

*République Algérienne Démocratique et Populaire*  
*Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique*  
*Université Abderrahmane Mira de Béjaïa*

*FACULTE DE TECHNOLOGIE*

*DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE*



**MÉMOIRE DE MASTER**



**En vue d'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique**

**Option : Energies Renouvelables**

**Thème**

**Optimisation d'un système de pompage  
éolien.**

Présenté par

- HADDAR Fayçal
- HALFAOUI Yuba

Encadré par

- Mme RAHRAH Karima
- Mr TARAFT saci

*Année universitaire : 2022/2023*

## Remerciements

*Tout d'abord, nous remercions dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé, le courage et la patience durant toutes ces années d'étude pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenant particulièrement à exprimer nos plus vifs remerciements et toute notre gratitude à Madame **K. Rahrah** et Monsieur **S. Taraft**, pour avoir dirigé ce travail, pour leurs grandes compétences scientifiques ainsi que pour leurs conseils, leurs remarques toujours constructives.*

*Nous présentons aussi nos sincères remerciements au président du jury et les membres de jury examinateurs d'avoir accepté d'évaluer ce travail.*

*Nous remercions l'ensemble de nos proches (famille et amis) pour le soutien qu'ils nous ont apporté tout au long de nos études.*

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail*

*A ceux qui m'ont soutenu jour et nuit durant tout mon parcours ;*

***A mes très chers parents,***

*Je vous remercie pour tout le soutien que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que  
votre bénédiction m'accompagne toujours*

***A Mes chères frères***

*Souhil et Massi*

***A toutes ma famille***

***Je vous souhaite tout le bonheur du monde et que***

***Dieu vous protège***

*A mon binôme yuba*

***Mes chères amies***

***Ryad, Nassim, Samir, Djamil, Nabil, Samy, Akli***

## Dédicaces

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour réaliser ce modeste travail

Je dédie ce mémoire à :

### *A mes très chers parents*

**Ma mère** qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, pour son sacrifice qu'elle a consenti pour mon instruction et mon bien être depuis ma naissance, durant mon enfance jusqu'à aujourd'hui.

**Mon père** qui m'a aidé à devenir ce que je suis aujourd'hui. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation. Pour son amour et son dévouement, Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.

### *A mon cher frère est ma chère sœur*

Cher **frère**, chère **sœur**, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mon binôme, mes amis, et toute ma famille et à toutes les personnes chères qui nous ont quittées.

## Table de matière

Liste des figures.....	IV
Nomenclature.....	IV
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne.....</b>	<b>3</b>
<b>I.1. Introducton.....</b>	<b>3</b>
<b>I.2 Définition L'énergie éolienne .....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Principaux composants d'une éolienne.....</b>	<b>3</b>
<b>I.4 Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....</b>	<b>5</b>
<b>I.5 Les différents types d'éoliennes .....</b>	<b>5</b>
I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal .....	5
I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal .....	6
<b>I.6 Classification des éoliennes .....</b>	<b>7</b>
<b>I.7 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne .....</b>	<b>8</b>
I.7.1 Eoliennes à vitesse fixe.....	8
I.7.2 Eoliennes à vitesse variable .....	9
<b>I.8 Les avantages de l'énergie éolienne .....</b>	<b>9</b>
<b>I.9 Les inconvénients de l'énergie éolienne .....</b>	<b>10</b>
<b>I.10 Zones de fonctionnement de l'éolienne .....</b>	<b>10</b>
<b>I.11 Machines en courant alternatif (CA).....</b>	<b>11</b>
I.11.1 Les machines synchrones.....	12
I.11.1.1 Les machines synchrones à aimant permanent (MSAP) .....	12
I.11.1.2 Les machines synchrones à rotor bobine .....	12
<b>I.12 Les machines asynchrones .....</b>	<b>13</b>
I.12.1 Machine asynchrone à Rotor bobiné .....	14
I.12.2 Machines asynchrones à cage d'écureuil.....	14
<b>I.13 L'accouplement mécanique .....</b>	<b>15</b>
<b>I.14 Nombre de pâles .....</b>	<b>15</b>
<b>I.15 Description d'un système de pompage .....</b>	<b>16</b>
I.15.1 Le pompage éolien .....	17
<b>I.16 Pompes hydrauliques .....</b>	<b>17</b>
I.16.1 Description d'une pompe.....	17
I.16.2 Caractéristiques générales des pompes.....	17
I.16.2.1 Pompe volumétrique.....	17
I.16.2.2 Pompe centrifuge.....	18
<b>I.17 Conclusion .....</b>	<b>19</b>

