



جامعة العربي التبسة - تبسة  
Université Larbi Tébessa - Tébessa

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche  
scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département : Génie Electrique



## MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master

Filière : Sciences et la Technologie

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Thème

# Commande adaptative d'une éolienne à base d'une GSAP

Présenté et soutenu par

Haouichi Atmane et Ali Oussama

Devant le jury :

Président : Metatla Samir

MAA Université Larbi Tébessi

Encadreur : Nahel Ouassila

MAA Université Larbi Tébessi

Examineurs : Djebbar Md Essalah

MCB Université Larbi Tébessi

Promotion 2020-2021

Année universitaire : 2020/2021 Tébessa le : 20/06/2021

## Lettre de soutenabilité

### Nom et prénom des étudiants :

1 : Haouichi Atmane

2 : Ali Oussama

**Niveau :** Master 2

**Spécialité :** Electrotechnique industrielle

**Thème :** Commande adaptative d'une éolienne à base d'une GSAP

**Nom et prénom de l'encadreur :** Nehal Ouassila

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Chapitre I : Généralités sur l'éolienne à MSAP	
Chapitre II : modélisations d'une éolienne à MSAP	
Chapitre III : Techniques de commande appliquées à la MSAP	
Chapitre IV : Simulations et résultats obtenus	

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# *Dédicace*

*À ma chère mère **mounira** , pour ses sacrifices depuis qu'elle m'a mis au monde,*

*À mon cher père **Abd Assalam**, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les difficultés,*

*À mes très chères frères, **yahya, boumediane, boudhiafe , naziha et elyamna** , pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,*

*Pour tous ce qui a fait pour que je puisse les honorer,*

*À toute ma famille.*

*À tous mes amis.*

*Je dédie ce modeste travail.*

*Atmane haouichi*



# Dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents : Que dieu les garde en bon santé...*

*A ma famille*

*A mes amis...*

*A tous les gens que j'aime...*

*Ali oussama*

# Remerciement

Avant tout nous remercions **Allah** qui nous a donné la patience et la force nécessaire pour terminer ce travail.

Le travail présenté dans cette mémoire a été effectué au département Génie Electrique de Faculté des Sciences et de la Technologie, Tébessa.

Ainsi, ontient également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur le docteur « **Nehal Ouassila** » pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout le long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Ontient tenons à remercier vivement toutes personnes qui m'aidé a élaboré et réalisé cette mémoire, ainsi à tous ceux qui nous a aider de près ou de loin accomplir ce travail.

Nous remercions tous les enseignants de Faculté des Sciences et de la Technologie et de département Génie Electrique spécialement les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Les meilleurs sentiments sont destinés pour la famille « **Haouichi** », et la famille « **Ali** ». On remercie également tous les amis et tous les potes.

On remercie également tous les amis et tous les potes.

Si on a oublié quelqu'un, on le prié de me pardonner.

## **RESUME**

Dans notre travail, nous avons commandé une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP). Dans un premier temps, un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrices utilisées. Les modélisations de la GSAP ont été présentées. Ensuite, afin d'assurer la poursuite en temps réel du point de fonctionnement optimal et d'avoir une production maximale de la puissance électrique pour différentes vitesses du vent, nous utilisons la commande par mode glissant du générateur synchrone à aimants permanents (GSAP).

**Mots clés :** Eolienne, GSAP, Turbine, mode glissant.

## **ملخص**

في الهدف من هذا العمل هو التحكم في نظام توليد طاقة الرياح باستخدام مولدة تزامنية ذات مغناطيس دائم (GSAP). أولاً، تقديم مختلف حالة العنفات الهوائية ومختلف بنيات التغذية والمولدات المستعملة. كما تم تقديم نماذج للمولدة ذات المغناطيس الدائم بالإضافة إلى ذلك ومن أجل تأمين التتبع الحي لنقطة الاشتغال المثلى لغرض الحصول على الإنتاج الاعظمي للاستطاعة الكهربائية لمختلف سرعات الرياح، استخدمنا التحكم بواسطة الوضع المنزلق.

**الكلمات المفتاحية:** نظام هوائي، المولدة ذات المغناطيس الدائم، GSAP، الوضع المنزلق.

## NOTATIONS

<i>Grandeurs électriques et mécaniques</i>		
<i>Symbole</i>	<b>Nom</b>	<i>Unité</i>
<b>Cr</b>	Couple résistant	<b>Nm</b>
<b>t</b>	Temps	<b>S</b>
<b>U</b>	Tension	<b>V</b>
<b>I</b>	Courant	<b>A</b>
<b>P</b>	Puissance	<b>W</b>
<b><math>\psi</math></b>	Flux magnétique	<b>Wb</b>
<b><math>\omega</math></b>	Pulsation électrique	<b>rad/s</b>
<b><math>\Omega</math></b>	Pulsation mécanique de rotation	<b>rad/s</b>
<b><math>\theta</math></b>	Angle (position)	
<i>Grandeurs électrique de la GSAP</i>		
<b>f</b>	Coefficient de frottement visqueux	<b>N.s/rad</b>
<b>T<sub>S</sub></b>	Constant de temps statorique	<b>s</b>
<b>J</b>	Moment d'inertie	<b>kg:m<sup>2</sup></b>
<b>L<sub>S</sub></b>	Inductance propre d'une phase statorique	<b>H</b>
<b>P</b>	Nombre de paire de pôle	<b>-</b>
<b>R<sub>S</sub></b>	Resistance de l'enroulement statorique par phase	<b><math>\Omega</math></b>
<i>Grandeurs mécanique de la turbine</i>		
<b>V</b>	Vitesse de Vent	<b>m/s</b>
<b>C<sub>m</sub></b>	Couple mécanique de la turbine	<b>N.m</b>
<b>C<sub>em</sub></b>	Couple électromagnétique de la turbine	<b>N.m</b>
<b>C<sub>em-ref</sub></b>	Couple électromagnétique de référence	<b>N.m</b>
<b><math>\omega_{mec}</math></b>	Vitesse mécanique de la génératrice	<b>rad/s</b>
<b><math>\Omega_t</math></b>	Vitesse de la turbine	<b>rad/s</b>
<b><math>\Omega_{t-ref}</math></b>	Vitesse de la turbine de référence	<b>rad/s</b>
<b>C<sub>P</sub></b>	Coefficient de puissance	<b>-</b>

## NOTATIONS

---

$\rho$	Masse volumique de l'air	-
$R$	Rayon de pale	$m$
$p$	Nombre de pale	-
$\lambda$	Vitesse relative	-
$J_t$	Moment d'inertie de la turbine	$Kg/m^2$
$j$	Moment d'inertie de la génératrice	$Kg/m^2$
$J$	Moment d'inertie totale	$Kg/m^2$

## LISTE DES FIGURES

<i>N°Fig</i>	<i>Titre de figure</i>	<i>N°Page</i>
<b>CHAPITRE 1</b>		
<i>Figure 1.1</i>	Principe de conversion de l'énergie éolienne	<b>05</b>
<i>Figure 1.2</i>	Eoliennes à axe vertical	<b>06</b>
<i>Figure 1.3</i>	Eoliennes de type <i>Darrieus</i>	<b>07</b>
<i>Figure1.4</i>	Eoliennes de type Savonius	<b>08</b>
<i>Figure 1.5</i>	Eolienne horizontale tripale et multi-pale.	<b>09</b>
<i>Figure 1.6</i>	Principales composantes des éoliennes à axe horizontal	<b>11</b>
<i>Figure 1.7</i>	Principales composants de l'éolienne à axe horizontal	<b>11</b>
<i>Figure 1.8</i>	Tube de courant à travers une éolienne	<b>12</b>
<i>Figure 1.9</i>	Courbe caractéristique du coefficient de puissance	<b>13</b>
<i>Figure 1.10</i>	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	<b>14</b>
<i>Figure 1.11</i>	Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent	<b>15</b>
<i>Figure 1.12</i>	Orientation de la nacelle en vue de la limitation de la puissance	<b>16</b>
<i>Figure 1.13</i>	éolienne à vitesse fixe	<b>18</b>
<i>Figure 1.14</i>	Eoliennes fonctionnant à vitesse variable	<b>18</b>
<i>Figure 1.15</i>	Optimisation de l'énergie extraite grâce à la variation de la vitesse de l'éolienne	<b>19</b>
<b>CHAPITRE 2</b>		
<i>Figure 2.1</i>	Schéma de la MSAP dans le repère abc	<b>24</b>
<i>Figure2.2</i>	Différents couples qui agissent sur le rotor	<b>26</b>
<i>Figure 2.3</i>	Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q)	<b>27</b>
<i>Figure2.4</i>	Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne	<b>29</b>
<i>Figure2.5</i>	Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne.	<b>31</b>
<i>Figure2.6</i>	Schéma simplifié de la turbine éolienne	<b>31</b>
<i>Figure 2.7</i>	Représentation d'une MSAP dans le repère (d q)	<b>35</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>CHAPITRE 3</b>		
<b>Figure3.1</b>	Schéma de la commande scalaire à V/f	<b>41</b>
<b>Figure3.2</b>	<i>Schéma global de la commande vectorielle</i>	<b>42</b>
<b>Figure3.3</b>	Structure de la commande directe du couple	<b>43</b>
<b>Figure3.4</b>	Schéma de la commande DSC classique 2-niveaux	<b>45</b>
<b>Figure3.5</b>	<i>Convergence du système glissant.</i>	<b>47</b>
<b>Figure3.6</b>	<i>Trajectoires de <math>f^+</math> et <math>f^-</math> pour le mode de glissement</i>	<b>50</b>
<b>Figure3.7</b>	Différentes modes pour la trajectoire dans le plan de phase	<b>51</b>
<b>Figure3.8</b>	linéarisation exacte de l'écart	<b>53</b>
<b>Figure3.9</b>	<i>Commande équivalente</i>	<b>55</b>
<b>Figure3.10</b>	<i>La fonction signe</i>	<b>56</b>
<b>Figure3.11</b>	La fonction sat	<b>58</b>
<b>Figure3.12</b>	La fonction smooth	<b>58</b>
<b>CHAPITRE 4</b>		
<b>Figure4.1</b>	Bloc de simulation par mode glissant	<b>65</b>
<b>Figure4.2</b>	profil du vent	<b>66</b>
<b>Figure4.3</b>	Vitesse de la Génératrice	<b>66</b>
<b>Figure 4.4</b>	Couple electromagnétique	<b>67</b>
<b>Figure 4.5</b>	variation de la puissance produite par la turbine	<b>67</b>
<b>Figure4.6</b>	couple de la Génératrice	<b>68</b>
<b>Figure4.7</b>	Coefficient de puissance ( $c_p$ )	<b>68</b>
<b>Figure4.8</b>	Vitesse relative	<b>69</b>
<b>Figure4.9</b>	<i>Source de tensions <math>v_a</math>, <math>v_b</math> et <math>v_c</math></i>	<b>69</b>

## LISTE DES TABLEAUX

---

<i>N°Tab</i>	<i>Titre de tableau</i>	<i>N°Page</i>
<b>CHAPITRE 1</b>		
<i>Tableau 1.1</i>	Classification des turbines éoliennes	<b>09</b>

# SOMMAIRE

---

<b>Dédicaces</b>	
<b>Remerciements</b>	
<b>Notations</b>	
<b>Liste des figures</b>	
<b>Liste des tableaux</b>	
<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>Chapitre I : Généralités sur l'éolienne à MSAP</b>	
<b>I-1-Introduction</b> .....	04
<b>I-2-Définition de l'énergie éolienne</b> .....	04
<b>I-3-Différents types d'éoliennes et leurs utilisations</b> .....	05
I.3. 1.Eoliennes à axe vertical .....	05
I.3.1.1. L'éolienne de rotor darrieus.....	06
I.3.1.2. L'éolienne de rotor savonius.....	07
I.3.2.Eoliennes à axe horizontal.....	08
<b>I- 4-Principales composantes des éoliennes à axe horizontal</b> .....	09
I.4.1.Le mât.....	10
I.4.2.Une nacelle.....	10
I.4.3. Les pales.....	11
I.4.4.Le moyeu.....	11
<b>I.5. Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique</b> .....	12
I.5.1. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en Énergie mécanique.....	12
I.5.1.1. Loi de Betz.....	12
I.5.1.2. Production d'énergie mécanique.....	14
I.5.2. Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne.....	16
<b>I.6. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne</b> .....	17
I.6.1. Les systèmes à vitesse fixe.....	17
I.6.2. Les systèmes à vitesse variable.....	18
<b>I.7. Optimisation de l'énergie extraite</b> .....	18
<b>I.8. Application des éoliennes</b> .....	20
<b>I-9- Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</b> .....	20
I.9.1.Avantages.....	20

I.9.2. Inconvénients.....	20
<b>Conclusion.....</b>	<b>21</b>
<b>Chapitre II : modélisations d'une éolienne à MSAP</b>	
<b>II-1-Introduction .....</b>	<b>23</b>
<b>II-2- Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....</b>	<b>23</b>
II-2-1- Mise en équations de la machine dans le repère (abc).....	24
II-2-1- 1-Equations électriques.....	24
II-2-1- 2-Equations magnétiques.....	25
II-2-1- 3-Equation mécanique.....	26
II-2-2-Transformation de Park.....	26
<b>II-3- Modélisation de la turbine éolienne.....</b>	<b>28</b>
II-3-1-Modélisation du vent.....	28
II-3-2- Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....	29
II-3-3- Modélisation de la turbine à étudier.....	31
II-3-4- Equation dynamique de l'arbre.....	31
<b>II-4-Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....</b>	<b>33</b>
II-4-1- Hypothèses simplificatrices.....	33
II-4-2- Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a,b,c).....	33
II-4-3-Modèle de la MSAP dans le repère de Park.....	35
II-4-4-Expression du couple électromagnétique.....	36
<b>Conclusion.....</b>	<b>37</b>
<b>Chapitre III : TECHNIQUES DE COMMANDE APPLIQUEES A LA MSAP</b>	
<b>III-1- Introduction.....</b>	<b>39</b>
<b>III.2. Les techniques de commande de la machine.....</b>	<b>40</b>
<b>III.3. Commande scalaire ou controles du flux.....</b>	<b>40</b>
III.3.1. Loi tension- frequence.....	41
III.3.2. Loi courant – frequence.....	42
<b>III.4.Commande vectorielle.....</b>	<b>42</b>
<b>III.5.Commande directe de couple (dte).....</b>	<b>43</b>
<b>III.6.Contrôle vectoriel direct du flux statorique (dsc).....</b>	<b>44</b>
<b>III.7.Commande non linéaire.....</b>	<b>45</b>
<b>III.8.Théorie de la commande par mode de glissement.....</b>	<b>46</b>
III.8.1. Systèmes à structure variables.....	49

III.8.1.1. Théorie des modes glissants.....	49
III.8.1.2. Modes de la trajectoire dans le plan de phase.....	51
III.8.1.3. Conception de la commande par mode glissant.....	52
III.8.2. Phénomène de broutement (Chattering).....	57
III.8.3. Elimination du phénomène de Chattering.....	57
III.8.4. Application de la commande par mode de glissement à la GSAP.....	59
<b>Conclusion</b> .....	62
<b>Chapitre IV : Simulations et résultats obtenus</b>	
<b>IV -1- Introduction</b> .....	64
<b>IV-2-Résultats de simulation avec le mode glissant</b> .....	65
<b>Conclusion</b> .....	70
<b>Conclusion générale</b> .....	72
<b>Bibliographie</b>	

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'énergie sous toutes ses formes est très nécessaire dans nos différentes activités quotidiennes notamment l'énergie électrique. Ces dernières années nous assistons à une augmentation croissante sans cesse de demande de la puissance électrique afin de répondre aux exigences industrielles et quotidiennes. Depuis que l'industrialisation a commencé, la richesse économique a été immédiatement liée avec l'accès aux combustibles fossiles pour la production énergétique, en premier lieu le charbon, mais plus récemment le pétrole et le gaz. Le problème de la consommation d'énergie est devenu de plus en plus important, des inquiétudes concernant les effets de la croissance économique sur la consommation excessive des ressources naturelles et de l'impact sur l'environnement due à la pénurie énergétique au niveau mondial, en particulier l'atmosphère, ont été notées : augmentation de l'effet de serre, pollution atmosphérique et des sols due aux déchets radioactifs et les déchets des centrales nucléaires, pollution des eaux et pluies acides.

Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique), en particulier l'énergie éolienne qui représente une solution importante et pourrait mitiger ces problèmes grâce essentiellement à ses impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde. Ainsi, la production d'électricité par sources d'énergies renouvelables offre une grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement.

Cependant le caractère aléatoire de cette source (vent), nous impose d'établir des commandes et des règles de dimensionnement et d'utilisation, accompagnées par un bon choix de la structure et le type du générateur de ces systèmes pour les mieux exploiter. Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage,...etc) et d'augmenter les performances et l'efficacité énergétique, c'est à dire en jouant sur l'architecture (choix des convertisseurs, minimisation du nombre et le coût des dispositifs,...), le dimensionnement et la gestion de l'énergie (maximisation de puissance).

# INTRODUCTION GENERALE

---

L'objectif principal de ce travail est d'étudier les performances et la commande du générateur synchrone à aimants permanents et de la chaîne éolienne.

Ce choix est justifié par l'intérêt que la recherche consacre à ce type de structures vu qu'elles sont décrites comme étant les éoliennes de l'avenir. En effet le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques a fait que l'inconvénient majeur de ces structures à savoir le prix des aimants permanents ne soit plus un obstacle pour construire des éoliennes gigantesques à base de génératrice synchrone à aimants permanents(GSAP), un objectif qui, des années avant, était impossible vu l'énorme prix des aimants permanents.

Notre travail consiste quatre chapitres

Le premier chapitre :

Nous allons entamer avec des généralités sur l'énergie éolienne,. Puis nous allons parler des différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements, leurs qualités et éventuellement leurs défauts. Ensuite, nous allons donner quelques notions théoriques sur les calculs de base qui permettent de contrôler le fonctionnement de notre système par la suite. Nous allons également citer quelques structures composant la turbine éolienne associée à sa génératrice et ces annexes. En fin, nous allons particulièrement nous intéresser à l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents qui est l'objet de notre étude, et à toute la structure associée.

Le deuxième chapitre :

comporte la modélisation de la turbine et modélisation de la génératrice

Le troisième chapitre :

C'est consacré au contrôle global de la chaîne de conversion éolienne. Une commande par mode glissant du générateur synchrone à aimants permanents(GSAP).

