$

➤ **Étape 2**

On considère les deux premières équations du système définie en (IV-1) :

$$\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_0(x_1)x_2$$

$$\dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3$$

Maintenant, la nouvelle référence désirée sera la variable de commande pour le sous système précédent (IV- 4) :

$$(x_2)_d = \alpha_1 \quad IV-11$$

D'où l'erreur de régulation :

$$e_2 = x_2 - \alpha_1 \quad IV-12$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 \quad IV-13$$

Pour le système (IV-12), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$v_2 = v_1 + \frac{1}{2}e_2^2 \quad IV-14$$

$$v_2 = \frac{1}{2}[e_1^2 + e_2^2] \quad IV-15$$

Dont la dérivée est :

$$\dot{v}_2 = \dot{v}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad IV-16$$

$$\dot{v}_2 = -K_1 e_1^2 + e_2 [f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1] \quad IV-17$$

Le choix de  $x_3$  qui stabilisera la dynamique du système (IV.12), et rendra  $\dot{v}_2$  négative est :

$x_3 = \alpha_2$  telle que :

$$f_2(x_1, x_2) + g_1(x_1, x_2)x_3 - \dot{\alpha}_1 = -K_2 e_2^2 \quad IV-18$$

Où  $k_2 > 0$  est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système (IV-12) sera donnée par

$$\alpha_2 = \frac{1}{g_1(x_1, x_1)} [-K_2 e_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(x_1, x_2)] \quad IV-19$$

Avec

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{g_0(X_1) [-k_1 \dot{e}_1 + \ddot{\alpha}_0 - \dot{f}_1(x_1)] - [-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1) \dot{g}_0(x_1)]}{g_0^2(x_1)} \quad IV-20$$

Un tel choix implique que :

$$\dot{v}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \leq 0 \quad IV-21$$

➤ **Étape n**

De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera :

$$(x_n)_d = \alpha_n \quad IV-22$$

La variable d'erreur de régulation :

$$e_n = x_n - \alpha_{n-1} \quad IV-23$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_n = \dot{x}_n - \dot{\alpha}_{n-1} \quad IV-24$$

$$\dot{e}_n = f_n(x_1, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, \dots, x_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} \quad IV-25$$

Pour le système (IV.24), la fonction de Lyapunov étendue est :

$$\dot{v}_n = \dot{v}_1 + \dot{v}_2 + \dots + \frac{1}{2} e_n^2 \tag{IV-26}$$

$$\dot{v}_n = \frac{1}{2} [e_1^2 + \dots + e_n^2] \tag{IV-27}$$

Sa dérivée est :

$$\dot{v}_n = \dot{v}_1 + \dots + e_n \dot{e}_n \tag{IV-28}$$

$$\dot{v}_n = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 + e_n [f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n)U - \dot{\alpha}_{n-1}] \tag{IV-29}$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la loi de commande pour le système entier. Un bon choix doit satisfaire :

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) + g_{n-1}(x_1, x_2, \dots, x_n)x_3 - \dot{\alpha}_{n-1} = -K_n e_n^2 \tag{IV-30}$$

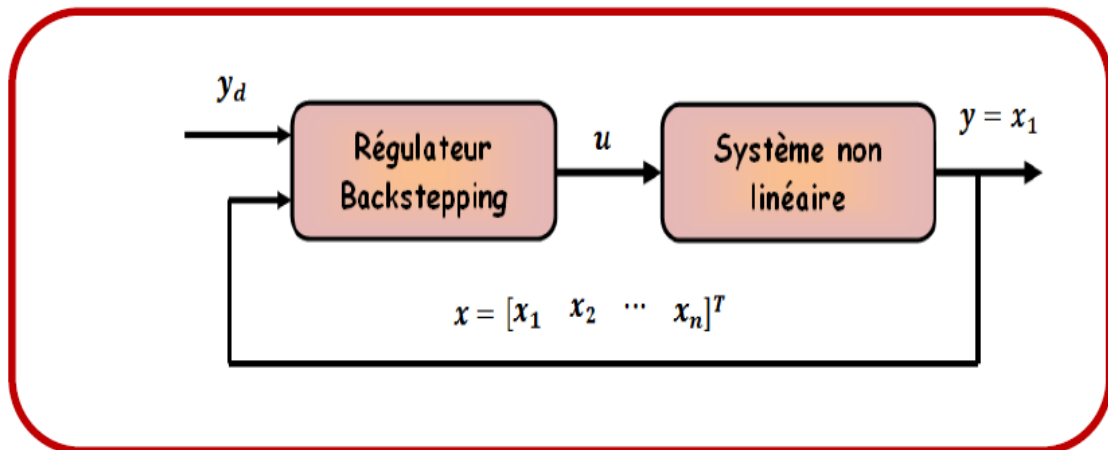
Où  $k_n > 0$  est une constante de conception.