<b>Chapitre II : Modélisation de la chaîne étudiée .....</b>	<b>20</b>
<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2. Description du système à étudier .....</b>	<b>20</b>
<b>II.3. Modélisation de la partie mécanique .....</b>	<b>20</b>
II.3.1 Le vent .....	20
II.3.2 La Turbine Eolienne .....	21
II.3.3 L'arbre mécanique .....	24
<b>II.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....</b>	<b>25</b>
II.4.1 Equations électriques.....	25
II.4.2 Equation mécanique .....	27
II.4.3 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park.....	27
II.4.3.1 Equations électriques.....	28
II.4.3.2 Equation mécanique : .....	28
II.4.3.3 Expression du couple électromagnétique .....	29
<b>II.5. Modélisation de convertisseur .....</b>	<b>29</b>
II.5.1 Redresseurs a commandé MLI .....	30
II.5.2 Modèle du bus continue .....	31
II.5.3 Modélisations de l'onduleur .....	32
<b>II.6. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil .....</b>	<b>34</b>
II.6.1 Équations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil .....	35
II.6.1.1 Équations des tensions et des flux .....	35
II.6.1.2 Modèle de Park de la Machine Asynchrone.....	37
<b>II.7. Modélisation de la pompe centrifuge .....</b>	<b>40</b>
<b>II.8. Conclusion.....</b>	<b>41</b>
<b>Chapitre III : Contrôle et optimisation du système étudié .....</b>	<b>42</b>
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>42</b>
<b>III.2 Productions de la puissance maximale de la turbine (MPPT) .....</b>	<b>42</b>
III.2.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse .....	42
<b>III.3 Régulation de tension <math>V_{dc}</math>.....</b>	<b>44</b>
<b>III.4 Contrôle du courant par hystérésis de redresseur .....</b>	<b>44</b>
<b>III.5 Commande MLI de l'onduleur.....</b>	<b>45</b>
<b>III.6 Le principe de la commande vectorielle .....</b>	<b>46</b>
III.6.1 Types de commande vectorielle : .....	47
III.6.1.1 Commande vectorielle directe .....	47
III.6.1.2 Commande vectorielle indirecte .....	48
<b>III.7 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents.....</b>	<b>48</b>
III.7.1 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP .....	48
<b>III.8 Commande vectorielle de moteur asynchrone à cage d'écureuil.....</b>	<b>49</b>
III.8.1 Choix d'orientation du flux [38].....	49

---

III.8.2 Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté .....	52
III.8.3 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique .....	52
III.8.4 Bloc de découplage par retour d'état .....	53
<b>III.9 Filtre pour le réglage de la vitesse .....</b>	<b>54</b>
<b>III.10 Régulation des courants statoriques .....</b>	<b>55</b>
<b>III.11 Simulation et interprétation des résultats .....</b>	<b>57</b>
<b>III.12 Conclusion .....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE : .....</b>	<b>68</b>
<b>Annexe A.....</b>	<b>71</b>

## Liste des figures

Figure I- 1:conversion de l'énergie cinétique du vent .....	3
Figure I- 2:différents composant d'une éolienne. ....	5
Figure I- 3:Eoliennes à axe horizontal .....	6
Figure I- 4: Eolienne à axe vertical .....	7
Figure I- 5: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent. ....	11
Figure I- 6: Machines synchrones à rotor bobiné.....	12
Figure I- 7 : Machine asynchrone .....	13
Figure I- 8: Rotor (à gauche) et stator (à droite) d'une.....	14
Figure I- 9: Rotor bobiné .....	14
Figure I- 10: Rotor a cage d'écureille.....	15
Figure I- 11: Multiplicateur de vitesse .....	15
Figure I- 12:Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation ..	16
Figure I- 13:Pompe centrifuge .....	19
Figure I- 14:Groupe motopompe.....	19
Figure II-1: Structure de la chaine de conversion éolienne étudiée. ....	20
Figure II-2:Schéma bloc de profile de vent .....	21
Figure II-3: caractéristiques $c_p(\lambda, \beta)$ de l'éolienne utilisée .....	24
Figure II-4:Représentations de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	28
Figure II-5:Convertisseur statique MLI.....	30
Figure II-6:Gsap relié à un Redresseur MLI.....	30
Figure II-7: Schéma simple du circuit du bus continu.....	32
Figure II-8: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	33
Figure II-9: Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil .....	36
Figure II-10: Modèle de Park du moteur asynchrone.....	39
Figure III-1: Schéma bloc de MPPT sans asservissement de la vitesse .....	44
Figure III-5: Schéma bloc de la régulation de $V_{dc}$ .....	45
Figure III-3:Principe de contrôle du courant par hystérésis .....	46
Figure III-4: Schéma bloc de commande de générateur éolien .....	46
Figure III-5: Schéma synoptique de la MLI .....	47
Figure III-6: Schéma globale du système de pompage éolien .....	48
Figure III-7: Représentation spatiale de l'orientation du flux rotorique dans une MSAP .....	50
Figure III-8: Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer) .....	51
Figure III-9: Schéma Bloc de découplage par retour d'état.....	55
Figure III-10: Schéma fonctionnel de régulation de vitesse avec filtre.....	55
Figure III-11: Schéma de défluxage .....	56
Figure III-12: Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques .....	58
Figure III-13: Allure utilisée de la vitesse du vent.....	59
Figure III-14: Résultats de simulation de la turbine(A,B,C,D).....	59
Figure III-15: Résultats de simulation de l'génératrice(A,B,C,D,E,F).....	61
Figure I-16 : Résultats de simulation de du groupe motopompe(A,B,C,D,E,F,G,H).....	64

**Nomenclature :****NOTATIONS****I. La turbine :**

$V_{vent}$ : Vitesse du vent (m/s).