Le quatrième chapitre :

La Simulations et résultats obtenus

Ce travail s'achève par une conclusion générale qui résume tout le travail.

# **CHAPITRE I**

*Généralités sur l'éolienne à MSAP*

## I-1-Introduction :

L'utilisation de la force du vent pour suppléer l'énergie humaine ou animale n'est pas nouvelle. On peut ainsi trouver la trace d'ancêtres des éoliennes modernes jusque dans la Perse ancienne. Plus près de nous, certains pays ont, depuis le Moyen Âge, largement fait usage de ce type d'énergie par le biais des moulins à vent (moulins hollandais) ou des éoliennes dites américaines. Au cours des siècles, la technologie des moulins a évolué grâce à l'apparition de toits orientables permettant une utilisation plus intensive, puis de moulins complets montés sur pivot. Enfin, la dernière évolution marquante a été l'adoption de profils semblables à des ailes d'avion, en lieu et place de la toile tendue sur une structure en bois, du fait de la compréhension des phénomènes aérodynamiques, acoustiques et aéroélastiques impliqués. Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines de l'électrotechnique, de l'électronique que dans celui des matériaux, font que l'on peut désormais disposer de machines aux performances étonnantes en terme de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement.

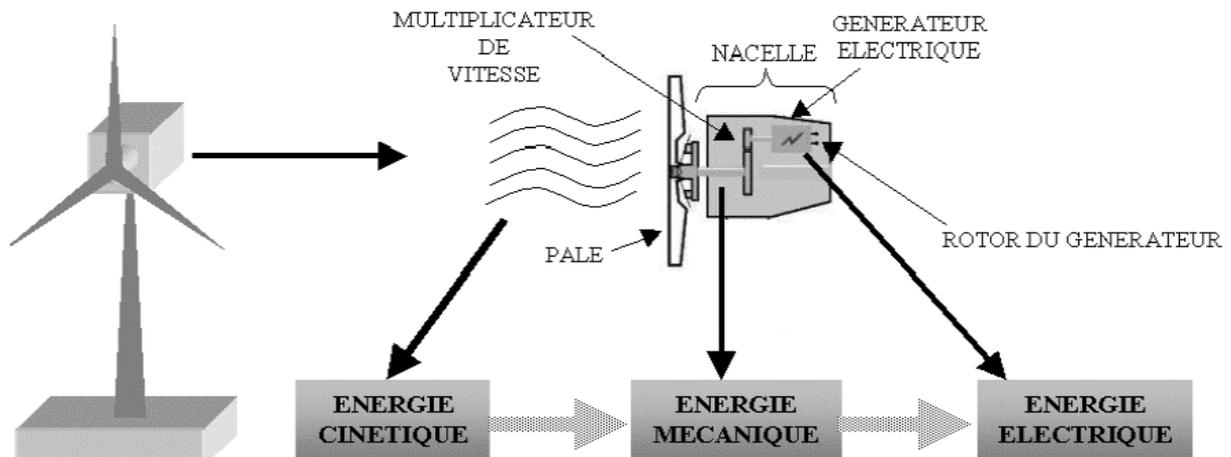
Mais la motivation principale derrière l'intérêt croissant envers cette source d'énergie renouvelable est son caractère écologique, surtout dans le contexte actuel où la terre entière subit les conséquences du réchauffement climatique qui épuise les réserves mondiales en eau, principale source de l'énergie électrique. S'ajoute à cela l'impacte de la crise économique mondiale actuelle sur la capacité des pays industrialisés à faire face à la demande croissante en énergie électrique, vu le coût de sa production pour les pays producteurs, et le prix de l'importation pour les pays non producteurs.

Dans ce chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens à travers les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par une définition de l'énergie éolienne de manière générale,

## I-2-Définition de l'énergie éolienne: [01]

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure « I.1 »).

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" (non dégradée), est géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).



**Fig. I.1:** Principe de conversion de l'énergie éolienne .[2]

Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyenne fréquemment rencontrés. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes.

Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre être renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin! En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année. Il convient alors de diviser par 5 la puissance installée pour obtenir la puissance réelle moyenne.

### **I-3- Différents types d'éoliennes et leurs utilisations:[3]**

#### **I.3. 1.Eoliennes à axe vertical**

Ce sont les premières éoliennes développées pour produire de l'électricité. Contrairement à l'éolienne horizontale, l'éolienne verticale tourne autour d'une tige positionnée de manière verticale. L'un des principaux atouts de ce type d'éolienne est de réussir à capter des vents faibles et de produire de l'énergie même avec une vitesse de vent plus léger.



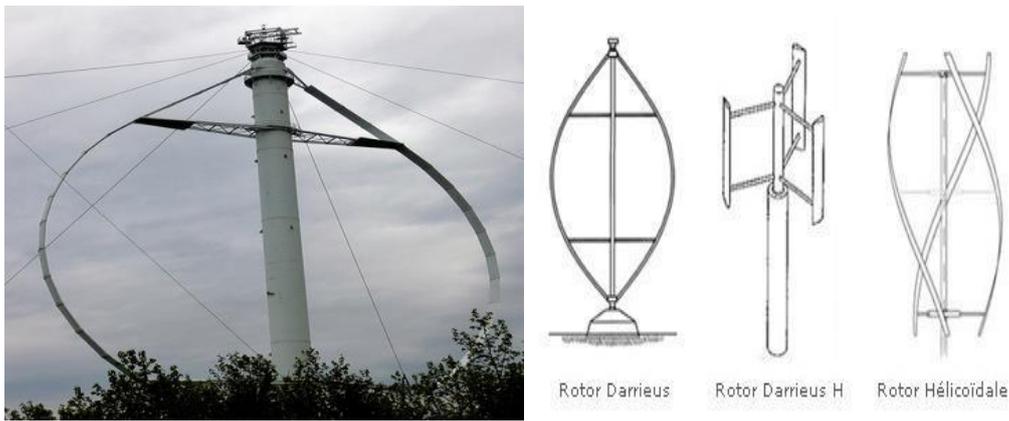
**Figure. I.2** : Eoliennes à axe vertical

Parmi les éoliennes verticales, deux types se démarquent aujourd'hui sur le marché :

#### **I.3.1.1. L'ÉOLIENNE DE ROTOR DARRIEUS**

Généralement, l'éolienne *Darrieus* est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdale, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie.

L'éolienne de type Darrieus repose sur l'effet de portance subi par un profil soumis à l'action d'un vent relatif, tel l'effet qui s'exerce sur l'aile d'un avion. On distingue plusieurs déclinaisons autour de ce principe, depuis le simple rotor cylindrique – deux profils disposés de part et d'autre de l'axe – jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical.



**Figure .I.3** : Eoliennes de type *Darrieus*

### **I.3.1.2. L'ÉOLIENNE DE ROTOR SAVONIUS**

Le type Savonius, constitué schématiquement de deux ou plusieurs godets demi-cylindriques légèrement désaxés présente un grand nombre d'avantages. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer l'éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique, il est peu bruyant. Il démarre à de faibles vitesses de vent et présente un couple élevé quoique variant de façon sinusoïdale au cours de la rotation. Il existe une variante, appelée Savonius hélicoïdal (ou *twisted Savonius* en anglais), qui permet d'augmenter le rendement en proposant de façon continue une surface d'accroche au vent. Au lieu d'avoir des demi-cylindres verticaux, ceux-ci sont tordus de façon hélicoïdale autour de l'axe de rotation. Du fait de leur faible encombrement au sol, de leur bon rendement et du besoin d'un très faible vent, ils sont utilisés en ville sur les toits des maisons, sur des bateaux, comme le Hornblower Hybrid, ou encore dans la Tour de la Rivière des Perles, une tour à énergie positive. Elles sont également adaptées à une position horizontale, l'axe de rotation restant perpendiculaire au vent et non dans le profil du vent, comme les éoliennes classiques à axe horizontal.

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante.



Figure .I.4 : Eoliennes de type *Savonius*

### I.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde. Ce système se base sur le principe de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine.

Les éoliennes généralement utilisées pour la production d'électricité sont des éoliennes rapides à 2 ou à 3 pales, ceci pour plusieurs raisons :

- Elles sont légères et donc moins chères.
- Elles tournent plus vite car le multiplicateur utilisé présente un rapport de multiplication moins important d'où sa légèreté et des pertes réduites.
- Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ces raisons expliquent notre restriction à ce type d'aérogénérateur dans la suite de nos travaux.



**Figure .I.5:** Eolienne horizontale tripale et multi-pale.

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I.1 présente une classification des turbines éoliennes.

<b>ECHELLE</b>	<b>DIMÈTRE DE L'HÉLICE</b>	<b>PUISSANCE DELIVRÉE</b>
<b>Petite</b>	<b>Moins de 12 m</b>	<b>Moins de 40 KW</b>
<b>Moyenne</b>	<b>12 m à 45 m</b>	<b>De 40 KW à 1 MW</b>
<b>Grande</b>	<b>46 m et plus</b>	<b>1 MW et plus</b>

**Tableau. I.1:** Classification des turbines éoliennes.

#### **I- 4-Principales composantes des éoliennes à axe horizontal : [4]**

L'éolienne à axe horizontale (Figure. I.6), étant le sujet de notre étude, sera décrite en citant ses différents composants.

En générale, l'éolienne à axe horizontale est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat) la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu.

#### I.4.1. Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en oeuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

#### I.4.2. Une nacelle

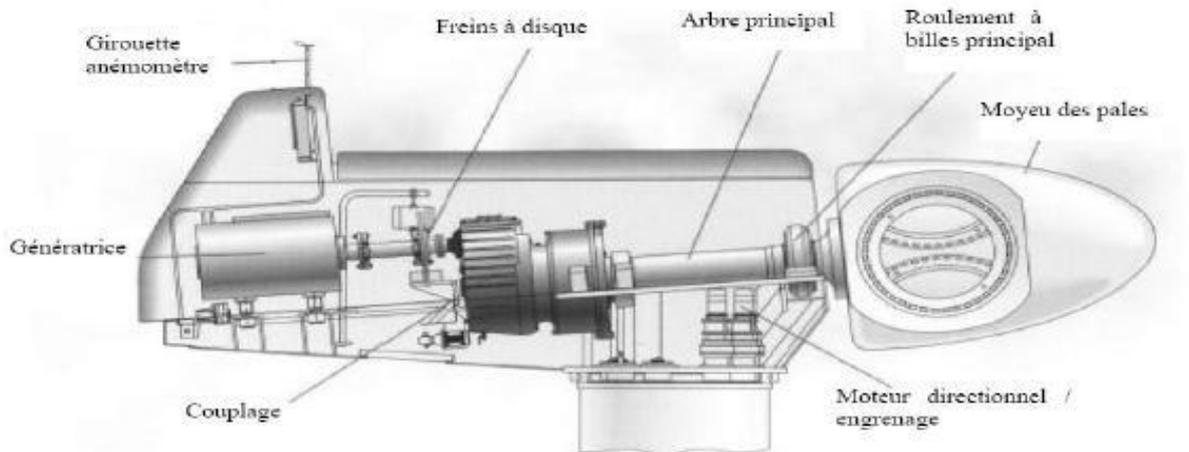
Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

Les différents composants d'une nacelle:

- **Le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **L'arbre secondaire** : comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **La génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un contrôleur électronique** : chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- **Divers dispositifs de refroidissement** : (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile. Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.



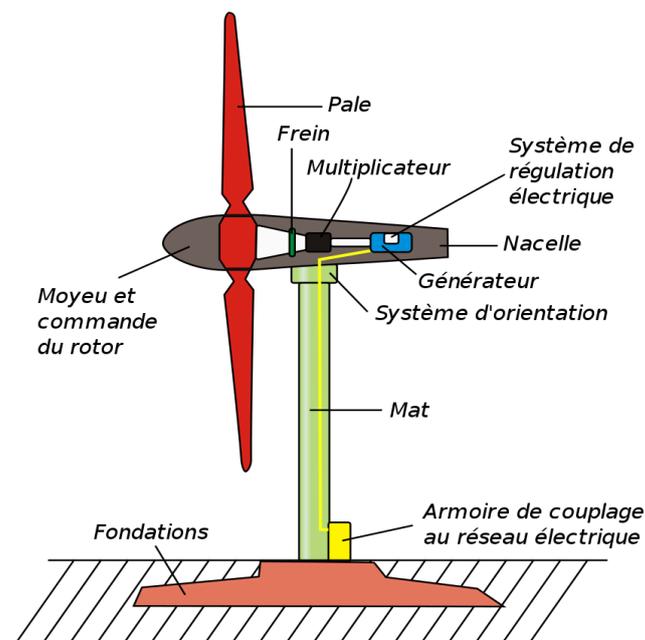
**Figure. I.6 :** Principales composantes des éoliennes à axe horizontal

### I.4.3. Les pales

Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité.

### I.4.4. Le moyeu

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.



**Figure. I.7 :** Principales composantes de l'éolienne à axe horizontal.

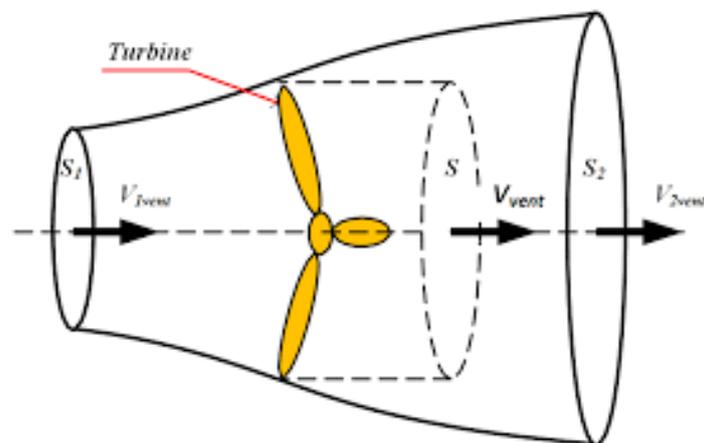
## I.5. Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique: [1]

La nacelle telle qu'elle est présentée dans la figure I.6 a pour rôle de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique. Cette opération est basée sur un certain nombre de lois physiques qui sont présentées dans ce qui suit.

### I.5.1. Lois fondamentales régissant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique : [05]

#### I.5.1.1. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure I.7, sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $v_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $v_2$  en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $v_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $v_2$ , soit  $v_{12}$ .



**Figure I.8 :** Tube de courant à travers une éolienne

La masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2)}{2} \quad (\text{I.1})$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (\text{I.2})$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression (équation I.1):

$$P_m = \frac{\rho \cdot S \cdot (v_1 + v_2) \cdot (v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (\text{I.3})$$

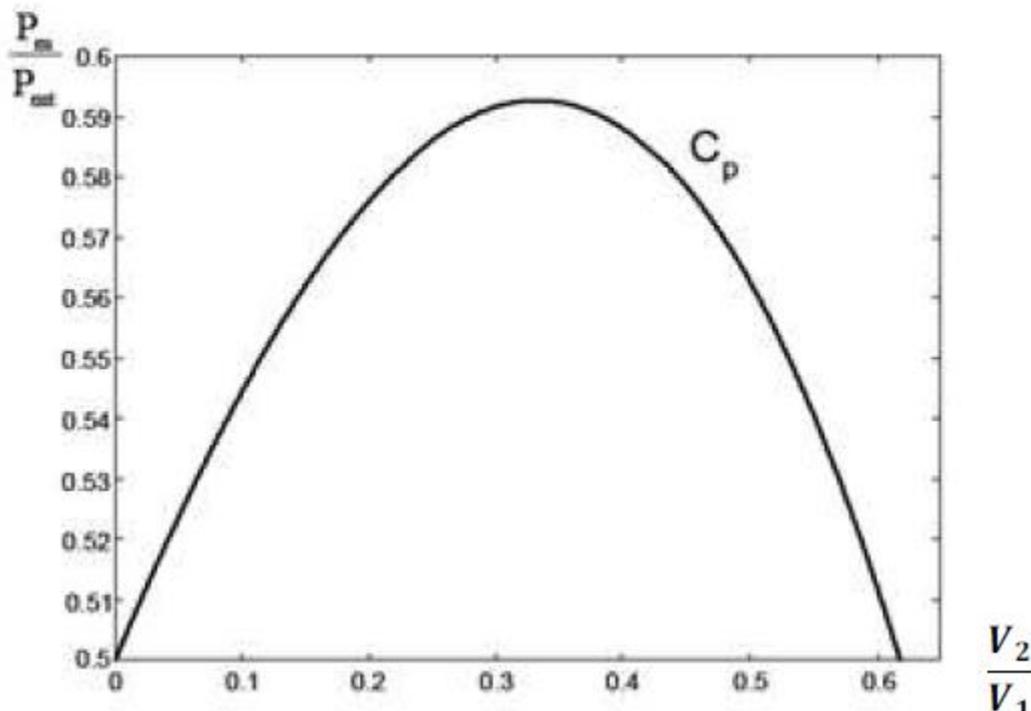
Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $v_1$ , la puissance théorique  $P_{mt}$  correspondante serait alors:

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot v_1^3}{2} \quad (\text{I.4})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors donné par :

$$\frac{p_m}{p_{mt}} = \frac{\left( \left( 1 + \frac{v_1}{v_2} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^2 \right) \right)}{2} = C_p \quad (\text{I. 5})$$

La figure I.8 représente l'évolution du ratio  $\frac{p_m}{p_{mt}}$  en fonction de  $\frac{v_1}{v_2}$ . On s'aperçoit que ce ratio appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maxima de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [13].



**Figure I.9 :** Courbe caractéristique du coefficient de puissance [06]

La courbe de la figure I.8 représente la forme la plus répandue du coefficient de puissance et qui caractérise une éolienne tripale à axe horizontal. Cette forme peut, par contre changer selon le type de l'éolienne (à axe horizontal ou vertical), ou bien selon le nombre de pales comme le montre la figure I.9. Cette figure montre que pour des éoliennes dont la vitesse relative est comprise entre 0 et 10 appelées aussi éoliennes lentes, la courbe  $C_p = f(\lambda)$  a une forme en cloche plutôt étroite et pointue. Alors que pour des éoliennes rapides et dont la vitesse relative est comprise entre 10 et 20, la forme de cette courbe est plutôt large et aplatie au sommet .