Ainsi, la loi de commande pour le système entier sera donnée par :

$$U = \frac{1}{g_1(x_1, x_1)} [-K_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1} - f_2(x_1, x_2, \dots, x_n)] \tag{IV-31}$$

Ce qui garanti la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{v}_n = -K_1 e_1^2 - \dots - K_n e_n^2 \leq 0 \tag{IV-32}$$



**Figure IV-1** Schéma de principe du contrôle par Backstepping [6]

Nous avons ainsi défini la méthodologie de la commande Backstepping que nous allons Mettre en application sur le GSAP

### IV.5 Application du Backstepping à la commande du GSAP

Selon le modèle de Park, le modèle de la machine synchrone à aimants permanents intérieur peut être décrit en utilisant les courants statoriques et la vitesse mécanique comme variables d'état, et les tensions statoriques comme commandes : [6] [25] [28] [38] [37] [39]

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \omega i_q \\ v_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad IV-33$$

L'objectif dans ce cas est d'obtenir les tensions de commande dans le but d'avoir une très grande performance de la vitesse de rotation. En se référant aux équations (IV-33); il est facile de voir que la commande en vitesse peut être réalisée en commandant la composante  $V_q$  liée à l'axe  $q$  de la tension d'alimentation avec le maintien du courant  $i_d$  à zéro. Si on prend cette hypothèse en considération, on aboutit au système réduit suivant :

$$\begin{cases} v_d = -R_s i_d - L_d \frac{di_d}{dt} + L_q \omega i_q \\ v_q = -R_s i_q - L_q \frac{di_q}{dt} - L_d \omega i_d + \omega \psi_f \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - f \cdot \Omega \end{cases} \quad IV-34$$

Avec :  $w = P \cdot \Omega$  ( $w$  : vitesse électrique)

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \left[ (L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q \right] \quad IV-35$$

Le modèle donné en (IV-34) peut être réécrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P \Omega i_q - \frac{1}{L_d} v_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} P \Omega i_d + \frac{P \Omega}{L_q} \psi_f - \frac{1}{L_q} v_q \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} C_m - \frac{3}{2J} P \left[ (L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q \right] - \frac{f}{J} \Omega \end{cases} \quad IV-36$$

Les erreurs définies par les expressions :

$$\begin{cases} e_1 = i_{dref} - i_d \\ e_2 = \Omega_{ref} - \Omega \\ e_3 = i_{qref} - i_q \end{cases} \quad IV-37$$

Tel que (ref) représentent les valeurs de référence. Les dynamiques des erreurs est donnée par:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{i}_{dref} - \dot{i}_d \\ \dot{e}_2 = \dot{\Omega}_{ref} - \dot{\Omega} \\ \dot{e}_3 = \dot{i}_{qref} - \dot{i}_q \end{cases} \quad IV-38$$

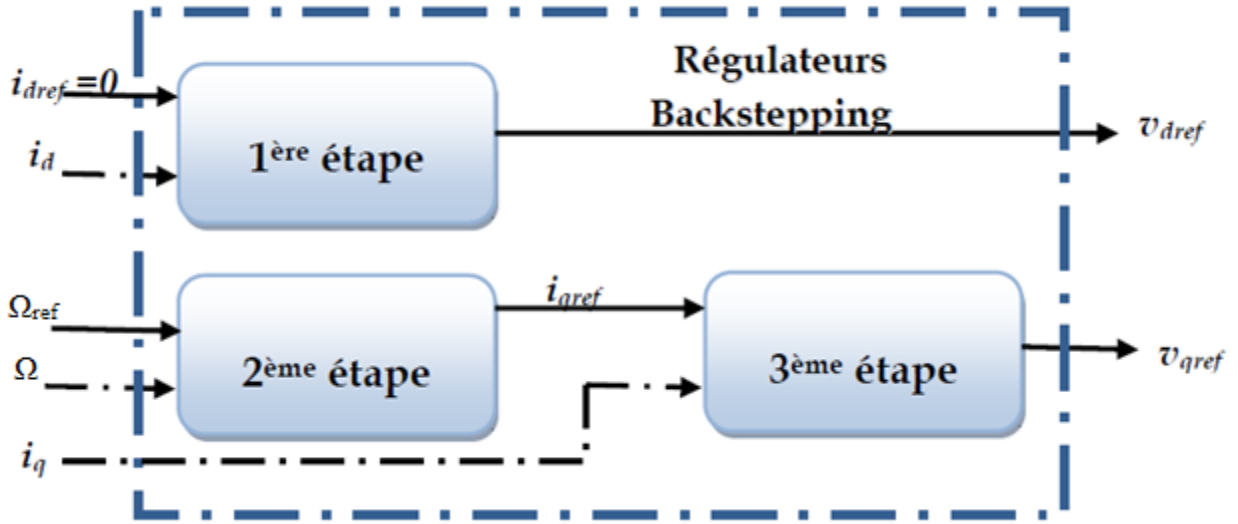


Figure IV-2 Structure interne du bloc régulateur Backstepping [25]