$v_0$  : Composante moyenne du vent.

$w_k$ : Pulsation de l'harmonique.

$a_k$ : Amplitude de l'harmonique de l'ordre K.

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

$P_{vent}$  : Puissance du vent (W).

$m$  : Masse d'air traversant la surface en une seconde.

$\rho$ : Masse volumique de l'air (1.225 kg/m<sup>3</sup>).

$R$  : Rayon de la pale (m).

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine

$P_t$  : Puissance de la turbine éolienne (W).

$\lambda$ : Vitesse spécifique.

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

$\nu$  : Est sa vitesse de rotation angulaire.

$C_p$ : Coefficient de puissance.

$C_{p\_max}$ : Coefficient de puissance maximal.

$\lambda_{opt}$ : Vitesse spécifique optimale.

$\beta$ : Angle d'orientation des pales (°).

$C_t$ : Couple de la turbine éolienne (N.m).

$J_t$ : Inertie de la turbine.

**II. La GSAP**

$[v_a v_b v_c]^t$  : Vecteur tension des phases statoriques.

$[i_a i_b i_c]^t$ : Vecteur courant des phases statoriques.

$[\varphi_a \varphi_b \varphi_c]^t$ : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$[R_s]$ : Matrices des résistances statoriques.

$M_{s0}$ : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$[L_{s0}]$ : Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_{ss}]$ : Matrice des inductances statoriques.

$[L_{s1}(\theta)]$ : Inductance propre d'une phase statorique variable selon la position angulaire du rotor par rapport au stator.

$\theta$ : Position angulaire du rotor par rapport au stator ( $^\circ$ ).

$\varphi_f$ : Flux des aimants permanents (Wb).

$J_g$ : Inertie de la génératrice ( $\text{kg.m}^2$ ).

$J$ : Inertie totale ( $\text{kg.m}^2$ ).

$\Omega_g$ : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

$f_g$ : Coefficient de frottement visqueux de la génératrice.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique développé par la génératrice (N.m).

$C_{vis}$ : Couple visqueux.

$V_{sd}, V_{sq}$ : Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

$[V_{dqo}]$ : Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o).

$p(\theta)$ : Matrice de transformation de Park.

$[p(\theta)]^{-1}$ : Matrice de transformation de Park inverse.

$i_{sd}, i_{sq}$ : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$ : Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (wb).

$P_1$ : Nombre de paires de pôles de la GSAP.

$L_d, L_q$ : Inductances direct et quadratique (H).

### III. La MAS

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$ : Tensions des phases statoriques.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ : Tensions des phases rotoriques.

$R_r$ : Résistance rotorique ( $\Omega$ ).

$R_s$ : Résistance statorique ( $\Omega$ ).

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ : Courants de phases statoriques (A).

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ : Courants de phases rotorique(A).

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$ : Flux totaux traversant les bobinages statoriques en weber (w).

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$ : Flux totaux traversant les bobinages rotoriques.

$[V_{sabc}]$ : Matrice des tensions statoriques (V).

$[V_{rabc}]$ : Matrice des tensions rotorique (V).

$[I_{sabc}]$ : Matrice des courants rotorique (A).

$[I_{rabc}]$ : Matrice des courants rotoriques (A).

$[\varphi_{sabc}]$ : Matrice des flux statorique.

$[\varphi_{rabc}]$ : Matrice des flux rotoriques.

$[R_s]$ : Matrice des résistances statorique.

$[R_r]$ : Matrice des résistances rotorique.

$[L_s]$ : Matrice d'inductances statorique.

$[L_r]$ : Matrice d'inductances rotorique.

$[M_{sr}]$ : Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

$[M_{sr}]$ : représente la valeur maximale des inductances mutuelles entres phases statoriques et rotorique.

$\omega$ : Vitesse mécanique [rad /s].

$\omega_s, \omega_r$ : Vitesse statorique et rotorique [rad /s].

$V_{sd}, V_{sq}$ : Tension statorique direct et quadratique.

$I_{sd}, I_{sq}$ : Courant statorique direct et quadratique.

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$ : Flux rotorique direct et quadratique.

$I_{rd}, I_{rq}$ : Courant statorique direct et quadratique.

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$ : Flux rotorique direct et quadratique.

$L_s, L_r$ : Inductance cyclique statorique et rotorique.

$I_s, I_r$ : Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique.

$M$ : Inductance cyclique mutuelle (H).

$M_{sr}$ : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

$\varphi_{mq}, \varphi_{md}$ : flux magnétisant selon l'axe d et q.

$\omega_s, \omega_r$ : Vitesse statorique et rotorique [rad /s].

$T_r$ : Constante de temps rotorique (s).

$T_s$ : Constante de temps statorique (s).

$\sigma$ : Le coefficient de la fuite totale.