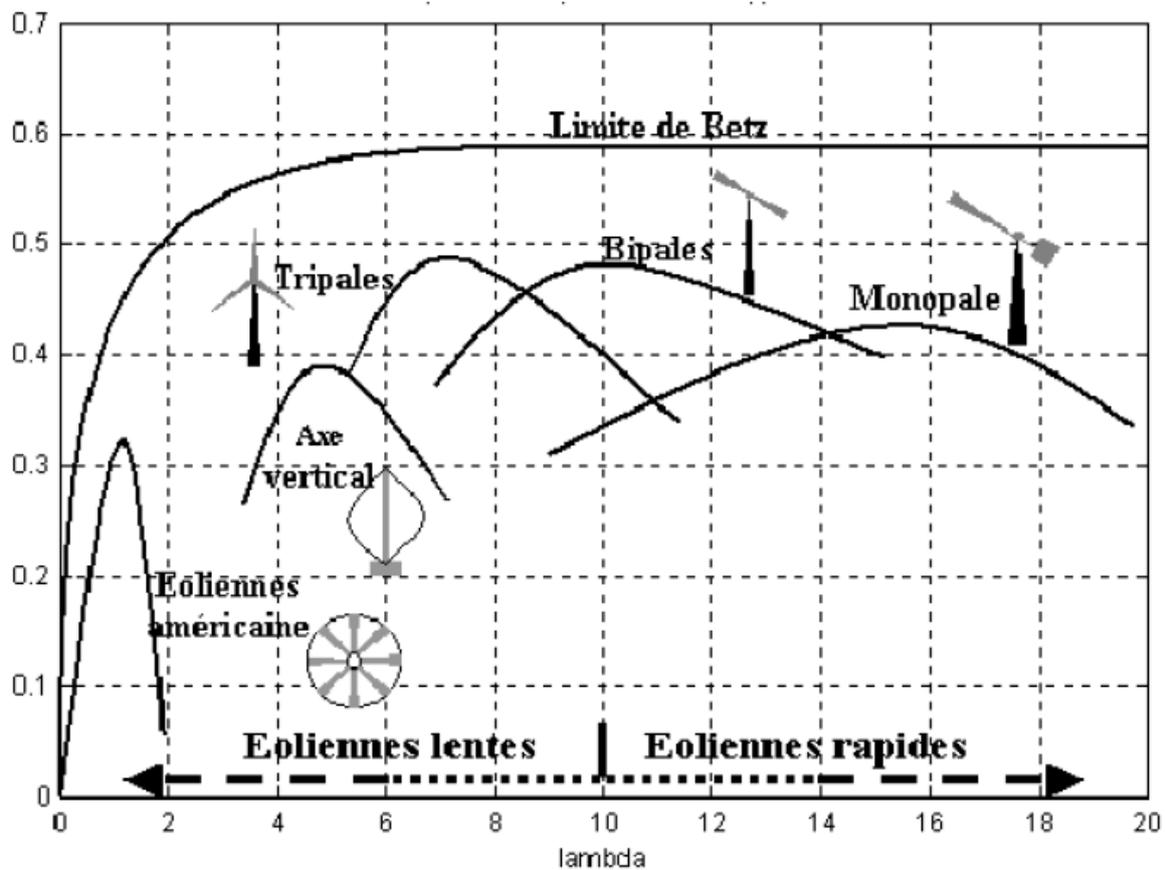


Figure I.10 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [06 ]

### I.5.1.2. Production d'énergie mécanique

En combinant les équations I.1, I.4 et I.5, la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime par :

$$P_m = \frac{p_m}{p_{mt}} p_{mt} = C_p \cdot p_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \pi \rho R^2 v_1^3 \quad (\text{I.6})$$

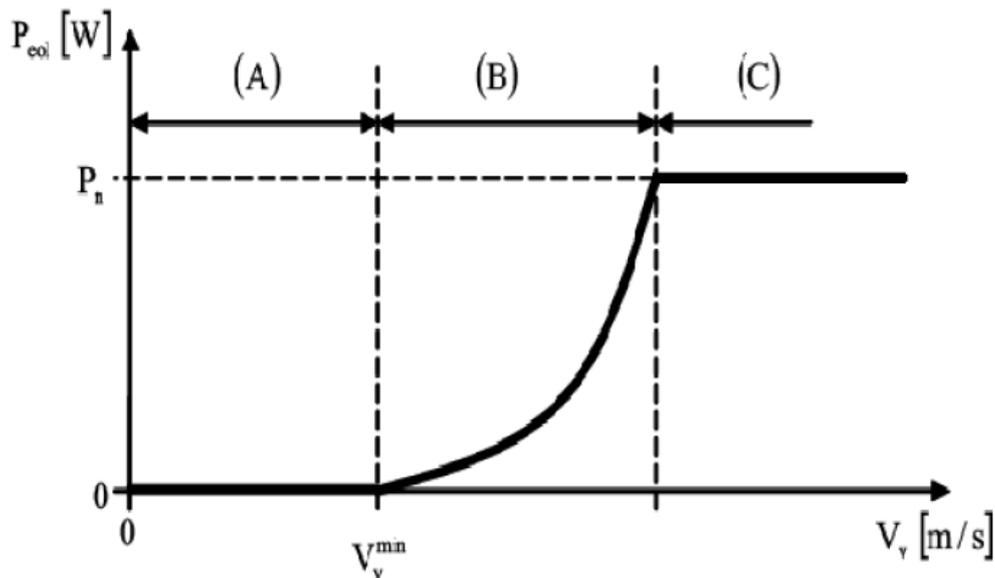
Avec

$$\lambda = \frac{R\Omega_1}{v_1} \quad (\text{I.7})$$

$\Omega_1$  est la vitesse de rotation avant multiplicateur et  $R$  le rayon de l'aérogénérateur.

La relation I.7 permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

La figure I.10 représente la caractéristique obtenue pour une valeur donnée de la vitesse de rotation.



**Figure I.11** : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [06]

Après une partie (A) où aucune puissance n'est délivrée pour des vitesses du vent inférieures à la vitesse de démarrage  $v_v^{min}$ , une section de fonctionnement normal existe. Si on extrait alors la puissance maximale de la turbine (MPPT) celle-ci évolue alors selon le cube de la vitesse du vent (B). Quand la puissance nominale  $P_n$  est atteinte, elle doit être limitée (C). Au-delà d'une certaine limite de vitesse du vent, la turbine doit être arrêtée.

Il existe quatre méthodes principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent.

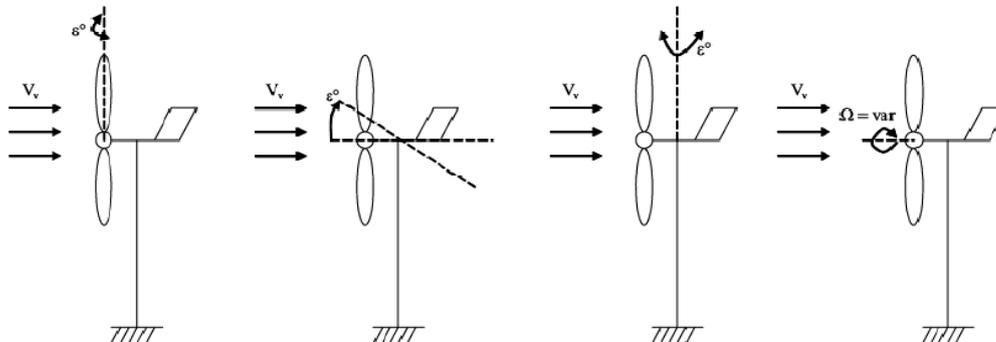
La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons de ces deux technologies.

La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (une rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue.

La dernière méthode qui permet la régulation de la puissance éolienne consiste à faire varier la vitesse de rotation  $\Omega_{mec}$  par une action électrique. Par le biais de la génératrice accouplée à une chaîne de conversion statique pilotée pour gérer le transfert d'énergie, la

la vitesse de rotation peut être pilotée selon le point de fonctionnement souhaité. Le plus souvent, dans les turbines classiques à axe horizontal, le dispositif de réglage à fréquence variable est associé à un réglage mécanique (pitch ou stall).



**Figure 1.12** : Orientation de la nacelle en vue de la limitation de la puissance

Ces différentes méthodes de limitation de la puissance éolienne laissent croire que la conversion de l'énergie éolienne telle que décrite par les équations précédentes est simplifiée du moment qu'on ne prend pas en considération un certain nombre de contraintes physiques liées aux turbulences du vent, les matériaux dont l'aérogénérateur est construit et les obstacles pouvant perturber l'écoulement du vent...etc.

### I.5.2. Contraintes mécaniques associées à la conversion de l'énergie éolienne [07]

L'expression du couple éolien donne le couple moyen présent sur l'arbre de la turbine correspondant au vent équivalent moyen. Il faut, pour mieux décrire le comportement, prendre en compte l'existence des couples pulsatoires, qui entraîneront des fluctuations de puissance, et qui sont générés par les irrégularités déterministes du champ de vitesses .

Ces phénomènes sont dus en particulier à l'effet de cisaillement, l'effet du passage d'une pale devant la tour (effet d'ombre), sans oublier d'ajouter également les effets des imperfections de construction (asymétrie).

Ces différentes contraintes peuvent être classées selon leur effet temporel sur le rotor et selon le caractère dynamique de la conversion.

#### ✓ Les contraintes liées à l'effet temporel :

- a) Les charges stationnaires, indépendantes du temps, lorsque le rotor tourne à une vitesse fixe : vitesse du vent constante, forces centrifuges.
- b) Les charges stationnaires dans le temps, mais pas dans l'espace, qui provoquent des

contraintes cycliques sur le rotor telles que l'augmentation du vent avec la hauteur et l'interférence entre la tour et l'écoulement du vent.

c) Les forces de gravité dues au poids des pales qui entraînent aussi des fluctuations périodiques.

d) Les contraintes non périodiques et stochastiques dues aux turbulences du vent

✓ **Les contraintes liées au caractère dynamique de la conversion :**

a) Effet d'ombre ou effet de tour : L'effet de tour est produit du fait de la résistance de la turbine à l'écoulement du vent, perturbe en amont et en aval. Loin de l'influence de la tour, la vitesse de vent est supposée constante alors qu'elle augmente à l'approche de la tour et diminue ensuite.

b) Phénomène de cisaillement : Le phénomène de cisaillement du vent produit également des oscillations de couple provoquées par le gradient de vitesse du vent le long du secteur balayé par les pales.

## **I.6. Modes d'exploitation de l'énergie éolienne:[08]**

En vue de l'exploitation de l'énergie fournie par le vent, plusieurs systèmes peuvent être utilisés. Nous pouvons les classer en deux catégories :

a) les systèmes à vitesse fixe

b) les systèmes à vitesse variable

### **I.6.1. Les systèmes à vitesse fixe**

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de kW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure I.12. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice .

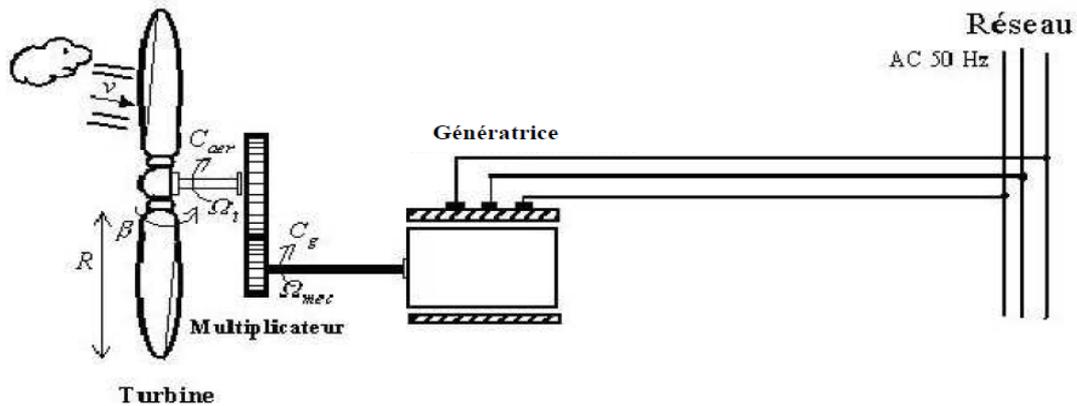


Figure I.13 : éolienne à vitesse fixe

### I.6.2. Les systèmes à vitesse variable

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure I.13. La configuration de la figure I.13.a est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure I.13.b, est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique .

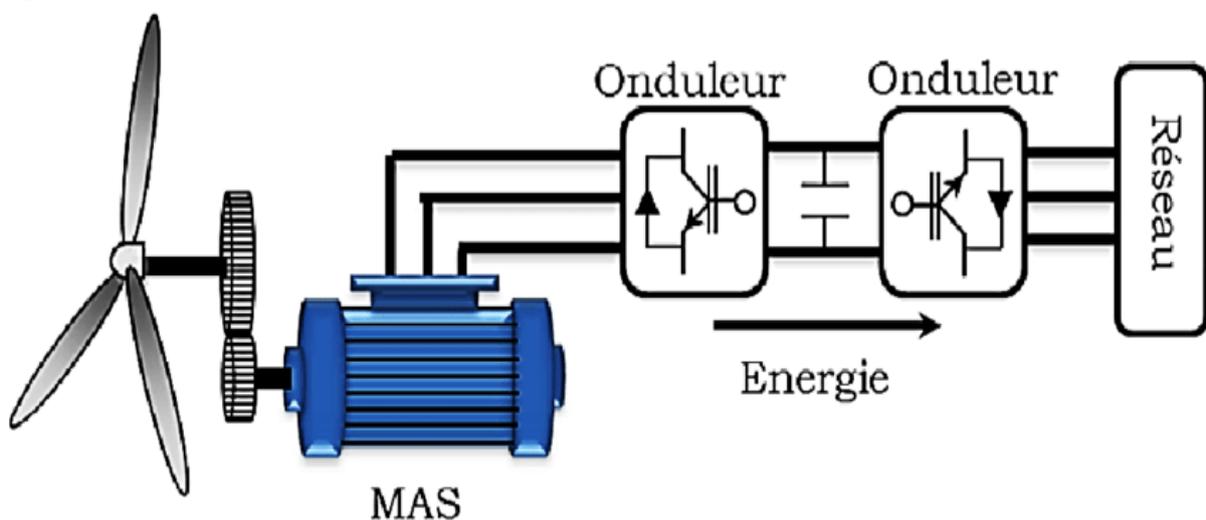
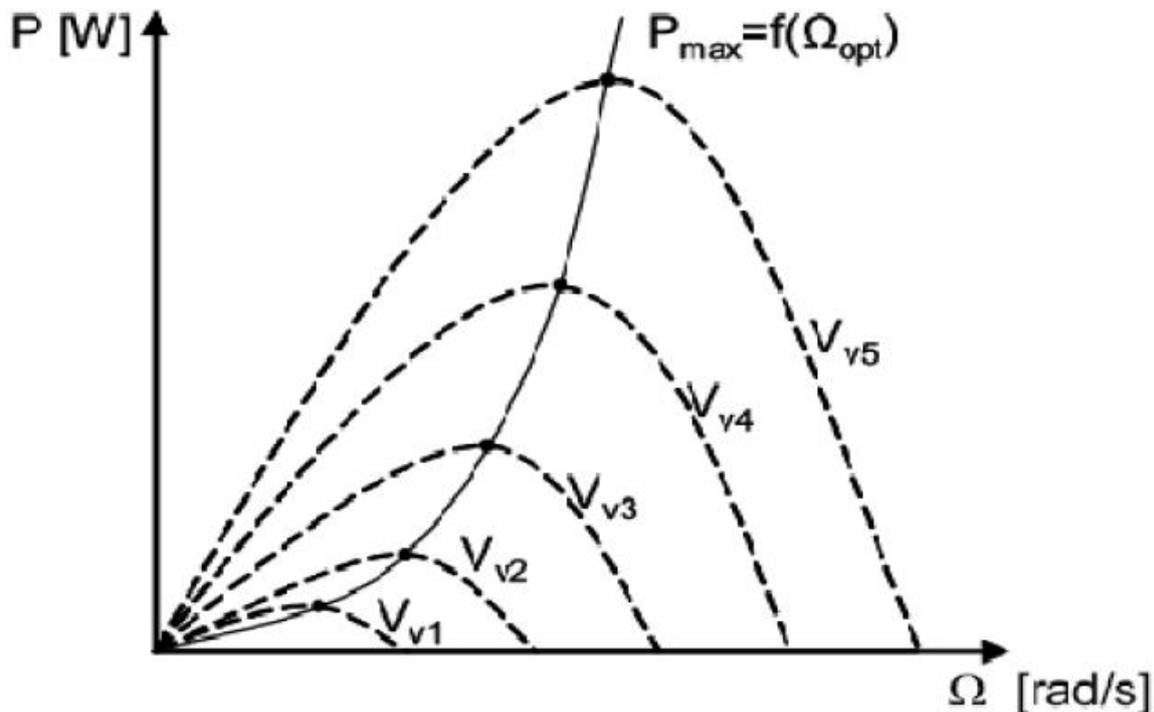


Figure I.14 : Eoliennes fonctionnant à vitesse variable

### I.7. Optimisation de l'énergie extraite:

Nous avons vu qu'il est indispensable de réguler la puissance éolienne et que les courbes caractéristiques des voilures éoliennes ne sont pas linéaires, surtout dans le cas des voilures de type Savonius dont la forme de cloche est très « pointue ». En ce qui concerne la puissance éolienne, elle résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent (donc de la vitesse réduite) et de la caractéristique  $C_p(\lambda)$ . Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolienne.



**Figure I.15 :** Optimisation de l'énergie extraite grâce à la variation de la vitesse de l'éolienne [09]

La Figure I.14 donne l'image de la famille des courbes de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent (pour une turbine Savonius) ainsi que la courbe optimale qui relie leurs sommets selon une fonction cubique de la vitesse de rotation. En suivant cette courbe continuellement, la puissance éolienne recueillie sera toujours maximale.

De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien où le surcoût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production.

Mais c'est aussi et surtout sur le plan de la durée de vie des systèmes que se situe l'avantage de la vitesse variable. En effet, les chaînes à vitesse variable sont moins « raides »

que les chaînes à vitesse fixe ou presque fixe rigidement couplées au réseau : cette liaison rigide se solde par de fortes oscillations de puissance engendrées par les turbulences. Ces variations sont à la longue nuisibles pour les éléments mécaniques : la vitesse variable, elle, permet de mieux lisser la production à travers l'énorme moment d'inertie que constitue la voilure.

### **I.8. Application des éoliennes : [04]**

Une éolienne est une machine capable de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie sera transformée en mécanique de rotation en tenant compte du rendement de la machine. Cette dernière sera exploitée de deux manières :

- directement pour entraîner une pompe.
- Pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique deux cas d'énergie se présentent :

- Stockée dans des accumulateurs.
- Utilisée directe sur le réseau de distribution.