#### IV.5.1 Etape 01 Calcul de la loi de commande $v_{ref}$

Etant donné le courant direct est une grandeur de régulation, on définit sa valeur désirée et son erreur de régulation par :  $\Omega_{ref}$  [6] [37] [39]

$$\begin{cases} i_{dref} = 0 \\ e_1 = i_{dref} - i_d \end{cases} \quad IV-39$$

A partir des équations (IV.36) et (IV.38), les équations dynamiques de l'erreur sont :

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{i}_{dref} - \dot{i}_d \\ \dot{e}_1 = \dot{i}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} i_d - \frac{L_q}{L_d} P\Omega i_q + \frac{1}{L_d} v_d \end{cases} \quad IV-40$$

Du fait que l'objectif exige que l'erreur  $e_1$  converge vers zéro, et exige aussi que le courant doit être régulé et limité, on utilise la fonction de Lyapunov  $v_1$  :

$$v_1 = \frac{1}{2} e_1^2 \quad IV-41$$

En faisant la dérivée de cette fonction, on aura :

$$\dot{v}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 \left[ \dot{i}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} .i_d - \frac{L_q}{L_d} P\Omega .i_q + \frac{1}{L_d} v_d \right] \quad IV-42$$

Afin que la dérivée du critère soit toujours négative, il faut que la dérivée de  $v_1$  prenne la forme  $\dot{v}_1 = -K_1 e_1^2$  introduit par la méthode du Backstepping, d'où :

$$-K_1 e_1^2 = e_1 \left[ \dot{i}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} .i_d - \frac{L_q}{L_d} P\Omega .i_q + \frac{1}{L_d} v_d \right] \quad IV-43$$

$$-K_1 e_1 = \left[ \dot{i}_{dref} + \frac{R_s}{L_d} .i_d - \frac{L_q}{L_d} P\Omega .i_q + \frac{1}{L_d} v_d \right] \quad IV-44$$

Cette équation nous permet de définir la commande en tension  $v_1$  du sous système afin d'assurer la stabilité de Lyapunov et de forcer le courant  $i_d$  de suivre sa référence  $i_{dref} = 0$

On obtient la tension de référence  $v_{dref}$  :

$$v_{dref} = L_d \left[ -k .e_1 - \frac{R_s}{L_d} .i_d + \frac{L_q}{L_d} P\Omega .i_q \right] \quad IV-45$$

#### **IV.5.2 Etape 02 Calcul de la loi de commande virtuelle $i_{qref}$**

La vitesse rotorique étant la principale grandeur de régulation, on définit sa trajectoire désignée par la valeur de référence et l'erreur de régulation par :

$$e_2 = \Omega_{ref} - \Omega \quad IV-46$$

$$\dot{e}_2 = \dot{\Omega}_{ref} - \dot{\Omega} \quad IV-47$$

$$\dot{e}_2 = \dot{\Omega}_{ref} - \left[ \frac{1}{J} C_m - \frac{3}{2.J} P \left[ (L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q \right] - \frac{f}{J} \Omega \right] \quad IV-48$$

Pour ce qui suit, l'assurance de stabilité et convergences de la composante  $i_q$  à la Référence  $i_{qref}$ , nous conduit à choisir la fonction de Lyapunov suivante :

$$\begin{cases} v_2 = v_1 + \frac{1}{2} e_2^2 \\ v_2 = \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2] \end{cases} \quad IV-49$$

Ce qui permet de déduire la fonction dérivée de Lyapunov suivante :

$$\dot{v}_2 = \dot{v}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad IV-50$$

En choisissant  $\dot{v}_2$  Semi défini négative tel que :

$$\dot{v}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 \leq 0 \quad IV-51$$

$$\dot{v}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 = \dot{e}_1 \cdot \dot{e}_1 + \dot{e}_2 \cdot \dot{e}_2 \quad IV-52$$

Après l'équation IV-52 on obtient

$$\dot{v}_2 = -k_1 e_1 - k_2 e_2 = \dot{e}_1 + \dot{e}_2 \quad IV-53$$

Donc

$$-k_2 e_2 = \dot{e}_2 \quad IV-54$$

Après On obtient

$$k_2 e_2 + \dot{\Omega}_{ref} - \frac{1}{J} C_m + \frac{3}{2J} P \left[ (L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q \right] + \frac{f}{J} \Omega \quad IV-55$$

En considérant que  $i_{dref} = 0$  ce qui amène à définir la commande  $i_{qref}$  nécessaire pour déterminer la tension  $i_{dref} = 0$  comme le montre la figure (IV.2) :

$$i_{qref} = \left( -k_2 e_2 - \dot{\Omega}_{ref} + \frac{1}{J} C_m - \frac{f}{J} \Omega \right) \left( \frac{2J}{3\psi_f P} \right) \quad IV-56$$