## IV. Convertisseurs

### IV.1 Redresseur

$V_1, V_2, V_3$ : Tension de référence (V).

$i_{red}$ : Courant redressé (A).

$i_a, i_b, i_c$ : Courants à l'entrée de redresseur (A).

$S_1 S_2 S_3$ : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

$i_{ca}$ : Courant de la capacité (A).

$i_{ond}$ : Courant de l'onduleur (A).

C: Capacité (F).

### IV.2 Onduleur

$V_{an0}, V_{bn0}, V_{cn0}$ : Tensions à la sortie de l'onduleur (V).

$V_{an}, V_{bn}, V_{cn}$ : Tensions de phase de la charge (V).

$s_a, s_b, s_c$ : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

$F_p, F_{ref}, m$ : Fréquences de la porteuse et de la référence et indice de modulation.

$V_p, V_{ref}, r$ : Amplitude de tension de la porteuse, amplitude de tension de référence, et

Coefficient de réglage de tension respectivement.

## **V. Pompe**

$p_{mec}$  : Puissance mécanique (W).

$K_r$  : Coefficient de proportionnalité.

$C_r$ : Couple résistant (N.m).

$P_h$ : Puissance hydraulique (W).

$\sigma$ : Masse volumique d'eau (1000kg/m<sup>3</sup>).

$H$  : Hauteur manométrique (m)

$Q$ : Débit volumique (m<sup>3</sup>/s)  $g$  : Accélération de la pesanteur (9.81m/s<sup>2</sup>)

$\Omega$  : Vitesse du moteur qui entraîne la pompe (rad/s)

## **VI. Régulateurs**

$K_p$  : Gain proportionnel.

$K_i$  : Gain intégral.

## **Abréviations**

MLI : Modulation de la largeur d'impulsion.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

PI : Proportionnel intégrale.

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents.

GAS : Génératrice asynchrone.

GADA : Génératrice asynchrone à double alimentation.

AC : Courant alternatif.

DC : Courant continu (Direct curent).

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor.

GTO: Gate turn-off thyristor.

## **Introduction générale**

La consommation d'énergie dans le monde est en constante augmentation en raison de la croissance démographique, du développement économique et de l'urbanisation. Les principales sources d'énergie utilisées à l'échelle mondiale sont des ressources limitées et épuisables telles que les combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) et l'énergie nucléaire, qui représentent une grande part de la consommation énergétique mondiale.

Ces sources d'énergie non renouvelables sont limitées dans leur disponibilité et leur utilisation entraînent des conséquences environnementales significatives. Elles sont également sujettes aux fluctuations des prix et à la dépendance vis-à-vis des pays producteurs. C'est pourquoi il est essentiel de développer et d'utiliser davantage les sources d'énergie renouvelables afin de garantir un avenir énergétique durable et moins dépendant des ressources finies.

Face aux défis du changement climatique et de la durabilité, il existe une prise de conscience croissante de la nécessité de promouvoir l'efficacité énergétique, de diversifier les sources d'énergie et de favoriser les énergies renouvelables. Des efforts sont déployés à l'échelle mondiale pour encourager la transition vers des systèmes énergétiques plus propres et plus durables, afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de préserver l'environnement.

Dans ce contexte, l'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité connaît une expansion considérable à l'échelle mondiale. Cette croissance est largement due à la baisse des coûts de l'énergie éolienne. Grâce aux progrès technologiques, à l'optimisation des processus de fabrication et à l'augmentation de la taille des éoliennes, les coûts de développement, d'installation et de maintenance ont considérablement diminué. Ainsi, l'énergie éolienne est devenue de plus en plus compétitive par rapport aux sources d'énergie conventionnelles, même sans subventions ou incitations financières. Parallèlement, de nombreux pays ont mis en place des politiques de soutien, telles que des tarifs d'achat garanti, des mécanismes d'enchères et des incitations fiscales, pour encourager l'investissement dans l'énergie éolienne et accélérer son déploiement. Ces mesures ont stimulé les investissements et favorisé la construction de nouveaux parcs éoliens à travers le monde. En conséquence, l'énergie éolienne est devenue une source d'énergie de plus en plus importante, contribuant à la diversification du mix énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

L'étude actuelle se concentre sur l'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'énergie mécanique destinée au pompage de l'eau. Cette méthode est particulièrement appropriée pour répondre aux besoins en eau des sites isolés, notamment dans quelques zones ventées situées en hauteur, où le pompage est nécessaire pour l'agriculture, la consommation domestique et autres besoins similaires.

Le premier chapitre de ce mémoire explore le domaine de l'énergie éolienne dans son ensemble. Il examine les différentes facettes de l'éolienne, notamment ses divers types et son mode de fonctionnement. De plus, il présente les machines utilisées dans ce contexte, ainsi que quelques notions relatives au système de pompage éolien.

Le deuxième chapitre se concentrera principalement sur la modélisation, ce qui implique l'élaboration d'un ensemble d'équations décrivant tous les composants du système étudié. Pour accomplir cela, il est important d'avoir une connaissance des critères d'entrée tels que les données métrologiques spécifiques au site étudié.