L'énergie éolienne sert d'un côté de complément aux moyens traditionnels de production, d'un autre côté à la production pour alimenter les sites non raccordés.

### **I-9- Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne: [10]**

L'énergie éolienne est une source d'énergie présentée des avantages et des inconvénients comme tous les autres sources d'énergie.

#### **I.9.1. Avantages**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre. - non polluante, (ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs).
- inépuisable (énergie du vent).
- peut être rentable dans les régions éloignées et ventées (sites isolés). - peut être complémentaire des filières traditionnelles.

#### **I.9.2. Inconvénients**

- La source d'énergie éolienne étant stochastique; donc La qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs n'est pas toujours très bonne.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit, d'interférences électromagnétiques.

- Le captage et la conversion de l'énergie sont complexes.
- Les systèmes éoliens utilisent des matériaux coûteux.

## **Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production de l'énergie électrique à partir de l'exploitation de l'énergie éolienne et son importance. afin d'avoir une idée sur l'importance de l'investissement dans ce créneau. Nous avons également consacré ce chapitre à la description d'une éolienne, le calcul de la puissance extraite de la rotation de celle-ci, et les objectifs derrière le contrôle de son fonctionnement. Enfin, Nous avons donné un aperçu sur la conversion électromécanique et les différents types de machines utilisées. La comparaison entre ces machines a dégagé l'idée de consacrer notre étude à un système utilisant une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

## **CHAPITRE II**

### ***Modélisations d'une éolienne à MSAP***

### II-1-Introduction :

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes, ces machines constituent les plus gros convertisseurs d'énergie au monde. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW.

Dans notre étude nous allons nous intéresser à une éolienne à vitesse variable utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents. Ce choix n'est pas fortuit puisqu'il est basé sur les avantages technologiques et économiques qu'offre la MSAP comparée aux autres machines.

L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine. Cet avantage a couvert le coût élevé des aimants.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne, et où le modèle du vent et son évolution seront étudiés de façon détaillées, et consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimant permanent.

### II-2- Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

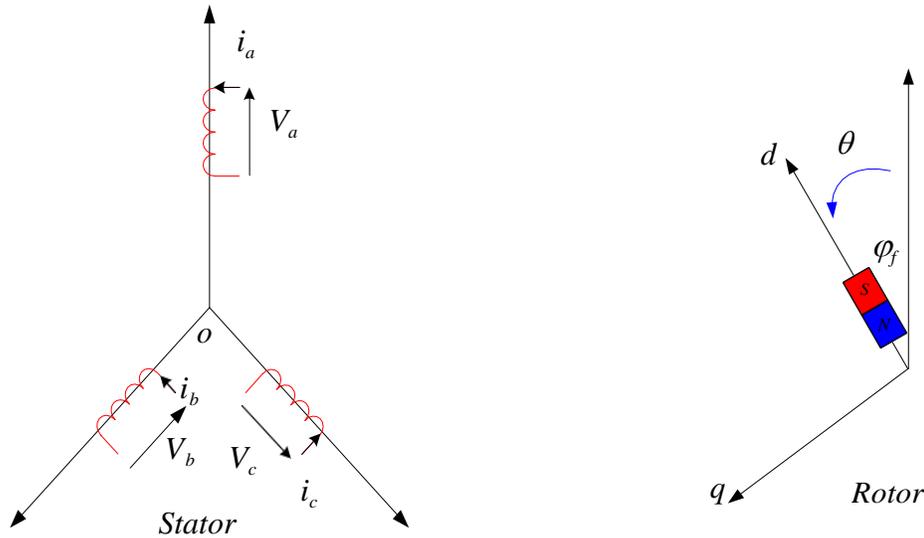
La mise sous forme d'un modèle mathématique d'une MSAP est nécessaire pour l'étude de sa commande dans les différents régimes de fonctionnements transitoire et permanent [11].

Les hypothèses simplificatrices usuelles adoptées dans la modélisation de la machine, données dans la majorité des références [12]:

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique,
- La distribution sinusoïdale de le F.M.M créée par les enroulements du stator,
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau,
- L'effet d'encoche est négligeable,
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

### II-2-1- Mise en équations de la machine dans le repère (abc)

La Figure (2.1) donne la représentation des enroulements pour une machine synchrone triphasée à aimants permanents.



**Figure (II.1):** Schéma de la MSAP dans le repère abc.

Le comportement de la machine est entièrement défini par trois types d'équations à savoir :

- Equations électriques,
- Equations magnétique,
- Equations mécaniques.

#### II-2-1- 1-Equations électriques

Les équations électriques du stator d'une machine synchrone triphasée à aimants permanents sans amortisseurs s'écrivent :

$$[v_s] = [R_s][i_s] \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (\text{II-1})$$

(2.1)

Où :

$[\mathbf{v}_s]: [v_a \ v_b \ v_c]^T$  : Vecteur tensions statoriques,

$[\mathbf{i}_s]: [i_a \ i_b \ i_c]^T$  : Vecteur courants statoriques,

$[\boldsymbol{\varphi}_s]: [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$  : Vecteur flux statoriques,

$[\mathbf{R}_s]: \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$  : Matrice résistance du stator.

### II-2-1- 2-Equations magnétiques

$$[\boldsymbol{\varphi}_s] = [\mathbf{L}_s] [\mathbf{i}_s] + [\boldsymbol{\varphi}_{f\ abc}] \quad (\text{II-2})$$

Où :

$[\boldsymbol{\varphi}_s]: [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$  : Vecteur flux statoriques,

$[\mathbf{i}_s]: [i_a \ i_b \ i_c]^T$  : Vecteur courants statoriques,

$[\boldsymbol{\varphi}_{f\ abc}]: [\varphi_{fa} \ \varphi_{fb} \ \varphi_{fc}]^T$  : Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement statorique.

La matrice  $[\mathbf{L}_s]$  est une matrice carrée qui contient des termes constants regroupés dans  $[\mathbf{L}_{s0}]$  alors que les termes variables dépendant de  $(\theta)$  sont regroupés dans  $[\mathbf{L}_{s2}(\theta)]$ . Dans le cas général, elle se met sous la forme :

$$[\mathbf{L}_s] = [\mathbf{L}_{s0}] + [\mathbf{L}_{s2}(\theta)] \quad (\text{II-3})$$

Avec :

$$[\mathbf{L}_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{S0} & M_{S0} & M_{S0} \\ M_{S0} & L_{S0} & M_{S0} \\ M_{S0} & M_{S0} & L_{S0} \end{bmatrix} \text{ et } [\mathbf{L}_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos 2\theta & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos 2\theta \\ \cos 2\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos 2\theta & \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

(II-4)

Où :

$M_{S0}$ : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques,

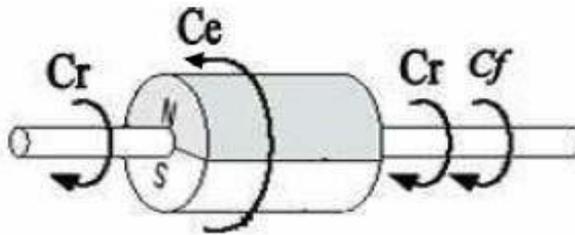
$L_{S0}$ : Inductance propre d'une phase statorique,

$\theta$ : Caractérise la position angulaire du rotor par rapport au stator

### II-2-1- 3-Equation mécanique

La dernière équation importante qui complète le modèle de la machine synchrone à aimants permanents est l'équation fondamentale de la mécanique décrivant la dynamique du rotor de la machine :

$$j \frac{d\omega_r}{dt} = C_{em} - C_r - f_c \omega_r \quad (\text{II-5})$$



**Figure (II.2):** Différents couples qui agissent sur le rotor.

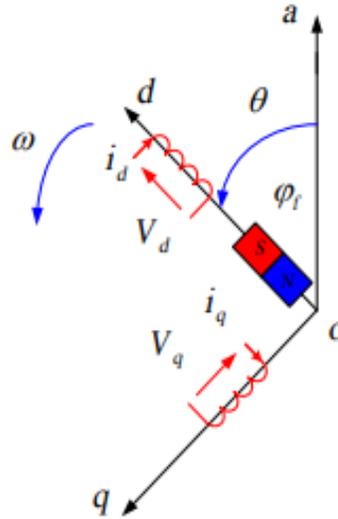
L'étude analytique du comportement des équations (2.2) et (2.3) est relativement laborieuse, vu le grand nombre de coefficients variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement du moteur à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. L'une de ces transformations est la transformation de Park [11].

### II-2-2-Transformation de Park [12]

Le modèle diphasé de la MSAP s'effectue par une transformation du repère triphasé réel en un repère diphasé fictive, qui n'est en fait qu'un changement de base sur les grandeurs physiques (tensions, flux et courants), il conduit à des relations indépendantes de l'angle  $\theta$  et à la réduction d'ordre des équations de la machine. La transformation la plus connue par les électrotechniciens est celle de Park.

Le repère (d,q) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant. Selon l'objectif de l'application.

La Figure (1.5) présente la MSAP en modèle de Park. Le repère (oa) est fixe. Le repère (d,q) tourne avec la vitesse de synchronisme  $\omega$ .



**Figure (II.3):** Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).

a) Passage direct : triphasé au diphasé :

L'équation qui traduit le passage du système triphasé au système biphasé (d,q) est donnée par :

$$[X_{dq0}] = [p(\theta)][X_{abc}] \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$[p(\theta)]$ : La matrice de passage direct de Park,

$X$  : Représente les variables considérées de la machine (tensions, courants ou flux),

$X_0$  : La composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le système est en équilibre.

$$[p(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin 2 \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin 2 \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

(II-7)

b) *Passage inverse : diphasé au triphasé*

La transformée de Park inverse est nécessaire pour revenir aux grandeurs triphasées, elle est définie par :

$$[X_{abc}] = [p(\theta)]^{-1} [X_{dq0}] \quad (\text{II-8})$$

Et la matrice de passage inverse de Park  $[p(\theta)]^{-1}$  est donnée par :

$$[p(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin 2 \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin 2 \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

### II-3- Modélisation de la turbine éolienne:

#### II-3-1-Modélisation du vent [13]

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente .

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- développer et affiner la modélisation du rotor ;
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par II.1 .

$$v_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II-10})$$

Avec

$V_0$  : la valeur moyenne de la vitesse du vent

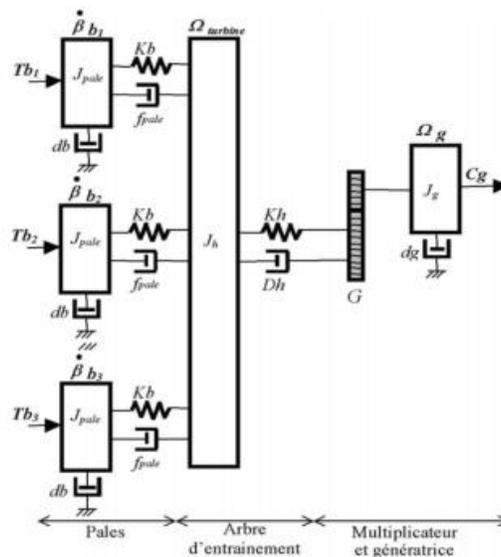
$a_k$  : amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k$

$\omega_k$  : pulsation de l'harmonique de l'ordre  $k$

$i$  : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

### II-3-2- Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine [14]

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour est lié à l'arbre de la génératrice. La figure II.1 illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne .



**Figure (II.4):** Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne.

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

– la même inertie  $J_{pale}$

- la même élasticité  $k_b$
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $d_b$

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

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

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

Le rotor de la génératrice possède :

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

Ce rotor transmet un couple entraînant ( $C_g$ ) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ . La turbine comporte également un multiplicateur de vitesse noté  $G$ .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ( $T_{b1}=T_{b2}=T_{b3}$ ) alors on peut considérer

l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air  $d_b$  est très faible et peut être ignoré.

De même, les pertes par frottement côté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

En tenant compte de ces considérations, le modèle mécanique de la figure II.1 devient celui donné dans la figure II.2 comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique  $C_{aer}$ .

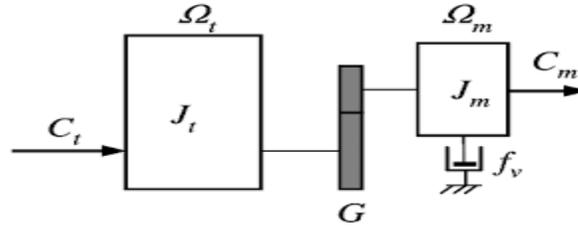


Figure (II.5): Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne.

**II-3-3- Modélisation de la turbine à étudier [15]**

La turbine considérée est à axe horizontal, de rayon 0.5m, d'une hauteur de 2m, et d'une puissance de 600watt. Elle ne comporte pas de multiplicateur de vitesse (figure II.3) .

Elle est caractérisée par l'équation caractéristique de  $C_p = f(\lambda)$  suivante :

$$C_p = 0.2121 \lambda^3 + 0.0856 \lambda^2 + 0.2539 \lambda \tag{II-11}$$

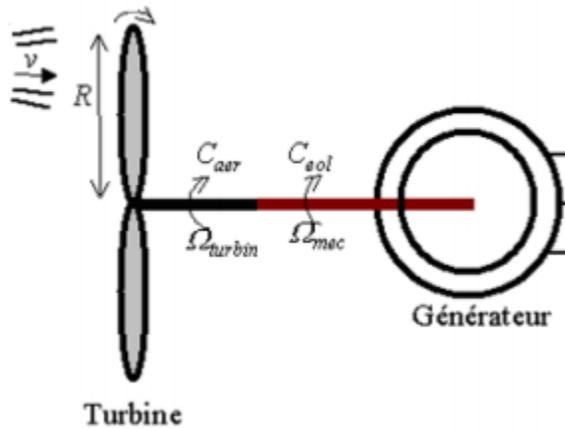


Figure (II.5): Schéma simplifié de la turbine éolienne.[14]

**II-3-4- Equation dynamique de l'arbre [14]**

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie notée  $j = j_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de cette dernière .

$$j = j_{turbine} + j_{génératrice} \tag{II-12}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{mec}$  appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II-13})$$

$$C_{mec} = -C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II-14})$$

$J$  : l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

$C_{mec}$  : le couple mécanique,

$C_{em}$  : le couple électromagnétique produit par la génératrice,

$C_{vis}$  : le couple des frottements visqueux.

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f_m$  tel que :

$$C_{vis} = f_m \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II-15})$$

La modélisation d'une turbine éolienne revient à connaître le couple qu'elle développe au niveau du rotor, et qu'elle extrait de la puissance éolienne, suivant ces équations [10] :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot v_v^2 \quad (\text{II-16})$$

$$\lambda = \frac{R\Omega_{mec}}{v_v} \quad (\text{II-17})$$

$$C_{éol} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v_v^2 \cdot \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (\text{II-18})$$

Afin d'obtenir la vitesse de rotation de la turbine, on utilise l'équation mécanique de l'arbre de la turbine solidairement lié à celui de la machine synchrone utilisée.

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{éol} - C_{em} - f_m \Omega_{mec} \quad (\text{II-19})$$

$P_{éol}$  : la puissance éolienne,

$\lambda$  : la vitesse relative de la turbine,

$\Omega_{mec}$  : la vitesse de rotation,

$v_v$  : la vitesse du vent,

$\rho$  : la densité de l'air,

$C_p$ : le coefficient de puissance,

$C_{\text{éol}}$ : le couple éolien,

$J_t$ : inertie de la turbine,

$J_m$ : inertie de la machine,

$C_{\text{em}}$ : couple électromagnétique,

$f_m$  : coefficient de frottements visqueux dans la machine.

**Remarque :** le coefficient de frottements visqueux dans la turbine est négligeable.

## II-4-Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents[16]:

### II-4-1- Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la Machine synchrone à aimants permanents obéit aux hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique est considéré linéaire (absence de saturation),
- La répartition du champ inducteur dans l'entrefer ainsi que les forces magnétomotrices (FMM) sont sinusoïdales,
- Les harmoniques d'encoches et d'espace ne sont pas pris en compte,
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligé,
- Les résistance des enroulements ne varient pas avec la température.

### II-4-2- Modèle de la MSAP dans le repère naturel (a,b,c)

La machine synchrone à aimants permanents peut être modélisée par trois équations électriques et une seule équation mécanique, les tensions aux bornes des trois phases s'expriment en fonction des courants et des flux par les équations suivantes:

$$[v_{abc}] = [R_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \quad (\text{II-20})$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [\mathbf{R}_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

$[v_a \ v_b \ v_c]^T$  : Vecteur tensions statoriques,

$[i_a \ i_b \ i_c]^T$  : Vecteur courants statoriques,

$[\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T$  : Vecteur flux statoriques

$\mathbf{R}_s$ : la résistance d'une phase d'enroulement statorique.

Les flux totaux  $\varphi_{abc}$ , sont exprimés par :

$$[\varphi_{f \ abc}]: [\mathbf{L}] [i_{abc}] + [\Psi_{f \ abc}] \quad (\text{II-22})$$

Tel que:

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} L_{ss} & M_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & L_{ss} & M_{ss} \\ M_{ss} & M_{ss} & L_{ss} \end{bmatrix} \quad (\text{II-23})$$

$L_{ss}$  et  $M_{ss}$ : représentant respectivement l'inductance propre et l'inductance mutuelle entre les enroulements statoriques,

En remplaçant les relations (II.12) et (II.13) dans, respectivement les relations (II.10) et (II.11), nous obtenons l'expressions suivante :

$$[\mathbf{V}_{abc}] = [\mathbf{R}_s][i_{abc}] + \frac{d}{dt} [i_{abc}] + [\Psi_{f \ abc}] \quad (\text{II-24})$$

II-4-3-Modèle de la MSAP dans le repère de Park

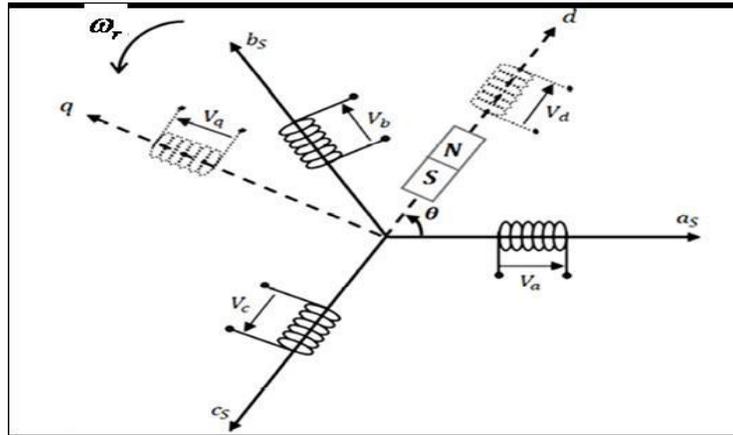


Figure (II.5):: Représentation d'une MSAP dans le repère (d q) .