### IV.5.3 Etape 03 Calcul de la loi de commande finale $v_{qref}$

Cette étape permet de déterminer la tension de référence du système globale (IV.36), le nouvel objectif de régulation est le courant considéré comme commande virtuelle de cette étape. On définit une nouvelle erreur de régulation soit :

$$e_3 = i_{qref} - i_q \quad IV-57$$

Ainsi, les équations dynamiques de l'erreur d'après le système (IV.36) sont:

$$\begin{cases} \dot{e}_3 = \dot{i}_{qref} - \dot{i}_q \\ \dot{e}_3 = \dot{i}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P \Omega i_d - \frac{P \Omega}{L_q} \psi_f + \frac{1}{L_q} v_q \end{cases} \quad IV-58$$

Du fait que l'objectif exige que cet erreur converge aussi vers zéro, et exige aussi que le courant doit être régulé et limité, on utilise l'extension de la fonction de Lyapunov suivante:

$$\begin{cases} v_3 = v_1 + v_2 + \frac{1}{2} e_3^2 \\ v_3 = \frac{1}{2} [e_1^2 + e_2^2 + e_3^2] \end{cases} \quad IV-59$$

La dérivée de la fonction s'écrit comme suit :

$$\begin{cases} \dot{v}_3 = \dot{v}_1 + \dot{v}_2 + e_3 \dot{e}_3 \\ \dot{v}_3 = \dot{v}_1 + \dot{v}_2 + e_3 \left[ \dot{i}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d - \frac{P\Omega}{L_q} \psi_f + \frac{1}{L_q} v_q \right] \end{cases} \quad IV-60$$

En choisissant  $\dot{v}_3$  Semi défini négative tel que :

$$\dot{v}_3 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 \leq 0 \quad IV-61$$

On obtient

$$-k_3 e_3 = \left[ \dot{i}_{qref} + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d - \frac{P\Omega}{L_q} \psi_f + \frac{1}{L_q} v_q \right] \quad IV-62$$

$$k_3 e_3 + \left[ \left( -k_2 \dot{e}_2 - \ddot{\Omega}_{ref} + \frac{1}{J} C_m - \frac{f}{J} \Omega \right) \left( \frac{2J}{3\psi_f P} \right) + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d - \frac{P\Omega}{L_q} \psi_f + \frac{1}{L_q} v_q \right] = 0 \quad IV-63$$

$$\dot{e}_2 = \dot{\Omega}_{ref} - \left[ \frac{1}{J} C_m - \frac{3}{2J} P [\psi_f i_q] - \frac{f}{J} \Omega \right] \quad IV-64$$

On à

$$i_{dref} = 0 \quad IV-65$$

$$k_3 e_3 + \left[ \left( -k_2 \dot{\Omega}_{ref} - K_2 \left[ \frac{1}{J} C_m - \frac{3}{2J} P [\psi_f i_q] - \frac{f}{J} \Omega \right] - \ddot{\Omega}_{ref} + \frac{1}{J} C_m - \frac{f}{J} \Omega \right) \left( \frac{2J}{3\psi_f P} \right) + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d - \frac{P\Omega}{L_q} \psi_f + \frac{1}{L_q} v_q \right] = 0$$

IV-66

$$k_3 e_3 + \left[ \left( \left( \frac{k_2}{J} + \frac{1}{J} \right) (C_m - f\Omega) - \ddot{\Omega}_{ref} - k_2 \left( \dot{\Omega}_{ref} + \frac{3}{2J} P (\psi_f i_q) \right) \right) \left( \frac{2J}{3\psi_f P} \right) + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d - \frac{P\Omega}{L_q} \psi_f + \frac{1}{L_q} v_q \right] = 0$$

IV-67

On en déduit la loi de commande finale  $v_{qref}$  :

$$v_{qref} = -L_q (k_3 e_3) - L_q \left[ \left( \left( \frac{k_2}{J} + \frac{1}{J} \right) (C_m - f\Omega) - \ddot{\Omega}_{ref} - k_2 \left( \dot{\Omega}_{ref} + \frac{3}{2J} P (\psi_f i_q) \right) \right) \left( \frac{2J}{3\psi_f P} \right) + \frac{R_s}{L_q} i_q + \frac{L_d}{L_q} P\Omega i_d - \frac{P\Omega}{L_q} \psi_f \right]$$

IV-68

Dans cette partie, nous avons définie à partir de la commande par Backstepping, les variables de références  $v_{qref}$  et  $v_{dref}$  nécessaires à la commande de la vitesse du GSAP, tout en exigeant une stabilité des sous systèmes en cascade afin d'assurer une stabilité asymptotique du système globale.