Le troisième chapitre traite la commande vectorielle appliquée à la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi qu'à la machine asynchrone. En outre, il aborde également la technique MPPT (Maximum Power Point Tracking) appliquée à la turbine pour maximiser la production de puissance. Enfin, les résultats de la simulation de notre système étudié seront présentés.

Notre étude se clôturera par une conclusion générale qui résumera les axes de notre travail.

---

Chapitre I : Généralités sur l'énergie  
éolienne

---

## I.1 Introduction

L'énergie éolienne est une forme d'énergies renouvelables qui utilise la force du vent pour produire de l'énergie électrique ou mécanique. Depuis des siècles, les humains ont utilisé le vent comme source d'énergie pour alimenter leurs activités. Aujourd'hui, les éoliennes sont des structures efficaces qui jouent un rôle clé dans la production d'énergie renouvelable est aussi dans le développement en termes de puissance d'installation dans le monde.

Dans ce chapitre on s'intéresse à l'énergie éolienne en générale, on parle de l'éolienne des différents types de celle-ci et de son fonctionnement, on citera aussi les machines utilisées, et quelques notions sur le système de pompage éolien.

## I.2 Définition L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est générée par la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique utilisable. Les éoliennes, également appelées turbines éoliennes, sont généralement composées de grandes pales attachées à un rotor, qui tourne lorsque le vent souffle. Le mouvement rotatif du rotor fait tourner un générateur, produisant ainsi de l'électricité. (Figure I.1)

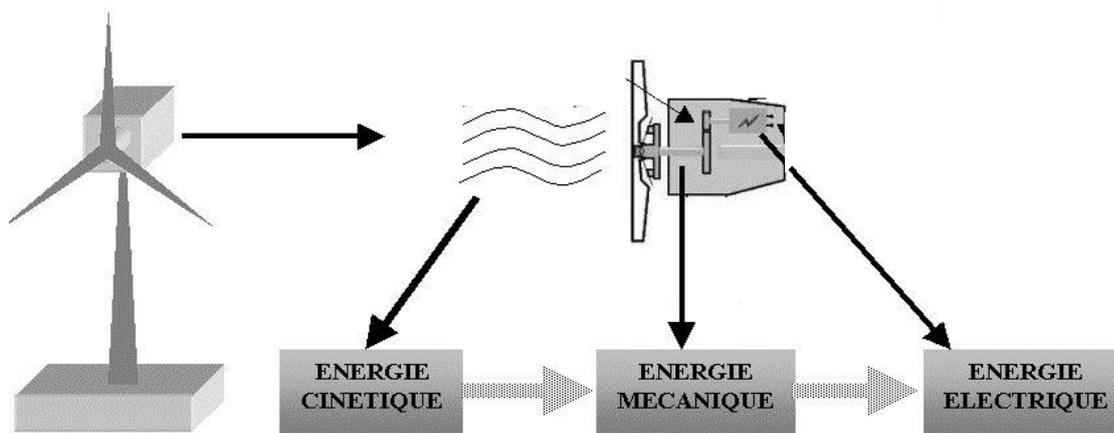


Figure I- 1: Conversion de l'énergie cinétique du vent [1]

## I.3 Principaux composants d'une éolienne [2]

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

- **Les pâles** : Sont les capteurs de l'énergie cinétique transmettant l'énergie au rotor ;
- **L'arbre primaire (ou arbre lent)** : Sert à relier les pales au multiplicateur ;

- **Moyeu** : Est le point de liaison entre les pales et l'arbre lent de la machine ;
- **Le multiplicateur** : C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.il permet la réduction du couple et l'augmentation de la vitesse ;
- **L'arbre secondaire** : Equipé d'un frein à disque mécanique limitant la vitesse de l'arbre en cas de vents violents, il amène l'énergie mécanique à la génératrice ;
- **Le générateur électrique** : Il assure la production électrique. Celui-ci peut-être une dynamo ou un alternateur, L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement, Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5 MW ;
- **Le mât** : Pilier de toute l'infrastructure, c'est un tube en acier, d'une hauteur importante plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente Cependant, le coût de la structure augmente ;
- **Le système d'orientation de la nacelle** : Il s'agit d'une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet de diriger l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent à l'aide d'un système de freinage ;
- **Le système de refroidissement** : Il peut s'agir d'un système de refroidissement à air, à eau ou à huile, conçu pour le multiplicateur et la génératrice ;
- **Les outils de mesure du vent** : L'anémomètres pour la vitesse est la girouette pour la direction. Les données sont transmises à l'informatique de commande ;
- **Le système de contrôle électronique** : Il assure la gestion globale du fonctionnement de l'éolienne, y compris son mécanisme d'orientation.