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel la transformation de park qui permet de transformer un système triphasé (a, b, c) au système équivalent biphasés généralisé (d, q) et inversement, est définie par la matrice [p(θ)] .

$$[ X_{dq0} ] = [ p(\theta) ] [ X_{abc} ] \tag{II-25}$$

Où X peut-être un courant, une tension ou un flux et θ représente la position du rotor. Les termes

X<sub>d</sub> , X<sub>q</sub> représentent les composantes longitudinale et transversale des variables statoriques (tensions, courants, flux et inductances). La matrice de transformation [p(θ)] est donnée par :

$$[ p(\theta) ] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{II-26}$$

Dont la matrice inverse [p(θ)]<sup>-1</sup> a pour forme :

$$[ p(\theta) ]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \tag{II-27}$$

En appliquant la transformation (II.15) au système (II.14), on aura :

$$\begin{cases} v_d = R_s I_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r \varphi_q \\ v_q = R_s I_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

avec:

$$\begin{cases} [\varphi_d] = L_d I_d + [\Psi_f] \\ [\varphi_q] = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II} - 29)$$

Où:

$v_d, v_q$  Représentent respectivement les vecteurs tension statoriques d'axes d et q;

$i_d, i_q$ : Représentent respectivement les vecteurs courants statoriques d'axes d et q ;

$\omega_r$  : Vitesse électrique de rotation du rotor tel que  $\omega_r = p\Omega_m$  ( $\Omega_m$  :vitesse mécanique)

$p$  : Nombre de paires de pôles;

$\Psi_f$  : Flux induit par les aimants ;

$R_s$  :Résistance d'une phase statoriques ;

$L_d, L_q$ : Représentent respectivement les inductance statoriques d'axes d et q ;

La substitution de (II.20) dans (II.19) donne :

$$\begin{cases} v_d = R_s I_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p\Omega_m L_q I_q \\ v_q = R_s I_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p\Omega_m L_d I_d + p\Omega_m [\Psi_f] \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

#### II-4-4-Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est donné par:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II-31})$$

En remplaçant les flux par leurs expressions, on aura:

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \Psi_f i_q] \quad (\text{II-32})$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} v_d = -R_s I_d - L_d \frac{di_d}{dt} + p\Omega_m L_q I_q \\ v_q = -R_s I_q - L_q \frac{di_q}{dt} - p\Omega_m L_d I_d + p\Omega_m \Psi_f \end{cases} \quad (\text{II-33})$$

#### II-4-5-Equations mécaniques

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

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_m - f_m \Omega_m \quad (\text{II-34})$$

### Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation et la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Nous avons présenté différentes structures concernant la construction de celle-ci du point de vue emplacement des aimants permanents. Nous avons ensuite présenté les équations régissant son fonctionnement, qui permet la modélisation d'une génératrice synchrone à aimants permanents.

## **CHAPITRE III**

### **Techniques de commande appliquées a la MSAP**

### III.1 INTRODUCTION

Dans un entraînement à vitesse variable, le moteur constitue un élément de la boucle de régulation. Il est donc nécessaire de prendre en compte son comportement dynamique.

Suivant le niveau des performances demandées par l'utilisation, on sera amené à considérer un modèle de la machine plus ou moins complexe adapté au type de commande choisie.

Lorsque les performances dynamiques demandées ne sont pas trop contraignantes (variation du couple électromagnétique assez faible), ce qui est le cas des entraînements de pompes, ventilateurs, compresseurs, ..., on peut utiliser des commandes relativement simples (commandes scalaire par exemple).

Lorsqu'on est plus exigeant sur les performances dynamiques, ce qui est le cas des machines-outils, des appareils de levage, des entraînements de laminoirs, ... etc., il est nécessaire de maîtriser le couple à faible vitesse et pendant les régimes transitoires. On utilise alors des commandes dites "vectorielles" où à "orientation de flux" qui permettent de contrôler les courants statoriques et rotoriques et donc le couple.

Ces commandes, qui utilisent des algorithmes mis en œuvre par des microprocesseurs, exigent que l'on connaisse la vitesse du moteur. L'utilisation d'un capteur de vitesse permet d'optimiser les performances sur toute la plage de vitesse, y compris à l'arrêt où il faut pouvoir imposer la position du rotor.

Lorsqu'il n'est pas nécessaire de réaliser un couple important à vitesse nulle et qu'il n'y a pas de contrainte de positionnement à l'arrêt, les technologies récentes de l'électronique de commande permettent de s'affranchir de la présence d'un capteur de vitesse pour réaliser une commande directe du couple.

Dans ce chapitre, nous présenterons différentes techniques de commande et interpréterons leurs implantations. Les difficultés rencontrées, les avantages et inconvénients de chaque technique seront développées afin de choisir celle la plus adaptée à notre cas.

### III.2. Les techniques de commande de la machine:

Parce que les outils de calcul le permettent et que les modèles se sont affinés, Les travaux de recherche ont été orientés vers d'autres solutions faisant intervenir des actionneurs moins coûteux et plus robustes, à savoir les machines synchrones et les machines à induction. Une recherche de la simplicité de conception et de la robustesse devient un des critères les plus importants dans de nombreuses applications. La progression rapide dans le domaine de l'électronique de puissance, surtout la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1957 et les progrès de l'informatique permettent de développer des stratégies de commande pour les actionneurs électriques beaucoup plus évoluées.

On trouve dans la littérature de nombreuses méthodes de commandes. Nous nous intéresserons, dans ce qui suit, à celles les plus connues et les plus utilisées dans le cadre d'une commande de la machine synchrone. Dès leurs inventions, les chercheurs utilisent une de ces stratégies comme unité de base dont le but est d'améliorer les performances fonctionnelles des machines électriques. Les commandes principales et ses dérivées représentent le même type, donc on s'intéresse aux techniques les plus connues qui font l'objet de nombreuses publications

### III.3. Commande scalaire ou controles du flux : [17]

La commande scalaire est la plus ancienne technique de commande pour les machines à courant alternatif, elle est caractérisée par sa simplicité à implanter, sa simple structure, qui est basée sur le contrôle de flux statorique qu'il faut le maintenir constant.

Les stratégies de contrôle du flux peuvent être directes, ou indirectes. Dans le premier cas, elles nécessitent un régulateur de flux et donc un estimateur ou un observateur de ce dernier. De hautes performances statiques et dynamiques sont alors obtenues. La seconde stratégie n'utilise pas de régulateur de flux. Elle consiste à maintenir le flux constant par l'intermédiaire d'une relation liant la pulsation ( $\omega_s$ ) et les grandeurs électriques de commande,  $V_s$  ou  $I_s$  de la machine. Ces lois sont définies à partir des relations déduites des équations de la machine en régime permanent (lois statiques).

Deux principales lois statiques sont généralement utilisées :

III.3.1. Loi tension- fréquence:

Dans le cas d'une alimentation en tension, il suffit d'imposer à l'onduleur MLI le module de la tension  $V_s$  proportionnel à la fréquence statorique la relation (I.1) dite loi V/f ou commande scalaire.

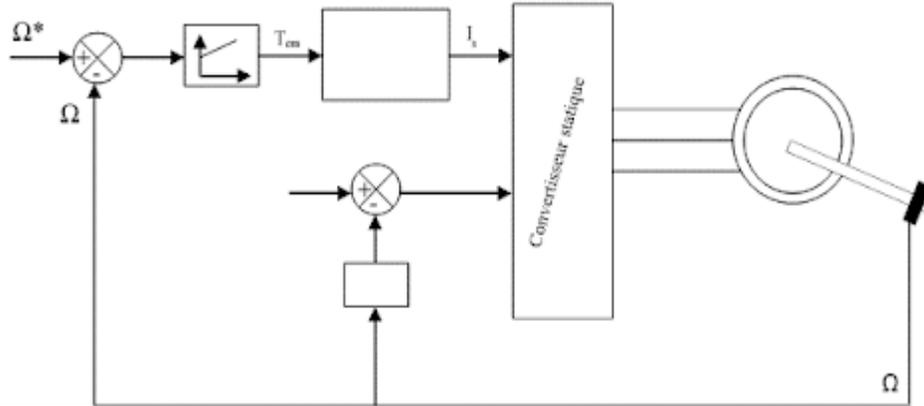


Figure 3.1. Schéma de la commande scalaire à V/f

La loi généralement utilisée s'écrit sous les formes simplifiées suivantes :

$$V = \psi_s \cdot \omega_s \text{ Ou } ( V_s = \psi_s \cdot \omega_s + k_0 \cdot \omega_r ) \tag{ III.1}$$

On constate que pour avoir un rapport  $s V_s \omega$  constant il faut maintenir le flux constant.

On constate que pour avoir un rapport  $s V_s \omega$  constant il faut maintenir le flux constant. Pour un fonctionnement à grande vitesse le flux est estimé de la relation  $s s s s (V R I) \omega \psi - =$  on peut négliger le terme  $R_s I_s$  devant  $V_s$ . Pour les faibles vitesses ou proche du zéro, la chute de tension statorique n'est plus négligeable ( $V_s$  a une faible valeur) donc un écart égal  $a$  s'impose dans l'estimation de flux se qui rend la commande inutile

### III.3.2. Loi courant – fréquence:

Dans le cas d'une alimentation en courant ou une alimentation en tension contrôlée en courant, la loi courant - fréquence consiste à imposer le module du courant statorique en fonction de la pulsation du courant rotorique.

L'avantage de ces lois statiques est la simplicité de leur implantation. Cette technique est rarement utilisée à cause de sa limitation qui vient principalement de la non validité du modèle utilisé pour les régimes transitoires de fortes amplitudes tels que le démarrage et l'inversion du sens de rotation. Dans la référence la commande V/f est étudiée et comparée avec une commande directe du couple, les résultats de simulation et de l'expérimentation manifestent que l'instabilité et la mauvaise dynamique lors de démarrage et de changement de consigne représentent les principaux inconvénient de la commande V/f.

### III.4. Commande vectorielle:[18]

La commande vectorielle a été établie au début des années 70 par F. Blaschke, L'objectif de la commande vectorielle de la MSAP est d'aboutir à un modèle équivalent à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé, ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique ,La figure.I.2 montre la structure de la commande vectorielle.

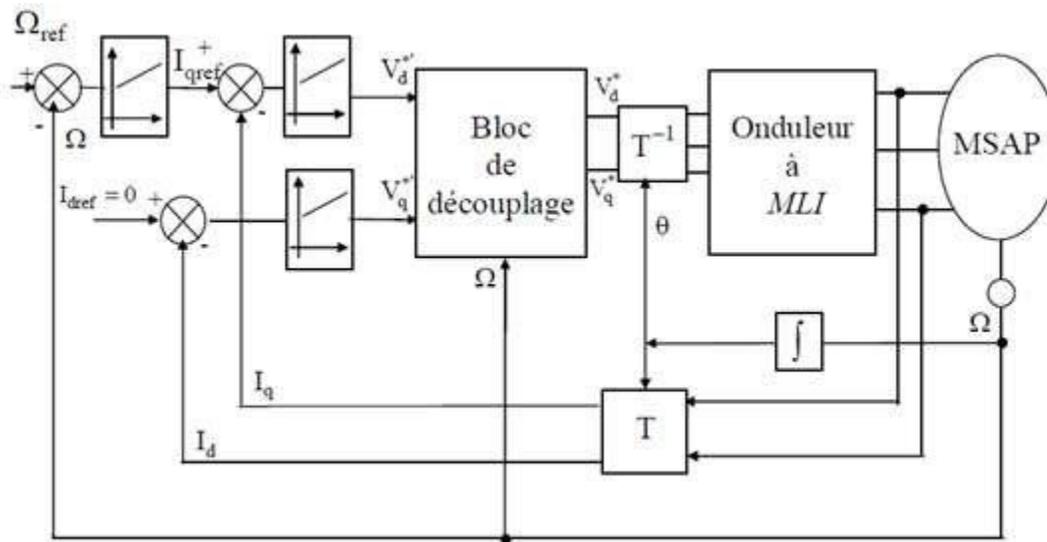


Figure 3.2. Schéma global de la commande vectorielle

Cette méthode est restée peu exploitée jusqu'au début des années 80, les progrès dans la technologie des semi-conducteurs de puissance et dans la microélectronique ont permis son utilisation dans les variateurs industriels actuels . Cependant, cette commande présente une faiblesse face aux variations des paramètres de la machine, qu'ils varient au cours de fonctionnement, les auteurs dans traitent le problème de la variation des paramètres surtout la résistance statorique et rotorique. D'autres articles proposent une commande vectorielle pour commander la machine synchrone afin d'optimiser les performances du système on peut citer par exemple les références

### III.5.Commande directe de couple (dte) :[19]

Le contrôle direct du couple (Direct Torque Control DTC) a été introduit par I.TAKAHASHI en 1985 à partir de la méthode du flux orienté et du principe du moteur à courant continu. Il a proposé de remplacer le découplage à travers la transformation vectorielle par un contrôle non linéaire tel que les états de commutation de l'onduleur soient imposés à travers un pilotage séparé du flux statorique et du couple électromagnétique du moteur. La commande de l'onduleur est instantanée, ce qui nécessite une période d'échantillonnage très faible La DTC présente une structure simplifiée, robuste vis-à-vis les variations des paramètres de la machine, elle est basé sur la détermination directe de la séquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur de tension, pour contrôler le flux statorique et le couple électromagnétique directement et indépendamment en utilisant deux comparateurs à hystérésis [19], [60], [20], [21]. La structure de la commande directe du couple est donnée par la figure.I.3.

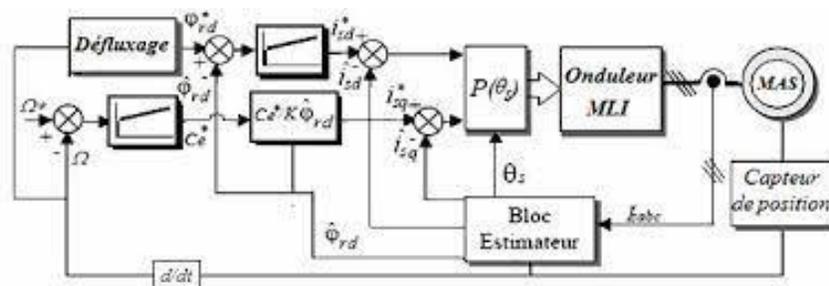


Figure 3.3. Structure de la commande directe du couple.

Grace à ses multiples avantages, et de sa simplicité pour la réalisation pratique, la commande directe du couple a fait l'objet de plusieurs travaux scientifiques. Les auteurs dans les références ont essayé de traiter l'influence de la variation des paramètres et plus spécialement la résistance

statorique et ils proposent par des méthodes de compensation. Alors que dans et une modification de la commande DTC a été introduite par élimination des vecteurs nuls, pour rendre le vecteur flux plus rapide. Les auteurs dans effectuent un état de l'art sur les différentes commandes DTC classique et modifiées. En et enfin dans la commande directe du couple est réalisée et comparée avec une commande à V/f dans le domaine de fonctionnement à très grande vitesse.

### III.6. Contrôle vectoriel direct du flux statorique (dsc):[17]

Le contrôle vectoriel direct du flux statorique (DSC) est apparu environ en même temps que le DTC. Il a été proposé par M. Depenbrock vers le milieu des années 80 .

Son principe de base correspond à une version simplifiée du DTC car, bien que le couple soit aussi régulé par hystérésis avec un régulateur simple bande, le flux statorique ne l'est pas. En effet, le flux statorique a une allure trapézoïdale dans le temps, au lieu de se rapprocher d'une sinusoïde comme dans le cas du DTC, et suit un hexagone prédéfini dans le plan  $\alpha \beta$  en régime permanent.

Le principe de réglage consiste à faire évoluer le vecteur flux statorique, selon une trajectoire dans le plan  $\alpha \beta$ , qui est défini a priori comme étant un hexagone dont le côté est égal au flux de référence en diphasé .

Pour le faire tourner on utilise un vecteur tension actif, et pour le bloquer un vecteur tension nul. Le choix du vecteur tension se fait de manière à maintenir le couple à l'intérieur de sa bande d'hystérésis. Le synoptique complet de la stratégie DSC classique avec un onduleur 2-niveaux est présenté dans la Figure I.4.

Comme dans le cas du DTC, le flux statorique doit être soit estimé, soit observé dans le plan  $\alpha \beta$ , ce qui permettra l'estimation du couple à partir de la mesure des courants statoriques. .

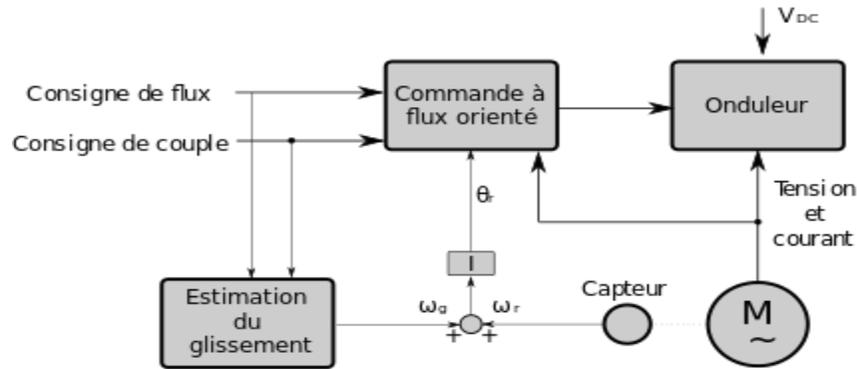


Figure 3.4. Schéma de la commande DSC classique 2-niveaux

### III.7. Commande non linéaire:[20]

Parmi les techniques de commande appliquées aux machines synchrones à aimants permanents, la commande non linéaire dite linéarisation entrée-sortie par retour d'état non linéaire, pour tenter de retrouver les performances optimales des machines à courant continu.

On cherche donc à obtenir une commande découplée pour réguler le flux dans la machine et le couple électromagnétique qu'elle développe indépendamment l'un de l'autre. La commande linéarisante entrée-sortie par retour d'état a été introduite depuis les années 80 et elle a été utilisée pour la commande des systèmes non linéaires.