### IV.6 Résultats de simulation de la commande par Backstepping

Les figures suivantes illustrent les résultats de simulation de la commande par Backstepping appliqué à une GSAP, dont le modèle non linéaire est testé pour deux cas suivants:

- Vitesse du vent constante
- Vitesse du vent variable

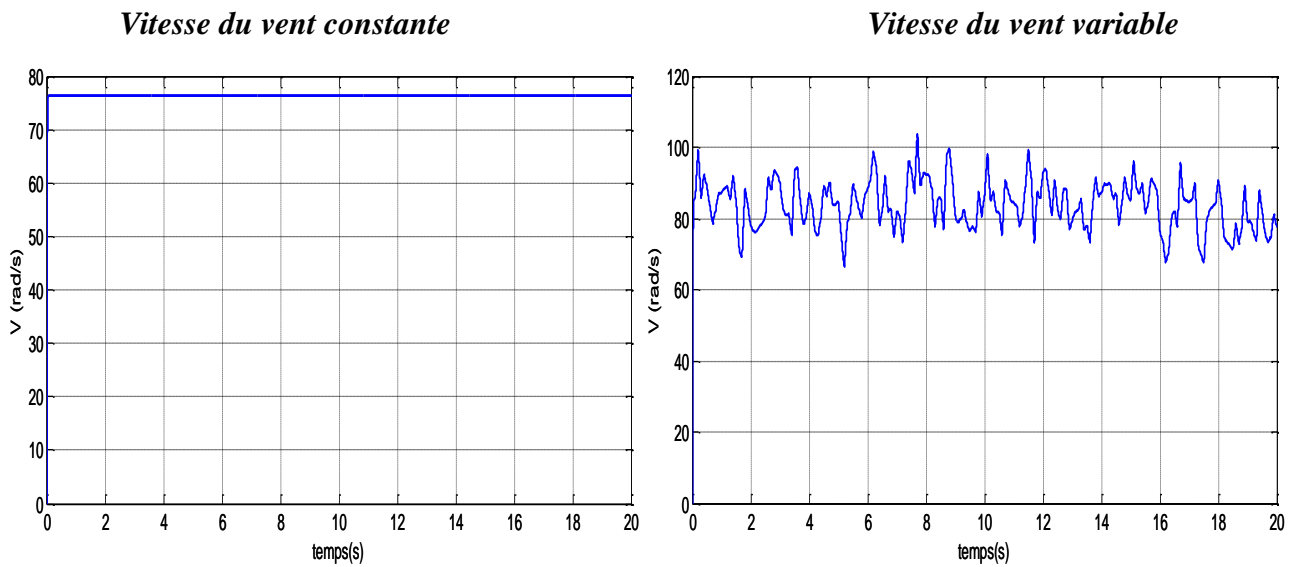


Figure IV-3 La vitesse de rotation (rad/s).