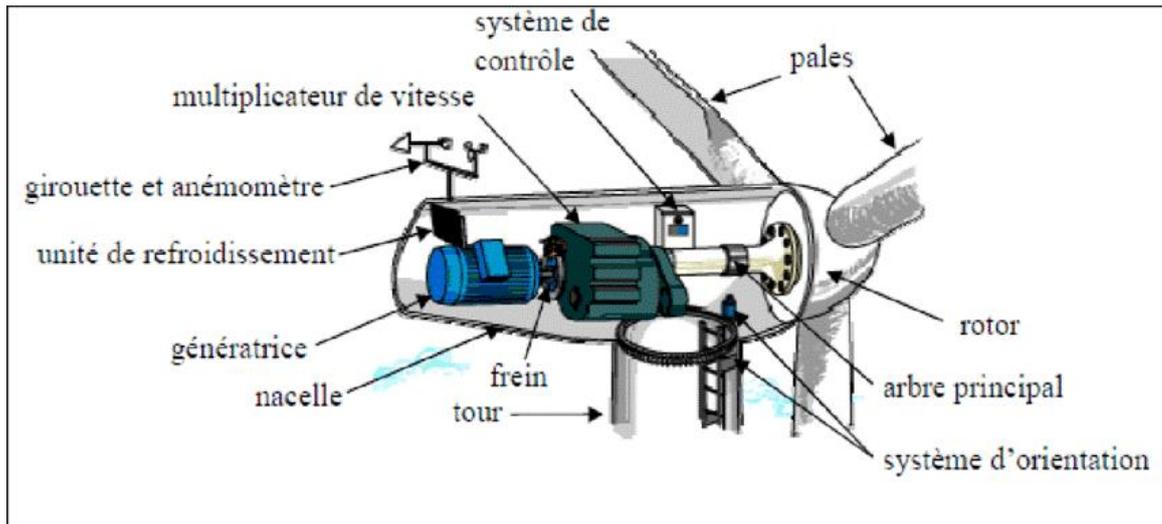


Figure I- 2: Différents composant d'une éolienne.[3]

#### I.4 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Le processus d'une éolienne se déroule en deux étapes distinctes :

- Au niveau de la turbine, le rotor extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible et la transforme en énergie mécanique grâce à l'utilisation de profils aérodynamiques. L'écoulement d'air autour de ces profils génère une force de poussée qui fait tourner le rotor, mais aussi une force de traînée qui agit comme une force parasite.
- Au niveau du générateur, l'énergie mécanique est reçue et convertie en énergie électrique. Cette énergie électrique est ensuite transmise au réseau électrique. [4]

#### I.5 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : Celles à axe vertical et celles à axe horizontal :

##### I.5.1 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine) sont les plus employées, nécessitant très souvent un mécanisme d'orientation des pâles, elles présentent un rendement plus élevé, démarrent à faible vitesse et occupent une faible emprise au niveau du sol.



Figure I- 3:Éoliennes à axe horizontal [5]

➤ **Avantages**

- Rendement élevé ;
- Moins de contraintes mécaniques ;
- Grande efficacité ;
- Munies d'un système d'orientation en fonction du vent, et mieux adaptées au secteur rural.

➤ **Inconvénients**

- Elles génèrent des vibrations conduisant à des bruits conséquents ;
- Elles sont plus complexes par rapport aux éoliennes à axe verticale ;
- Coût de construction qui est très élevé ;
- Le positionnement de l'appareillage en haut de la tour rend les interventions plus difficiles.

### **I.5.2 Les éoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical, raccourcies en (VAWT : Vertical Axis Wind Turbine), Ce type d'éolienne n'as pas besoin d'un système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent, permettant de mettre le multiplicateur et la génératrice au niveau du sol, cependant cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol empêchant le développement de grandes puissances. Cette catégorie d'éoliennes à un rendement faible qui reste en dessous de

50% de la limite de Betz. De plus, certaines structures de ces éoliennes nécessitent un moteur électrique pour leur entraînement lors du démarrage.



Figure I- 4: Eolienne à axe vertical [6]

#### ➤ **Avantages**

- Fonctionne indépendamment de la direction du vent ;
- Le générateur, la boîte de vitesses et les autres composants sont placés au sol ;
- Installation plus facile en comparaison avec les autres éoliennes et un faible coût de maintenance ;
- Facilité du transport d'un endroit à l'autre ;
- Elles peuvent être installés dans les zones urbaines ;
- Adaptés aux zones avec des conditions climatiques sont extrêmes ;

#### ➤ **Inconvénients**

- Efficacité est faible avec un rendement assez médiocre ;
- Besoin d'un moteur pour le démarrage ;
- Occupation d'une surface plus importante au niveau du sol ;
- Elles peuvent engendrer des nuisances sonores.

## **I.6 Classification des éoliennes**

Les éoliennes se divisent en quatre catégories selon leur puissance nominale :

- Micros éoliens : de 100 W à 1 kW ;
- Petites éoliennes : de 1 kW à 36 kW ;
- Moyennes éoliennes : 36 kW et 350 kW ;
- Grandes éoliennes : 350 kW à 5 MW.

## **I.7 Modes d'exploitation de l'énergie éolienne**

Les éoliennes peuvent être classées selon leurs vitesses en deux parties : celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

### **I.7.1 Eoliennes à vitesse fixe**

Premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage [7].

Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixe tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante [8].

#### **A) Avantages**

- Système électrique simple ;
- Faible cout de construction et maintenance ;
- Grande fiabilité et non nécessité de système électrique de commande.

#### **B) Inconvénients**

- Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée ;
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

### I.7.2 Eoliennes à vitesse variable

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne  $P(\Omega)$  [9]

#### Avantages

- Une meilleure extraction de l'énergie du vent ;
- Augmentation du rendement énergétique ;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance ;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient [10].

### I.8 Les avantages de l'énergie éolienne

- L'énergie éolienne est une énergie propre, écologique, économique et fiable, c'est une énergie qui respecte l'environnement ;
- L'énergie éolienne peut proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle contribue à la réductions des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable est inépuisable et surtout gratuite ;
- L'énergie éolienne est la source de production d'électricité connaissant la plus forte croissance parmi toutes les sources disponibles ;
- L'énergie éolienne est une énergie sans risque ;
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ;
- Les éoliennes modernes ont une durée de vie de 20 à 25 ans, ce qui est similaire à celle de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles ;

- L'énergie éolienne est largement reconnue comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus économiques. Son coût est en constante diminution grâce aux avancées technologiques, à l'augmentation de la production et à l'utilisation de turbines de taille plus importante.

## **I.9 Les inconvénients de l'énergie éolienne**

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

- Les bruits conséquents, cependant Les éoliennes modernes produisent peu de bruit grâce aux progrès technologiques, même à proximité, et le bruit du vent masque leur propre émission à des vitesses élevées ;
- Les éoliennes peuvent représenter un danger mortel pour la migration des oiseaux en leur faisant obstacle ;
- La variabilité de la puissance éolienne en raison de la nature stochastique de la source d'énergie éolienne pose des défis en termes de qualité de la puissance produite et impose des contraintes croissantes aux gestionnaires du réseau électrique ;
- Les systèmes éoliens ont généralement un coût d'achat plus élevé que les systèmes utilisant des sources d'énergie conventionnelles, Cependant, à long terme, ils se révèlent être une source d'énergie économique et nécessitent peu d'entretien ;
- L'impact visuel.

## **I.10 Zones de fonctionnement de l'éolienne**

La courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [11]

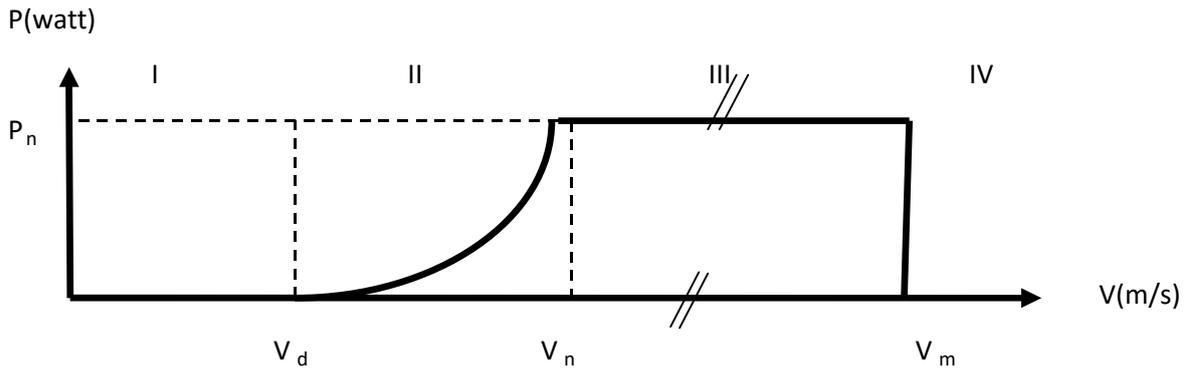


Figure I- 5: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

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

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

$V_m$  : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales.  $V_m$  vaut 25m/s.

- **Zone I :  $V < V_d$**  : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible ;
- **Zone II :  $V_d < V < V_n$**  : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle ;
- **Zone III :  $V_n < V < V_m$**  : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine ( $P_n$ ). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge ;
- **Zone IV** : Dans laquelle le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.

### I.11 Machines à courant alternatif (CA)

Sont des dispositifs électromécaniques conçu pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant alternatif, permettant ainsi de l'utiliser dans diverses applications électriques. Ils fonctionnent sur le principe de l'induction électromagnétique, où

un champ magnétique variable est créé à l'aide d'un rotor en rotation à l'intérieur d'un stator fixe, ce se divisent en deux catégories.

### **I.11.1 Les machines synchrones**

La machine synchrone utilisée en tant que générateur synchrone ou alternateur synchrone est un système électrique permet de convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique sous forme de courant alternatif.

#### **I.11.1.1 Les machines synchrones à aimant permanent (MSAP)**

Ce sont des variantes de la machine synchrone, la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est une machine électrique qui se compose d'un stator comportant un bobinage qui est alimenté en triphasé et produit un champ magnétique tournant à la fréquence d'alimentation et d'un rotor où le champ magnétique est produit par des aimants permanents, est celle-ci, a pour avantage son rendement et sa simplicité de la rendre mieux appliqué pour l'éolienne isolée et autonome. Couplée directement à la turbine (sans multiplicateur) avec un coût élevé d'aimant permanent.