Parmi les techniques de la commande non linéaire appliquées au domaine de la commande des machines électriques, la linéarisation entrée - sortie par retour d'état, basée sur la Géométrie Différentielle (dérivée de Lie) afin de l'appliquer sur la machine synchrone .

Le but de cette technique est de transformer le système multi entrées-sorties non linéaire en une chaîne de systèmes linéaires et découplés, en utilisant un retour d'état linéarisant avec découplage entrée-sortie .

De là, on pourra appliquer la théorie des systèmes linéaires, qui se résume en un placement de pôle pour assurer le bon suivi des trajectoires de références

La commande non-linéaire a été introduite en 1983 par Filless et Kupka, et présentée dans sa forme actuelle en temps continu par Isidori 1989, Grâce aux intéressants travaux développés par A.Isidori, B.Charlet, R. Marino, les théories de bases de la commande linéarisante entrée-sortie par retour d'état ont été mises en évidence. Bien que la théorie de la commande non linéaire soit

ancienne, sa complexité ne l'a permis d'être appliquée que ces dernières années avec la disponibilité des calculateurs numériques puissants

Plusieurs chercheurs travaillent sur cette technique dont le but est d'optimiser ses caractéristiques dynamiques surtout vis-à-vis le changement des paramètres, et aussi de réaliser une commande non linéaire sans capteur mécanique.

Dans la référence la commande non linéaire d'une machine synchrone sans capteurs mécaniques de vitesse, et couple de charge pour une machine synchrone alimentée par un onduleur de tension commandé par une technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI 'sinus-triangle').

Le filtre de Kalman étendu est utilisé pour l'estimation de la vitesse et du couple résistant.

Les auteurs dans proposent une commande non linéaire pour étudier la stabilité flux/couple électromagnétique par utilisation du logiciel de simulation MATLAB/GUI

La commande non linéaire présente l'avantage de pouvoir commander séparément les courants et le couple. Avec cette technique de commande, le modèle du moteur est décomposé en deux sous systèmes linéaires mono variables indépendants. Chaque sous système représente une boucle indépendante de commande d'une variable donnée (vitesse, couple, courant etc).

La dynamique du système linéarisé est choisie par une imposition optimale des pôles .

Le problème de la variation des paramètres reste l'inconvénient majeur de cette technique, surtout la résistance statorique qui peut varier avec la température, intervient directement sur les performances de régulation de vitesse ou de la position.

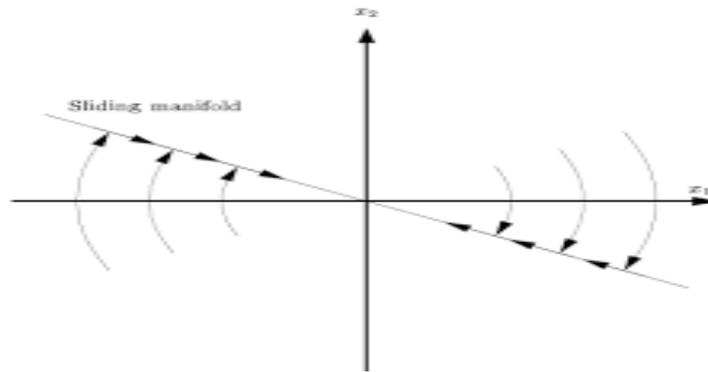
C'est pourquoi les travaux de recherches ont été orientés vers le développement des commandes adaptatives.

### **III.8. Théorie de la commande par mode de glissement :[21]**

La commande à structure variable par régime glissant est apparue depuis le début des années 60. Elle a été étudiée et développée exclusivement en union soviétique dans les années soixante. Par la suite, de nombreuses recherches ont été menées partout ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour l'appliquer aux systèmes physiques .

La CSV qui, par sa nature, est une commande non linéaire. Elle est basée sur la commutation de fonctions de variables d'état, utilisées pour créer une variété ou hypersurface de glissement, dont le but est de forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de l'hypersurface. Quand l'état est maintenu sur cette hypersurface, le système se trouve en régime glissant. Sa dynamique est alors insensible aux perturbations extérieures et paramétriques tant que les conditions du régime glissant sont assurées

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes, Figure 3.1



**Figure 3.5 :** Convergence du système glissant.

### Régime glissant idéal :

En théorie, l'organe de commutation est supposé insensible aux bruits, et la trajectoire en régime glissant décrit parfaitement l'équation  $S(x)=0$ . Le régime glissant idéal correspond à une oscillation de fréquence infinie et d'amplitude nulle, le point représentatif de l'évolution du système glisse parfaitement sur l'hyper surface de commutation (Figure 3.2)

### Régime glissant réel :

En pratique l'organe de commutation est réalisé à partir de relais qui présentent des imperfections comme les retards de commutations, dans ce cas la trajectoire de phase du régime glissant reste au voisinage de la surface de commutation donnant naissance à des oscillations indésirables qui éliminent la précision du système et néanmoins sa stabilité

### Conception de l'algorithme de commande par mode de glissement :

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes :

- Le choix de la surface,

- L'établissement des conditions d'existence de la convergence,
- La détermination de la loi de commande

### Choix de la surface :

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme, en fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \\ y = C^T x, y \in R^m \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande  $u(t)$ . Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur de référence

$x_{ref}$  plusieurs travaux proposent la forme générale suivante

$$s(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III.3})$$

Avec:

$e(x)$  : L'écart de la variable à régler  $e(x) = x_{ref} - x$

$\lambda_x$ : Une constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré

$r$ : Degré relatif, égale au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire

Pour  $r=1$   $S(x) = e(x)$ .

Pour  $r=2$   $S(x) = \lambda_x e(x) + e'(x)$

Pour  $r=3$ ,  $s(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x e'(x) + e''(x)$

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ . Pour un choix convenable du paramètre, ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence.

### III.8.1. Systèmes à structure variables:

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant. Dans les systèmes à structures variables avec mode de glissement, la trajectoire d'état est amenés vers une surface (Hyper plan), puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est dite surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit, est dit mouvement de glissement.

Le système à structure variable admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{x} = \begin{cases} f_1(x) & \text{Si la condition 1 est verifie} \\ f_n(x) & \text{Si la condition n est verifie} \end{cases} \quad (\text{III - 4})$$

Où fi les fonctions appartiennent à un ensemble de sous systèmes de classe Ck.

#### III.8.1.1. Théorie des modes glissants :[21]

Les systèmes à structure variable sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation appropriée. Ce choix assure à tout instant la commutation entre ces structures. La combinaison des propriétés de chacune de ces structures permet d'imposer le comportement désiré au système global [12]. Comme il a été présenté précédemment, la commande par le mode glissant est un cas particulier de la commande à structure variable appliquée à des systèmes décrits par l'équation suivante (on se limite au cas n=2) :

$$x = f = \begin{cases} f^+(x, u^+) & \text{Si } S(x, t) > 0 \\ f^-(x, u^-) & \text{Si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{III -5})$$

Les champs de vecteurs  $u^+$  et  $u^-$  sont définis par :

$$x = f = \begin{cases} x^+ & \text{Si } S(x, t) > 0 \\ x^- & \text{Si } S(x, t) < 0 \end{cases} \quad (\text{III -6})$$

où  $S(x, t)$  est la fonction de commutation (surface). La surface de commutation  $S_0$  est définie comme suite :

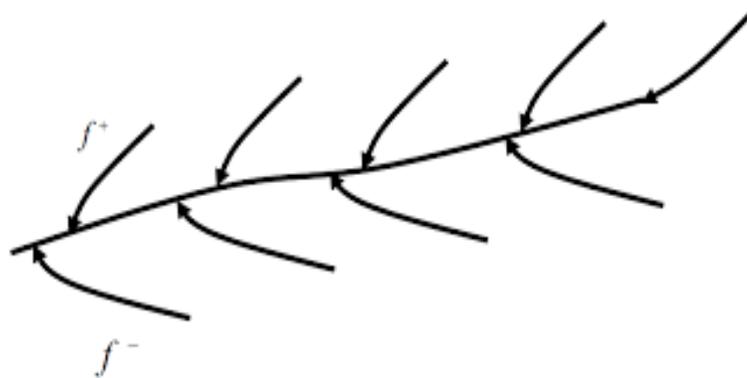
$$S_0 = \{ x(t) / S(x, t) = 0 \} \quad (\text{III -7})$$

On a choisi ici une surface de glissement sur laquelle le système commute ; c'est la surface sur laquelle le système suit l'évolution désirée. généralement, la variété de commutation est de dimension égale à «n» moins le nombre de fonction de commutation disponible (i.e. dans le cas de la commande, c'est le nombre de sorties à stabiliser).

Les trajectoires associées à la fonction  $f$  se résument en trois configurations où sont décrites les évolutions temporelles :

La configuration une, représente des trajectoires de  $f^+$  et  $f^-$  qui mettent en évidence un phénomène de répulsion de celles-ci vis-à-vis de la surface de commutation  $S_0$ . La seconde configuration représente des trajectoires où il existe des phénomènes d'attraction pour  $f^+$  (respectivement pour  $f^-$ ) et de répulsion pour  $f^-$  (respectivement pour  $f^+$ )

La troisième configuration (Figure 1) représente des trajectoires de  $f^+$  et  $f^-$  qui convergent vers la surface de commutation  $S_0$ , et qui ont la particularité de glisser sur celle-ci. Ce phénomène est appelé "mode de glissement".



**Figure 3.6.** Trajectoires de  $f^+$  et  $f^-$  pour le mode de glissement

### III.8.1.2. Modes de la trajectoire dans le plan de phase:[22]

La technique de la commande par mode glissant consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et de la faire commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre . Cette trajectoire est constituée de trois parties distinctes (Figure 3.1) :

❖ **Mode de convergence (MC)**

C'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de Commutation  $s(x,y)=0$ . Ce mode est caractérisé par la loi de commande et Le critère de convergence.

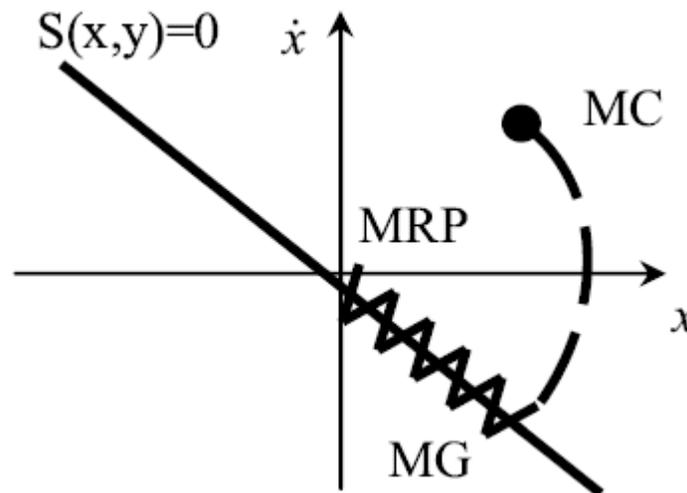
❖ **Mode de glissement (MG)**

C'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de Glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est Caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x,y)=0$ .

❖ **Mode de régime permanent (MRP)**

Ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour du point d'équilibre (origine du plan de phase) , il caractérise par la qualité et les performances de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non Linéaires .

La figure (3.2) représente les différentes modes pour la trajectoire dans le plans de phase :



**Figure 3.7.** Différentes modes pour la trajectoire dans le plan de phase

### III.8.1.3. Conception de la commande par mode glissant[23]

La structure de ce contrôleur comporte deux parties: une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle. La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes complémentaires définies par:

- Choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence.
- Détermination de la loi de commande.

#### ➤ Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces mais également leur forme. En fonction de l'application et de l'objectif visé. En général, pour un système défini par l'équation d'état suivant:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \\ y = C^T x, y \in R^m \end{array} \right\} \quad (\text{III -8})$$

Il faut choisir " m " surfaces de glissement pour un vecteur y de dimension " m ". La fonction de commutation est une fonction scalaire, telle que la variable à régler glisse sur cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase. Ainsi, la surface S(x)représente le comportement dynamique désiré du système. J.J.Slotine propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III -9})$$

avec :

- e(x) : écart de la variable à régler  $e(x) = x_{ref} - x$  ;
- $\lambda_x$  : constante positive ;
- r : degré relatif, égale au nombre de fois qu'il fait dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

Ainsi

- pour n = 1, S(x) = e(x)

- pour  $n=2$ ,  $S(x) = \lambda_x \cdot e(x) + \dot{e}(x)$
- pour  $n=3$ ,  $S(x) = \lambda_x^2 \cdot e(x) + 2\lambda_x \cdot \dot{e}(x) + \ddot{e}(x)$

L'objectif est de garder la surface  $S(x)$  égale à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est  $e(x) = 0$ , pour un choix convenable de  $\lambda_x$ . Ceci est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart en respectant la condition de convergence. La linéarisation de l'écart a pour but de forcer la dynamique de l'écart (référence sortie) à être une dynamique d'un système linéaire autonome d'ordre 'r'.

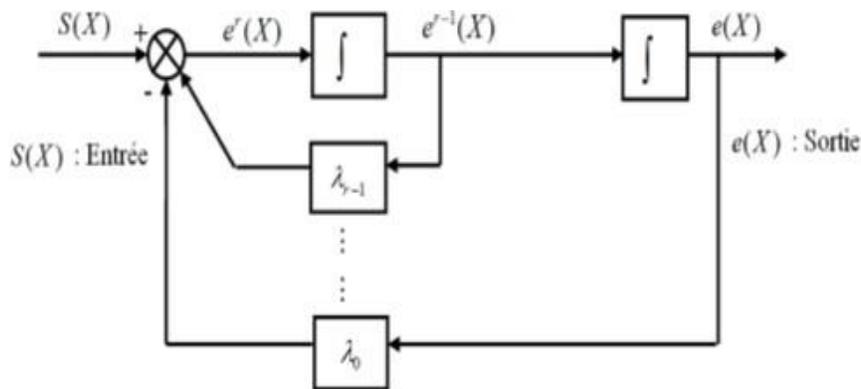


Figure 3.8. linéarisation exacte de l'écart

### ➤ Conditions de convergence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester même face aux perturbations.

Il existe deux considérations correspondantes au mode de convergence de l'état du système que nous citons ci-dessous :

#### **Fonction directe de commutation**

Elle est proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin .Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0$$

### Fonction de Lyapunov

La fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ( $V(x) > 0$ ) pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction ( $\dot{V}(x) < 0$ ).

L'idée est de choisir une fonction scalaire  $S(x)$  de type énergétique qui admet une dérivée temporelle négative.

Nous définissons la fonction de LYAPUNOV comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} S(x)^2 \quad (\text{III -10})$$

La dérivée de cette fonction :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (\text{III -11})$$

Pour que la fonction  $V(x)$  puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée soit négative

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (\text{III -12})$$

Cette équation (IV.10) montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par  $S(x)^2 > 0$ , diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal.

### Calcul de la commande

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre  $u_{\max}$  et  $u_{\min}$  instantanément (fréquence infinie), en fonction du signe de la surface de glissement (figure.4). Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées 'Broutement' ou 'Chattering' apparaissent dans le mode de glissement.

### Définition des grandeurs de commande

La surface de glissement se détermine en fonction du système et des performances désirées, indépendamment de la commande, et l'obtention du régime glissant supposerait la commande discontinue. De ce fait, si cette commande est indispensable, elle n'empêche nullement, au contraire, qu'une partie continue lui soit adjointe pour diminuer l'amplitude de la discontinuité. Par conséquent, la structure d'un contrôleur comporte deux parties ; une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante.

Cette dernière est très importante dans la technique de commande par modes de glissement, car elle est utilisée pour rejeter les perturbations extérieures. Nous posons donc :

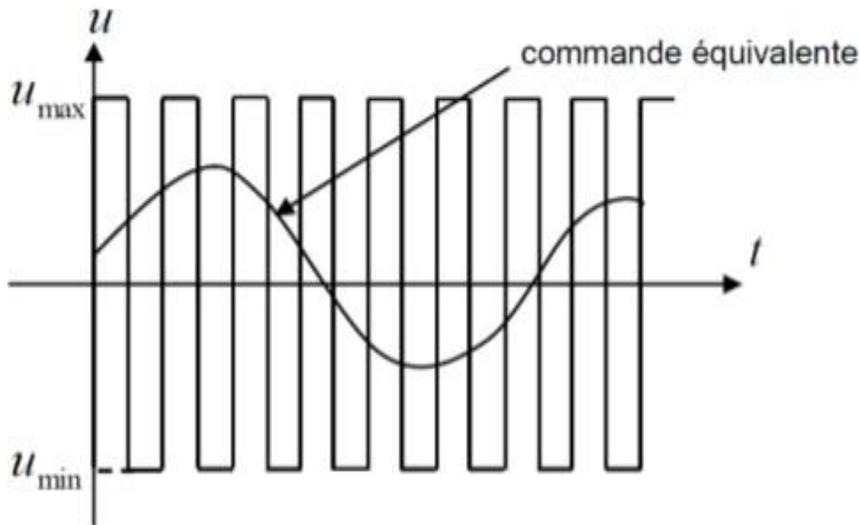
$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N(t) \quad (\text{III -13})$$

$u_{eq}$  Correspond à la commande équivalente proposée par Filipov et Utkin. Elle sert à maintenir l'état sur la surface de glissement ( $V(x) = 0$ ). Elle est calculée en reconnaissant que le comportement du système durant le mode de glissement est décrit par :

$$S(x) = 0$$

$u_N(t)$  est introduite pour satisfaire la condition de convergence  $S(x) \dot{S}(x) < 0$ . Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et elle est donnée par :

$$\dot{S}(x) = u_N(t) \quad (\text{III -14})$$



**Figure 3.9.**Commande équivalente

La commande équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre  $u_{max}$  et  $u_{min}$

### Expression analytique de la commande

Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, t)u(t) \quad (\text{III -15})$$

La commande est composée de deux grandeurs :  $u_{max}$  et  $u_{min}$  soit :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N(t) \quad (\text{III -16})$$

Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \{ f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t) \} + \frac{\partial S}{\partial x} \{ g(x, t)u_N(t) \} \quad (\text{III -17})$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)u_N(t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\}, u_N = 0 \quad (\text{III -18})$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme  $u_{eq}$  par sa valeur tirée de l'équation (IV.15) dans l'équation (IV.14). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{ g(x, t)u_N \} \quad (\text{III -19})$$

Le problème revient à trouver un tel que :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \{ g(x, t)u_N \} < 0 \quad (\text{III -20})$$

### Commande discontinue

La solution la plus simple est de choisir  $u_N$  sous la forme de relais Figure 5. Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit :

$$u_N = K \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (\text{III -21})$$

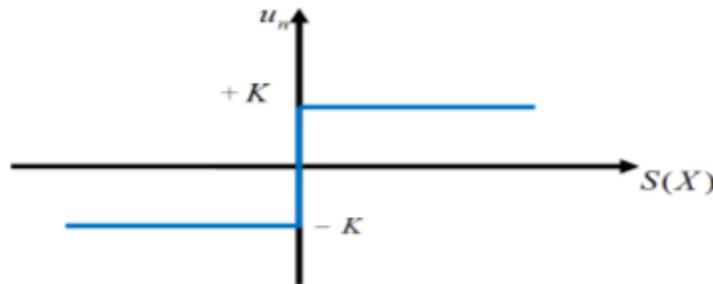


Figure 3.10. La fonction signe

Après le remplacement de l'expression (IV.18) dans (IV.17), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x)\frac{\partial s}{\partial x}g(x, t).K|S(x)| < 0 \quad (\text{III -22})$$

Où le facteur  $\frac{\partial s}{\partial x}g(x, t)$  est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

Le gain K est choisi positif pour satisfaire la condition (IV.19). Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit, le temps de réponse sera très long, et s'il est très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande .