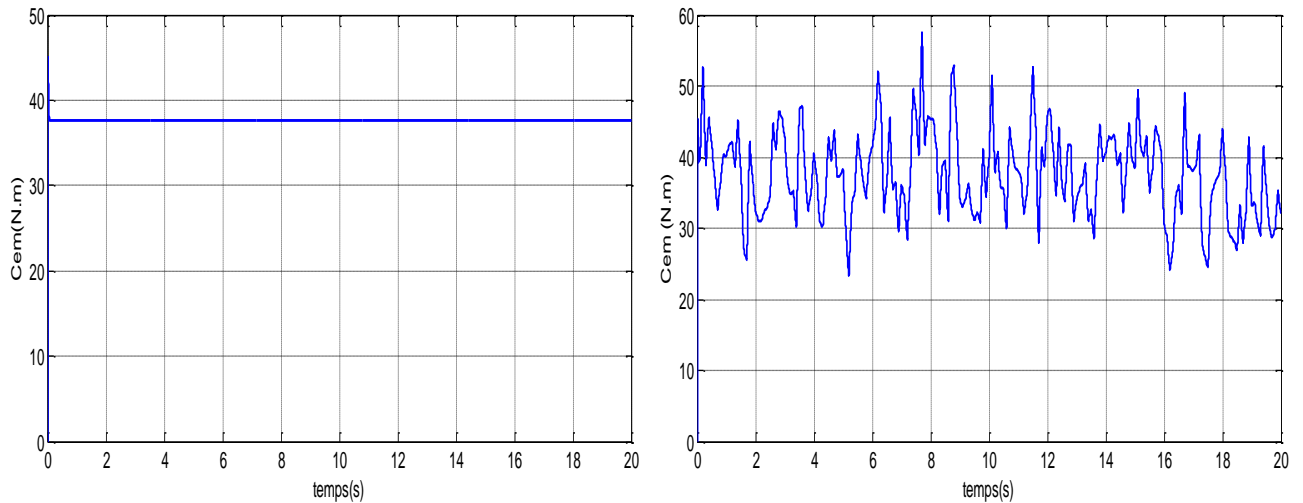
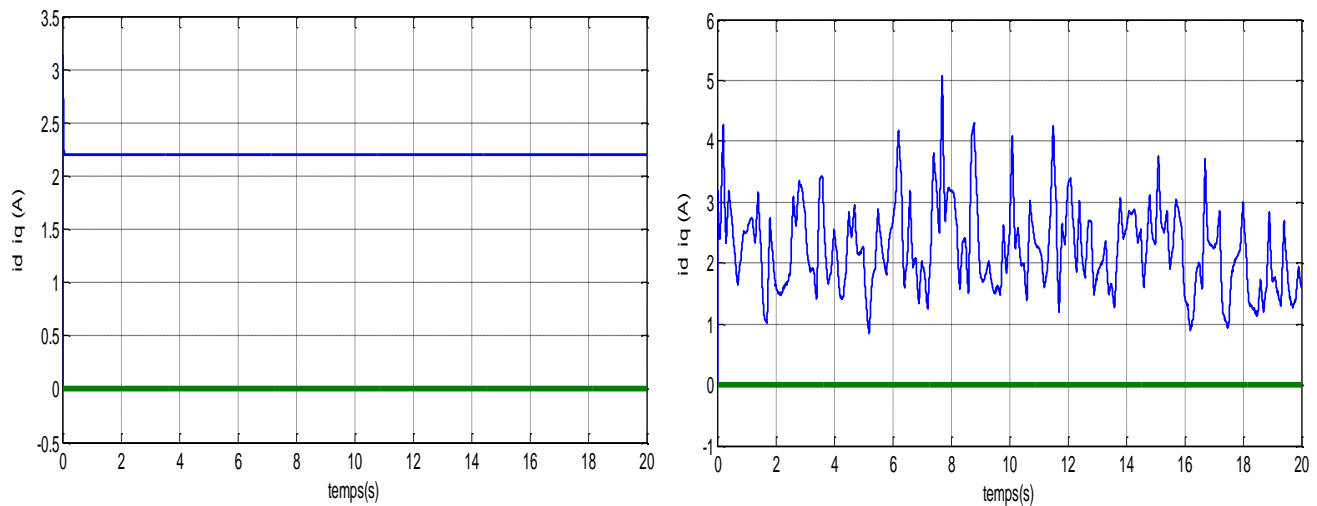
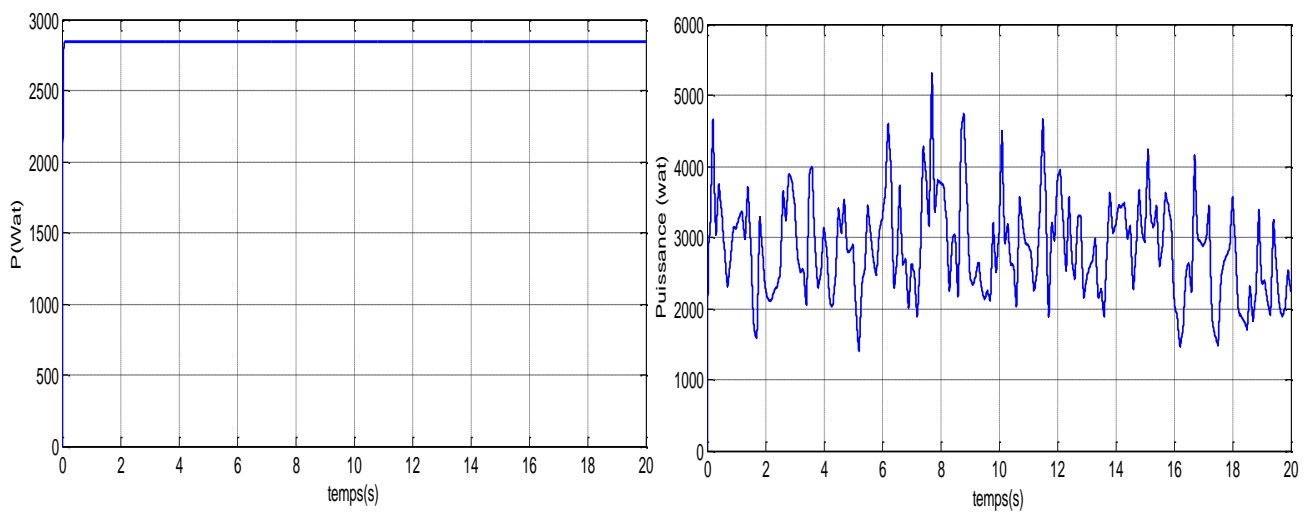


Figure IV-4 Le couple mécanique  $Cem$  (N.m).



**Figure IV-5** Les courants  $i_d$  et  $i_q$  de la machine en (A).



**Figure IV-6** La Puissance générée en (wat)

Les résultats de simulation montrent l'évolution des grandeurs mécaniques et électriques (vitesse, couple, courants et puissance) de la GSAP en fonction de temps pour les deux cas. Pour la vitesse et le couple, nous remarquons que la poursuite se fait avec un bon temps de réponse. Le courant  $i_q$  suit bien le couple électromagnétique  $C_{em}$  et le courant  $i_d$  est nul comme celle de référence. La puissance présente un pic au démarrage à cause des transformations électromagnétique au niveau de l'entrefer qui provoque une puissance électromécanique élevé, après un temps très court la puissance de la GSAP atteindre son référence en régime permanent, on constate que la variation de différentes grandeurs de la turbine par l'effet de vent, n'influent pas sur la dynamique de celles de la génératrice. Ces deux testes présentent la robustesse de cette commande.

### ***IV.7 Conclusion***

Dans notre chapitre, on a présenté la définition de la stabilité au sens de Lyapunov, ainsi que la commande par Backstepping, qui est une méthode basée sur la méthode directe de Lyapunov et on a constaté que la Conception des lois de commande par cette technique récursives est systématique, et simple, tous en stabilisant notre système.

On a appliqué cette dernière sur la génératrice synchrone à aimants permanents. Cette commande est établie étape par étape tout en assurant la stabilité du génératrice par un choix convenable de la fonction de Lyapunov.

D'après les résultats de simulation, on constate que la commande Backstepping du GSAP. Est donne des bons résultats au niveau des grandeurs mécaniques et électriques en fonction de temps.

## *Conclusion générale*

## ***Conclusion générale***

Le travail présenté dans ce mémoire à porter la commande d'une génératrice synchrone à aimant permanent dédié a une éolienne par la méthode de Backstepping, qui est une nouvelle technique qu'est rapidement rependue dans les applications industrielles pour se faire on a subdivisé ce travaille en quartes chapitre :

La première chapitre à traité des généralités de l'énergie renouvelables la première partie du premier chapitre sera consacrée au thème généralistes des énergies (géothermique, biomasse, hydraulique, solaire) leurs types, leur fonctionnement, et certaines de leurs caractéristiques. La deuxième partie sera consacrée une vue générale de l'énergie éolienne et Systèmes de conversion d'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre on va présenter des Généralités sur les générateurs synchrones à aimants permanents son fonctionnement et Constitution d'autre part on a présenté la modélisation différentes équations (électrique, magnétique, mécanique) régissant le fonctionnement de la GSAP dans le référentiel de Park.

Dans le troisième chapitre, d'abord élaboré un modèle mathématique pour les différents composants de notre chaine de conversion éolienne. Ensuite on a revue la modélisation des différents composants du système éolien.

A la fin de ce travail, on a présenté la commande Backstepping de la Génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP), puis on applique sur notre système éolien.

## ***Perspectives***

Comme perspective pour la continuation du présent travail dans le futur, nous préférons énumérer quelques perspectives que nous proposons comme suite de cette étude à savoir :

- L'étude de la commande adaptative floue/neuronale par backstepping.
- Faire une comparaison entre autres méthodes non linéaires pour la commande d'une GSAP.
- Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne raccordée au domaine d'application.
- L'association d'un système de stockage d'énergie.

## *Références*

***Références***

- [1] K. nada «renewable energy types», journal of clean energy technologies, vol. 2, no. 1, 2014.
- [2] R.namel « quelques solutions des ondes de rupture d'un barrage sur un fond sec et inclinée », thèse de magister, université hadj lakhdar -batna.
- [3] C.abdelkrim « contrôle d'un aérogénérateur », thèse de master université mohamed khider - biskra ,2019.
- [4] G.p.nyou « modèles d'identification et de commande d'un aérogénérateur à machine synchrone à aimants permanents », thèse maîtrise en ingénierie l'université du québec - abitibi-témiscaminque, 2018.
- [5] B.mohammed « étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents », thèse de master, université dr. tahar moulayde -saïda, 2015.
- [6] S.nawel « commande du moteur synchrone à aimants permanents par backstepping », thèse de master, université abou bekr belkaid- tlemcen, 2015.
- [7] S.hamza « énergies renouvelables », polycopié de cours, 2017.
- [8] A.lilia « contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliennes - évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement », thèse de master, université hadj lakhdar - batna, 2012.
- [9] H.hafidha et B.yamina « simulation et optimisation des performances d'un système hybride intégrant des énergies renouvelables pour la génération d'électricité », diplôme de master, université - bouira, 2016.
- [10] M. mounira « récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable » thèse de doctorat en universite badji mokhtar- annaba, 2014.
- [11] K.zakaria « étude d'une centrale solaire thermique », thèse de master, universite badji mokhtar- annaba, 2017.
- [12] C.hung tran « améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement », thèse de doctorat, université- reims champagne ardenne, 2019.
- [13] H.azeddine et B.hadjersi « etude et conception d'une centrale solaire photovoltaïque », thèse de master, universite mohamed boudiaf -m'sila, 2017.
- [14] N. laverdure « sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », thèse de doctorat, institut national polytechnique - grenoble, 2005.