### III.8.2. Phénomène de broutement (Chattering):[21]

En mode de glissement, la commande discontinue commute entre deux valeurs ( $\pm k$ ) à une fréquence théoriquement infinie. Ceci est impossible à réaliser en vue de la présence d'un temps de retard pour le calcul de la commande. Par conséquent, ces oscillations à hautes fréquences se produisent, ce phénomène est dit phénomène de broutement). Dans ce mode, la trajectoire d'état n'évolue plus exactement le long de la surface, mais elle tend à osciller au voisinage de celle-ci. Ceci est néfaste pour le bon fonctionnement du système, et il peut servir en plus d'exciter des dynamiques négligées durant la modélisation .

### III.8.3. Elimination du phénomène de Chattering:[21]

Le phénomène de Chattering est provoqué par une commutation non infiniment rapide de la commande quand les techniques des modes glissants sont utilisées. Ce phénomène est indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de haute fréquence.

Le broutement (phénomène de Chattering) peut être réduit en remplaçant la fonction "signe" par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences .On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation (Figure IV.6) .

- Fonction saturation "sat"

$$\begin{cases} \text{Sat}(S) = 1 & \text{si } s > \mu \\ \text{Sat}(S) = -1 & \text{si } s < -\mu \\ \text{Sat}(S) = \frac{s}{\mu} & \text{si } |s| < \mu \end{cases} \quad (\text{III -23})$$

$\mu$ : Un paramètre petit et positif.

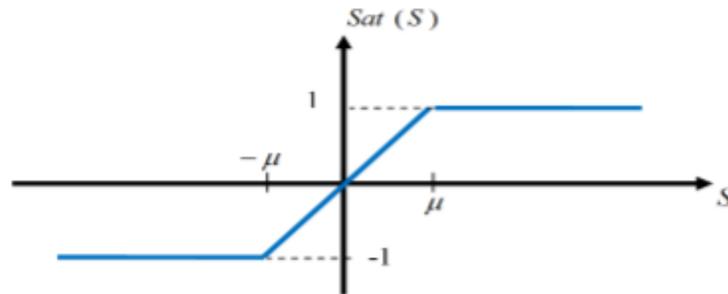


Figure 3.11. La fonction sat

- Fonction smooth

On peut aussi remplacer la fonction 'signe' par des fonctions de commutation douce.

On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction figure IV.7 ; soit :

$$\text{Smooth}(S) = \frac{s}{s + \mu} \quad (\text{III -24})$$

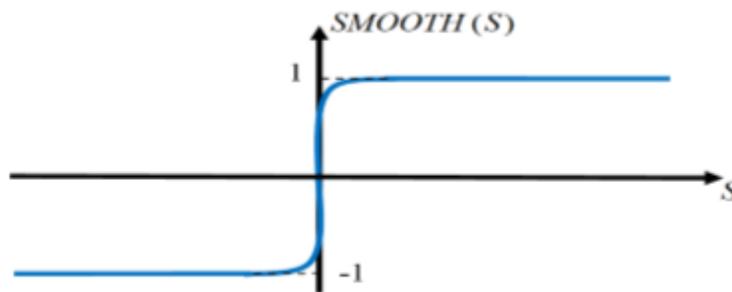


Figure 3.12. La fonction smooth

### III.8.4. Application de la commande par mode de glissement à la GSAP:[23]

Après avoir présenté la théorie de la commande à structure variable (CSV) avec les différentes structures de la commande non linéaire, nous allons analyser dans cette partie l'application de la commande par mode glissant pour l'asservissement de vitesse et de position est basée sur l'application de la commande par mode de glissement afin d'atteindre les objectifs suivants :

- D'assurer la rapidité et la précision de la réponse des grandeurs asservies.
- D'assurer la robustesse du systèmes vis-à-vis des perturbation, des erreurs de modélisations,

des variations des paramètres et des charges mécaniques sur l'arbre du moteur.

- De limiter les amplitudes des tentions et des courants lors des régimes transitoires.

Nous rappelons également les équations d'ordre électrique, ainsi que celles d'ordre mécanique représentant la dynamique de la machine.

$$\begin{cases} \dot{i}_d = \frac{-R_s}{L_d} I_d - \frac{V_d}{L_d} + p\omega \frac{L_q}{L_d} I_d \\ \dot{i}_q = \frac{-R_s}{L_q} I_q - \frac{V_d}{L_q} + p\omega \frac{L_q}{L_d} I_d + \frac{1}{L_q} p\omega \varphi_f \\ J\dot{\omega} = C_e - C_r - \omega f_r \end{cases} \quad (\text{III -24})$$

#### Commande du courant direct $i_d$

Le degré relatif de la surface est égal à un ( $r=1$ ). Puisque la commande réelle  $V_{sd}$  apparaît dans la dérivée première du courant  $I_d$ .

On déduit la surface:

$$S(i_d) = i_{d \text{ ref}} - i_d \quad (\text{III -25})$$

La dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(i_d) = \dot{i}_{d \text{ ref}} + \frac{V_d}{L_d} + \frac{R_s}{L_d} I_d - p\omega \frac{L_q}{L_d} I_q \quad (\text{III -26})$$

Durant le mode glissant et en régime permanent, la surface  $S(i_d)$  devient nulle, de même que sa dérivée, ce qui conduit à l'expression de la commande équivalente :

$$S(i_d)=\dot{S}(i_d) = 0 \Rightarrow \begin{cases} V_{d\text{eq}} = -\dot{i}_{d\text{ref}}L_d - R_s I_d + p\omega L_q I_q \\ V_{dn} = 0 \end{cases} \quad (\text{III} - 27)$$

Où  $V_{d\text{eq}}$  et  $V_{dn}$  sont les deux composantes de la tension de commande  $V_d$ .

La condition  $S(x)\dot{S}(x) < 0$  est satisfaite par le choix suivant :

$$V_{dn} = -K_d \cdot \text{sign}(S(i_d)) \quad (\text{III} - 28)$$

Par conséquent, la commande totale à la sortie du régulateur devient :

$$V_d = V_{d\text{eq}} + V_{dn} \quad (\text{III} - 29)$$

$$\text{Soit: } V_d = -\dot{i}_{d\text{ref}}L_d - R_s I_d + p\omega L_q I_q - K_d \cdot \text{sig} \quad (\text{III} - 30)$$

### Commande de la vitesse

La structure de la commande de la vitesse contient deux boucles en cascade, l'une est extérieure concerne la vitesse  $\omega$  et l'autre est intérieure concerne le courant  $i_q$ .

Commande de la vitesse  $S(\omega)$ :

La surface de glissement pour un degré relatif égal à 1 est donnée par :

$$S(\omega) = \omega_{\text{ref}} + \omega \quad (\text{III} - 31)$$

Durant le régime permanent, la surface  $S(\omega)$  devient nulle ainsi que sa dérivée :

$$\dot{S}(\omega) = 0 \Rightarrow \begin{cases} i_{q\text{eq}} = \frac{2(\omega_f + C_r)}{3p\phi_f} \\ i_{qn} = 0 \end{cases} \quad (\text{III} - 32)$$

La condition  $S(x)\dot{S}(x) < 0$  est vérifiée afin d'assurer la convergence :

$$i_{qn} = -K_\omega \cdot \text{sign}(S(\omega)) \quad (\text{III} - 33)$$

### Commande du courant en quadrature $i_q$

La valeur de  $i_{q\text{ref}}$  à la sortie du régulateur de vitesse est comparée à celle mesurée.

L'erreur résultante sera corrigée par un régulateur fonctionnant en mode de glissement.

L'expression de la surface est donnée par :

$$S(i_q) = i_{q \text{ ref}} - i_q \quad (\text{III} - 34)$$

Sa dérivée est définie par :

$$\dot{S}(i_q) = \dot{i}_{q \text{ ref}} + \frac{V_q}{L_q} + \frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{L_d}{L_q} I_q p\omega - \frac{\varphi_f}{L_q} p\omega \quad (\text{III} - 35)$$

Durant le mode glissant et en régime permanent, la surface  $S(i_d)$  devient nulle, de même que sa dérivée :

$$S(i_q) = \dot{S}(i_q) = 0 \Rightarrow \begin{cases} V_{d \text{ eq}} = -\dot{i}_{q \text{ ref}} L_q - R_s I_q - p\omega L_d I_d + p\omega \varphi_f \\ V_{d \text{ n}} = 0 \end{cases} \quad (\text{III} - 36)$$

La condition  $S(x)\dot{S}(x) < 0$  est vérifiée afin d'assurer la convergence :

$$V_{q \text{ n}} = -K_q \cdot \text{sign}(S(i_q)) \quad (\text{III} - 37)$$

La commande  $V_q$  devient :

$$V_q = -\dot{i}_{q \text{ ref}} L_q - R_s I_q + p\omega L_d I_d + p\omega \varphi_f - K_q \cdot \text{sign}(S(i_q)) \quad (\text{III} - 38)$$

Le modèle complet de la chaîne de conversion éolienne englobe en outre la turbine et son arbre, la GSAP,

**CONCLUSION**

Ce chapitre a permis de présenter les différentes méthodes de commande de la machine synchrone aimant permanent . Afin de mieux comprendre les avantages que peut présenter ces méthodes, nous avons analysé les possibilités qu'elle offrait à la commande de la MSAP. nous avons défini la méthodologie de la conception nécessaire pour cette commande , nous constatons que le choix convenable des surfaces de commutation permet d'obtenir des hautes performances. La commande par mode glissant présente plusieurs atouts tel que, la robustesse, précision importante, la stabilité, la simplicité et un temps de réponse faible.

## **CHAPITRE IV**

*Simulations et résultats  
obtenus*

**IV-1- Introduction:**

Le mode glissant est un type de fonctionnement particulier des systèmes à structure variable. Cette commande est devenue l'une des techniques de contrôle les plus populaires pour une large gamme de classes des systèmes non linéaires et présente un grand intérêt dans des domaines très variés tels que la mécanique, la robotique ou le génie électrique. Elle se distingue par sa simplicité de mise en uvre, une très bonne réponse dynamique, mais surtout par sa robustesse envers les incertitudes internes, traduites par une insensibilité aux variations de paramètres du système à commander, et vis-à-vis des perturbations externes.

Le principe de la commande à modes glissants consiste à ramener la trajectoire d'état à évoluer vers une surface et la faire commuter autour de celle-ci jusqu'au point d'équilibre à l'aide d'éléments de commutation discontinue. La surface considérée, correspondant aux dynamiques souhaitées, est alors désignée comme étant la surface de glissement et la commande garantit que le point représentatif du système atteint l'hyper-surface en un temps fini.

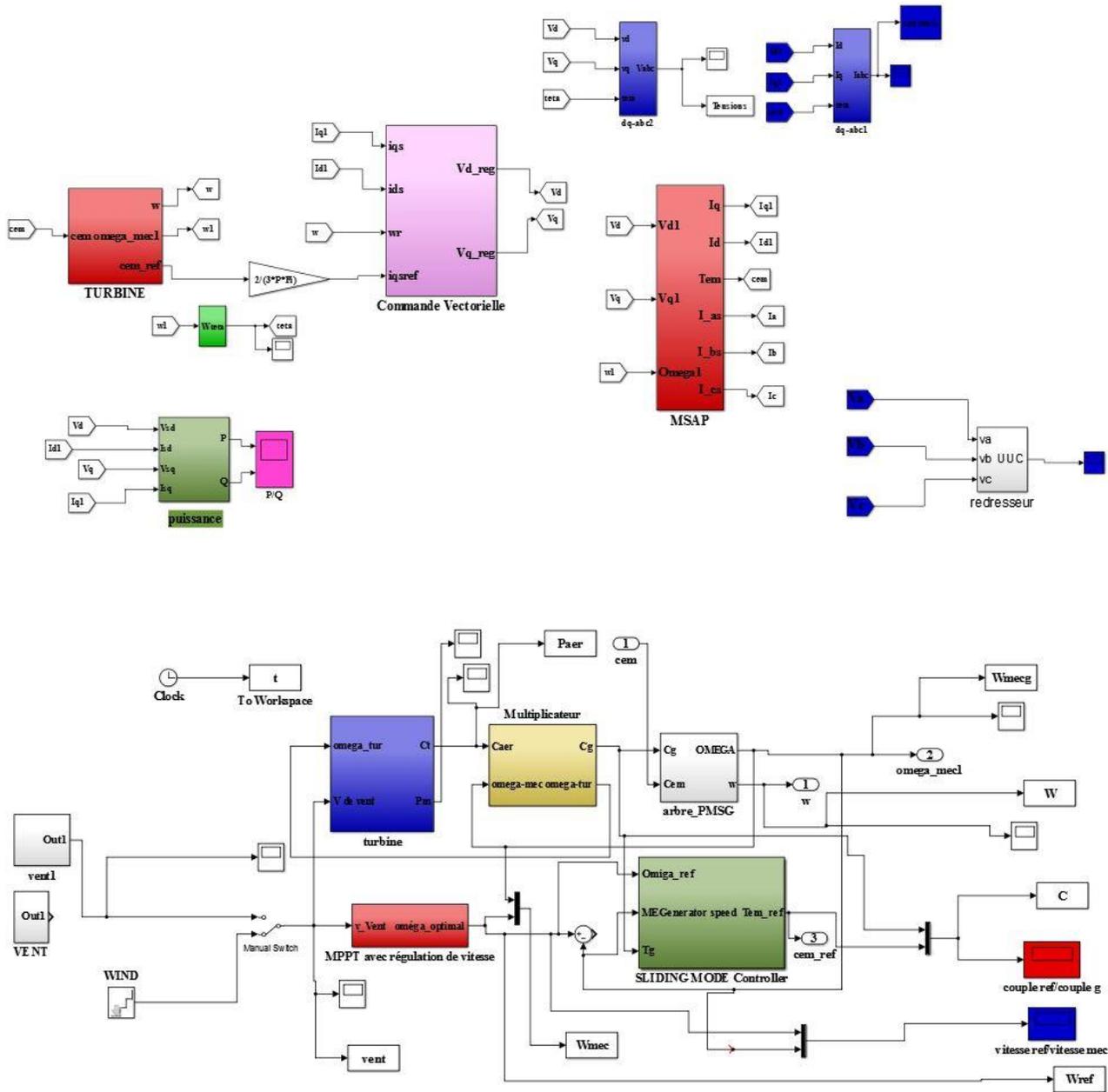
Cependant malgré ses avantages, cette méthode présente un inconvénient majeur connu sous le nom de Broutement (Chattering en anglais). En effet, ce type de commande, de nature discontinue, nécessite des commutations à fréquence infinie, or cette hypothèse est irréalisable en pratique. Ce phénomène indésirable, qui peut exciter des dynamiques de haute fréquence non modélisées, peut nuire au fonctionnement des actionneurs de puissance, et même parfois mener à l'instabilité.

La commande des systèmes à structures variables par le mode de glissement n'est devenue très intéressante et attractive qu'à partir du début des années 80 , elle est considérée comme une des approches les plus simples pour la commande des systèmes ayant un modèle imprécis. Ceci est dû à la bonne connaissance et à l'appréciation de la robustesse, propriété très importante caractérisant cette commande. Ce chapitre présente une simulation du système par mode glissant et les résultats

Obtenus.

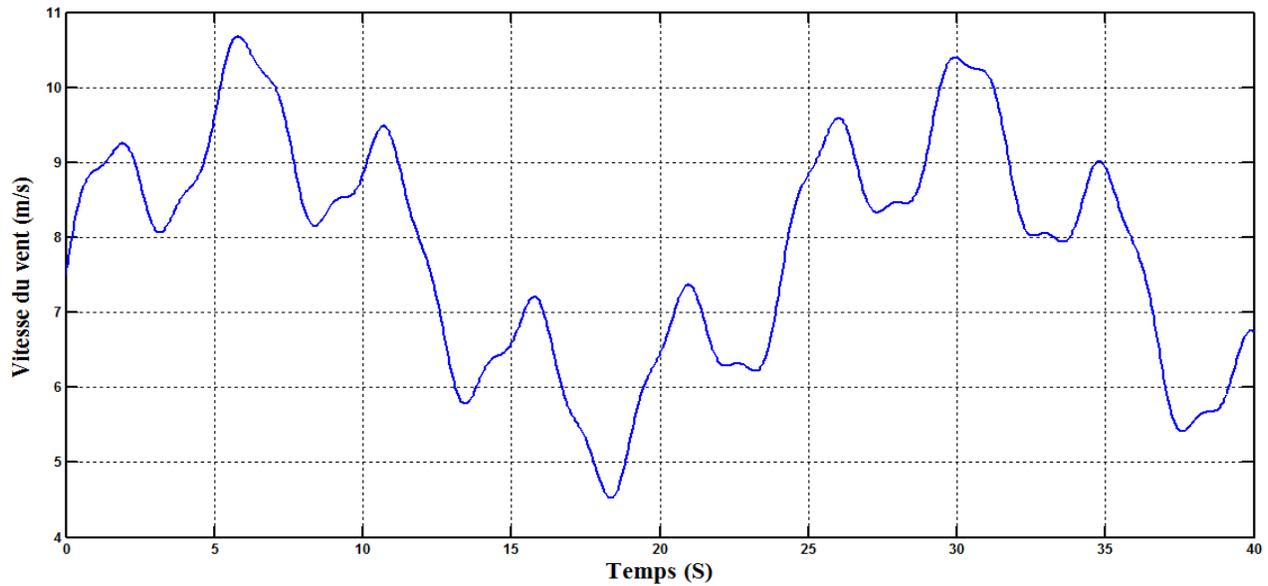
**IV-2-Résultats de simulation avec le mode glissant:**

La figure ci-dessous présente les blocs de simulations pour la commande d'une éolienne a GSAP.