- [15] N.aissa et A. bellal « commande d'une MSAP dédiée à une éolienne par la méthode de backstepping », thèse de master, université akli mohand oulhadj -bouira, 2018.
- [16] S.n datkhile «a comparative study of constant speed and variable speed wind energy conversion systems» ,journal, 2016
- [17] K.mehdi et B.imed « étude d'un système de conversion éolienne connecté au réseau », thèse de master, universite badji-mokhtar -annaba, 2019.
- [18] M. naïma « contribution à la modélisation et à la commande d'une mini-centrale éolienne à base de machines à induction simple et double alimentée », thèse de magister, université - batna, 2004.
- [19] M.lopez « contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », thèse de doctorat, université- paris sud II, 2008.
- [20] M .sonia « étude d'une machine synchrone à aimants permanents en présence de défauts de courts-circuits et de désaimantations par la méthode des éléments finis », thèse de master, université mouloud mammeri -tizi-ouzou, 2015.
- [21] M. theldja « commande d'une génératrice synchrone à aimant permanant (GSAP) », thèse de master, universite mohamed boudiaf -m'sila, 2019.
- [22] M.hamza « simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP », thèse de master, universite ahmed draia - adrar, 2017.
- [23] Z.boubaker « commande d'une machine synchrone à aimants permanents sans capteur de vitesse. utilisation d'un observateur non linéaire », thèse de magister université- batna, 2008.
- [24] A .loubna « commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents », thèse de magister universite larbi ben m'hidi -oum el bouaghi, 2017.
- [25] N.aissa « commande d'une MSAP dédiée à une éolienne par la méthode de backstepping », thèse de magister université akli mohand oulhadj- bouira ,2018 .
- [26] S. belakehal « modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée », thèse de magister université mentouri - constantine route ain-el-bey, 2010.
- [27] A.berhail « commande d'une éolienne à base de GSAP connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux », thèse de maîtrise en génie électrique, université du québec - trois-rivières, 2020.
- [28] M.mouna « commande backstepping appliquée à la machine synchrone a aimants permanents », thèse de magister, universite hadj lakhdar - batna, 2012.

- [29] M.messaoud « étude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone a aimants permanents », thèse de magister, universite hadj lakhdar – batna , 2014
- [30] A.lilia « contribution à l'amélioration des performances des génératrices éoliennes évaluations de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement », thèse de magister, université hadj lakhdar -batna, 2012.
- [31] B.bilel « étude et modélisation des différents composants d'une installation éolienne utilisant un générateur synchrone à aimants permanents », thèse de magister, universite ferhat abbas -setif ,2011.
- [32] A.ngon « étude comparative de la chaîne de puissance des véhicules électrique », thèse de maîtrise en génie électrique, université québec - trois-rivières, 2020.
- [33] Z.sidi mohammed « commande non linéaire d'une génératrice synchrone à aimant permanent pour un système éolien », thèse de master universite hadj lakhdar – batna ,2019.
- [34] H. sarra « étude et simulation d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents », thèse de master, universite badji mokhtar -annaba, 2018.
- [35] D. tarek « étude et commande d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone », thèse de magister en électrotechnique, universite - batna.
- [36] C. azeddine « commande backstepping d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse », thèse de master, université - batna, 2011
- [37] G. aïssa « commande d'une éolienne par backstepping avec action intégrale », thèse de master, universite larbi ben m'hidi -oum el bouaghi, 2012.
- [38] S. yassine « commande adaptative par backstepping d'une classe des systèmes non linéaires incertains », thèse de magister, université - Jijel, 2014.
- [39] C. sara et H. bakkar « commande backstepping d'un moteur asynchrone», thèse de master, université echahid hamma lakhrad - el-oued, 2019
- [40] B. moufid et B. rabia « commande par backstepping intégrale sans capteur de la machine asynchrone », thèse de master, université mohamed el bachir el ibrahimi, 2021.

# *Annexes*

## Annexes

### ➤ Paramètres de générateur éolien

#### ✓ Caractéristique du vent

Vitesse du vent moyenne:  $V_{moy} = 8 \text{ (m/s)}$

Masse volumique de l'air :  $\rho = 1.225 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$

#### ✓ Paramètres de la turbine

Rayon de la turbine  $R = 3(\Omega)$

Moment d'inertie  $J_T = 0.21(\text{kg.m}^2)$

Frottement  $f = 0.001$

Le gain de multiplicateur  $G = 6$

#### ✓ Caractéristique de la génératrice synchrone à aimant permanent

<i>Nome</i>	<i>symbole</i>	<i>Valeur</i>
Le flux d'excitation des aimants	$\psi_f$	0.9(wb)
Moment d'inertie total de la machine	$J$	0.00141(kg.m <sup>2</sup> )
Le couple moteur appliqué sur la génératrice	$c_m$	6(Nm)
Coefficient de frottement visqueux	$f$	0(Nm/rad/s)
Nombre de paire de pôles	$P$	4
Résistance statorique directe	$R_s$	2875(Ω)
La résistance de charge	$R_{ch}$	50(Ω)
Inductance statorique quadratique	$L_q$	0.0211(H)
Inductance statorique directe	$L_d$	0.012(H)
L'inductance de charge	$L_{ch}$	0.002(H)