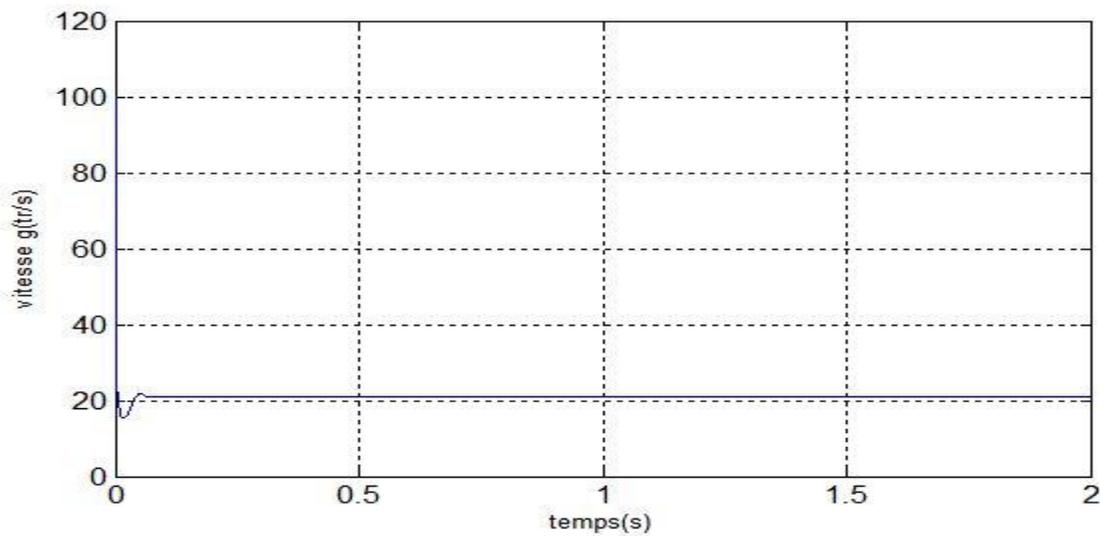
**Figure 4.1.**Bloc de simulation par mode glissant

Pour les résultats de simulation suivants, la turbine éolienne démarre avec une vitesse initiale de vent égale à 7.5m/s



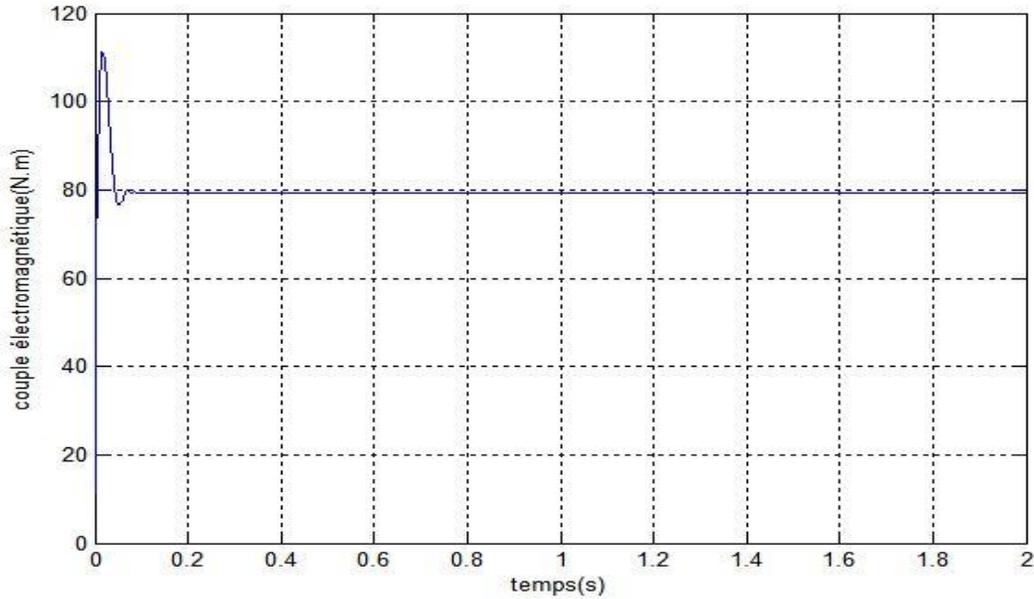
**Figure 4.2.** Profil du vent

**Figure 4.2:** montre le profil du vent considéré pour la simulation des différentes stratégies de commande utilisées



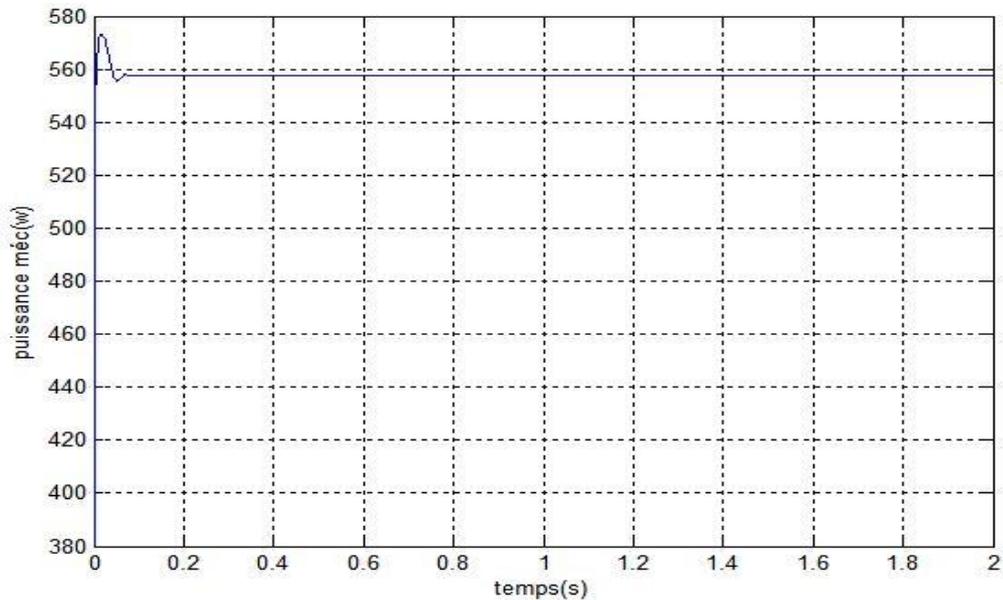
**Figure 4.3.** Vitesse de la Génératrice

**Figure 4.3:** montrent que vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents a bien été stabilisée vers vitesse égale 20 tr/s



**Figure 4.4.** Couple électromagnétique

**Figure 4.4:** illustre la variation du couple électromagnétique produite pour différentes vitesses du vent



**Figure 4.5.** Variation de la puissance produite par la turbine

**Figure 4.5:** montre que la puissance en régime permanent a une bonne adaptation aux variations de la vitesse du vent.

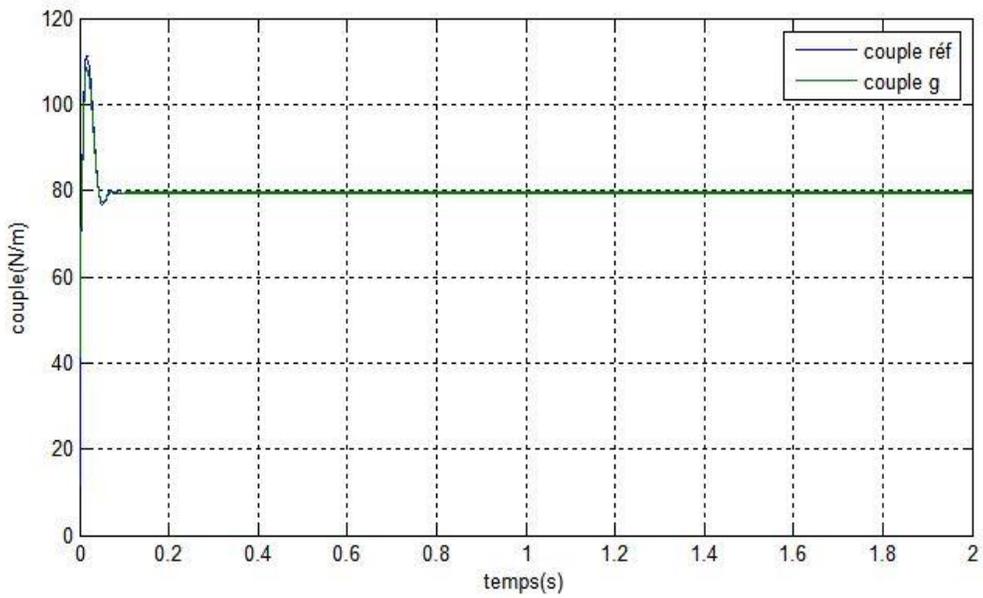


Figure 4.6. Couple de la Génératrice

Figure 4.6: illustre la variation du couple de la génératrice produite pour différentes vitesses du vent

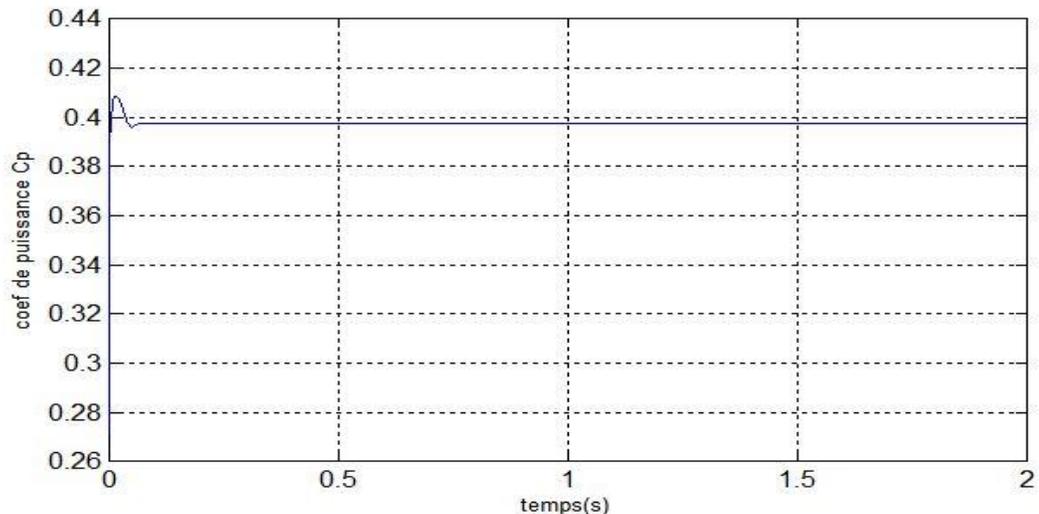


Figure 4.7. Coefficient de puissance (cp)

Figure 4.7: illustre les variations du coefficient de puissance (Cp).

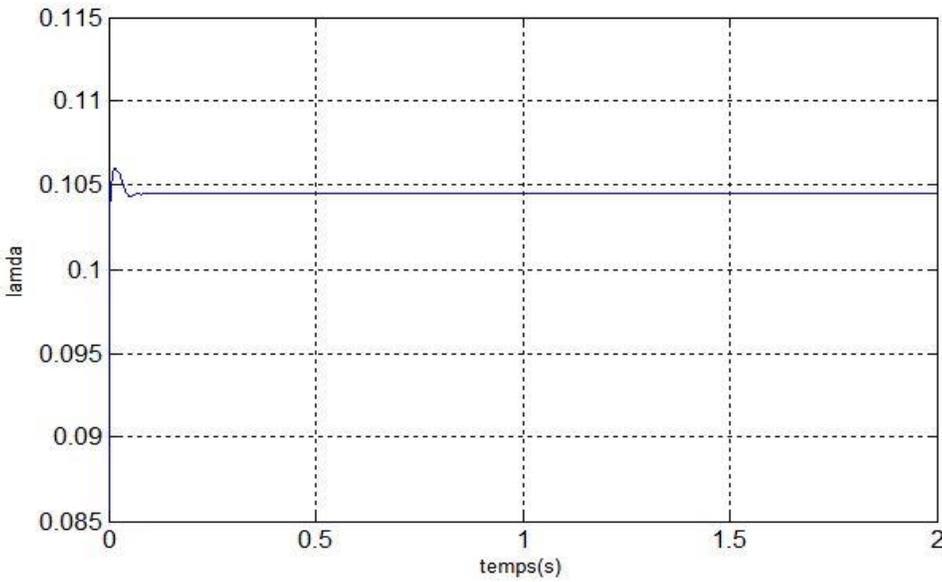


Figure 4.8. Vitesse relative

Figure 4.8: Montre que la vitesse en régime permanent a une bonne adaptation aux variations de la vitesse du vent.

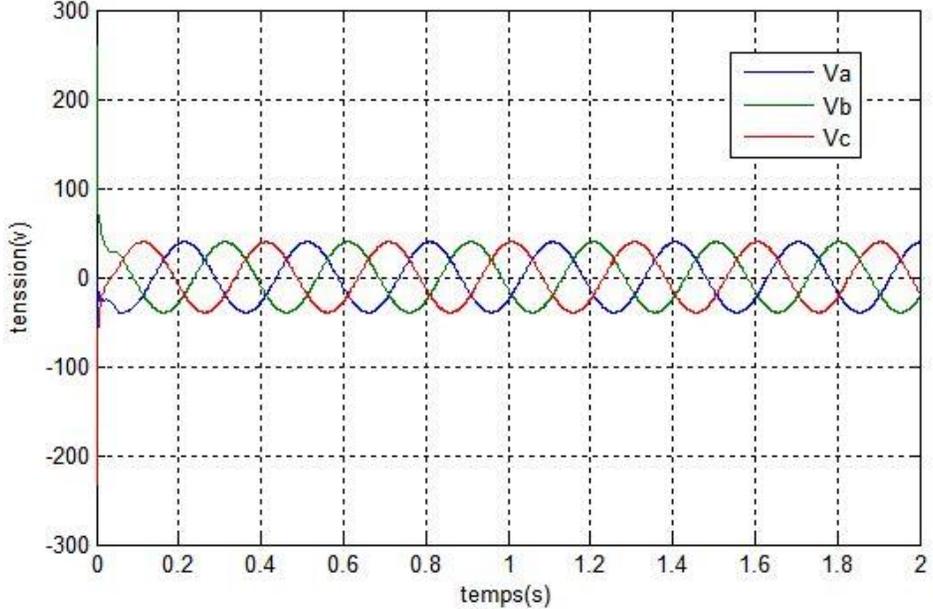


Figure 4.9. Source de tensions  $v_a, v_b$  et  $v_c$

**Conclusion**

Nous avons présenté dans ce chapitre la commande à structure variable fonctionnant en mode de glissement appliquée à la génératrice synchrone à aimants permanents. Des résultats de simulation par mode glissant ont été présentés.

## **CONCLUSION GENERALE**

# CONCLUSION GENERALE

---

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Une comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse variable. a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents MSAP

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Une commande de la turbine, de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent, et la génératrice synchrone à aimants permanents. Nous avons donné des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel avant de donner les équations électriques, magnétiques et mécanique régissant la MSAP.

Dans le chapitre trois a permis de présenter les différentes méthodes de commande de la machine synchrone aimant permanent. et des notions générales sur les systèmes à structures variables et la conception de la commande non linéaire par mode glissant traité dans le plan de phase .

Dans le chapitre quatre nous avons des résultats de simulation par mode glissant.

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [01] : K.Ferkous, *Etude d' une chaine de conversion d' énergie éolienne*, Mémoire de magister, Université Mentouri– Constantine (2009).
- [02] : A. Bouhedda, *Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne*, *Mémoire de magister*, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouazou (2011).
- [03] : M.Yin, G.Li, M. Zhou, C.Zhao, << Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration >>, Power Engineering Society General Meeting, June 2007, pp 1-6.
- [04] : F. Boumaraf, *Commande d'un aérogénérateur-apport des techniques de l'intelligence artificielle*, Thèse de doctorat, Université de Batna (2014)..
- [05] : F. Poitier, << Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne – Machine asynchrone à cage autonome – Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau >>, thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [06] : Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalao, << Computer simulation of wind power systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis >>, International Conference on Power System Transients (IPST 2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009.
- [07] : El Aimani, << Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [08] : Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalao, << Computer simulation of wind power systems: Power Electronics and Transient Stability Analysis >>, International Conference on Power System Transients (IPST 2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009.
- [09] : Boyette, << Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne >>, Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.
- [10] : HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [11] : F. Benchabane, “Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering”, Thèse de Magister, Université de Biskra, 2005.
- [12] : R. Abdessemed, “Modélisation et simulation des machines électriques”, Presse de Université de Batna, 2011.

# BIBLIOGRAPHIE

---

[13]: P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, << Eolienne >>, Techniques de l'Ingénieur, BM 4640.

[14]: S. El Aimani, << Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension >>, Thèse de Doctorat d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.

[15] : Nicolas Laverdure, << Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires >>, Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005.

[16] : H.Abdellaoui, *Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimants permanents par variables électriques*, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri –Tizi-Ouazou.

[17] : Belhadj J, "**Commande directe en couple d'une machine asynchrone- structures d'observation- application aux systèmes multimachines-multiconvertisseurs**". Thèse Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 7 juillet 2001.

[18] : Grellet G, Clerc G, "**Actionneurs Electriques, Principe/ Modèle / Commande**". Eyrolles, Deuxième Edition 2000.

[19] : Takahashi I, Noguchi T, "**Take a look back upon the past decade of direct torque control**". IECON, 23<sup>rd</sup> International Conference on Vol.2, Issue, pp. 546 – 551, Nov 1997.

[20] : Merabet A, "**Commande non linéaire à modèle prédictif pour une machine asynchrone,**" Thèse du doctorat en ingénierie de l'université du Quebec à Chicoutimi, Mai 2007.

[21] : Tamrbed H. et Azarobr T. : Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur, Université de Annaba, 2000.

[22] : Chiasson J. : Modeling and High-Performance Control of Electrical Machines. INC Publication, 2005.

[23] : Mayouf M. : Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université de Biskra, 2008.