#### **I.11.1.2 Les machines synchrones à rotor bobine**

Les machines synchrones à rotor bobiné sont des machines électriques tournantes qui ont un rotor constitué d'un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire de bagues collectrices et de balais, L'excitation de ces bobines sert à régler la puissance en plus du courant induit, et créé un champ magnétique dans le rotor, Le stator est la partie fixe de la machine.

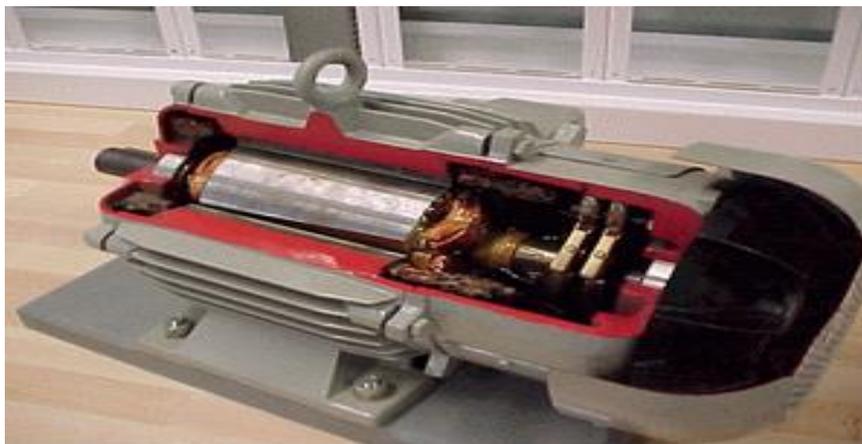


Figure I- 6: Machines synchrones à rotor bobiné [12]

## I.12 Les machines asynchrones

Une machine asynchrone, également appelée moteur à induction, elle fonctionne grâce à l'interaction entre un champ magnétique tournant créé par le stator (partie fixe du moteur) et un rotor en cuivre ou en aluminium. Lorsqu'un courant alternatif est appliqué au stator, un champ magnétique tournant est produit. Ce champ magnétique induit des courants dans le rotor, créant ainsi un autre champ magnétique. Les deux champs magnétiques interagissent, ce qui fait tourner le rotor.

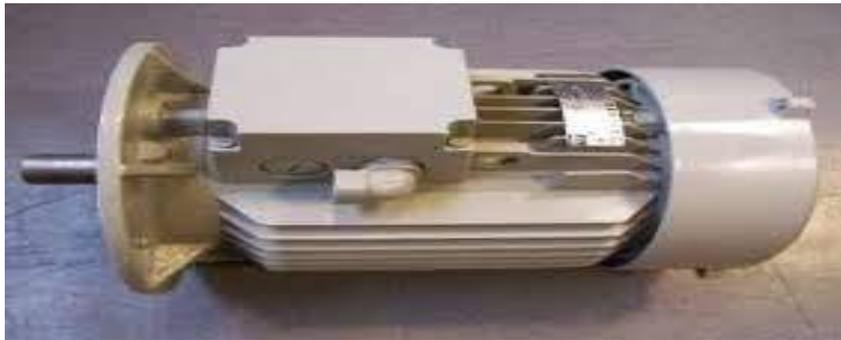


Figure I- 7 : Machine asynchrone [13]

La machine asynchrone est constituée de deux éléments principaux :

**Le stator :** Le rotor est constitué de trois enroulements (bobines) traversés par des courants alternatifs triphasés. Il comporte également  $p$  paires de pôles, correspondant au nombre de bobinages triphasés présents dans le stator ;

**Le rotor :** Partie tournante du moteur, il se compose d'un cylindre fabriqué à partir de tôles ferromagnétiques perforées sur leur périphérie extérieure pour créer des encoches destinées à recevoir les conducteurs.

Il existe deux types de rotor : rotor bobiné et rotor à cage d'écureuil.



Figure I- 8: Rotor (à gauche) et stator (à droite) d'une Machine asynchrone 0,75 kW [14]

### I.12.1 Machine asynchrone à Rotor bobiné

Le rotor de la machine est composé d'une bobine enroulée à l'intérieur d'un circuit magnétique composé de disques en tôle empilés sur l'arbre. Il s'agit généralement d'un enroulement triphasé avec un couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine ce qui permet de minimiser les variations de réluctance liées à la position angulaire entre rotor et stator et certaines pertes dues aux harmoniques. Les extrémités des enroulements rotoriques sont connectées à des bagues collectrices montées sur l'arbre du rotor, sur lesquelles des balais en carbone sont en contact. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique (résistances, électronique de puissance...) ce qui permet de régler les caractéristiques couple/vitesse.



Figure I- 9: Rotor bobiné [15]

### I.12.2 Machines asynchrones à cage d'écureuil

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques (anneaux de court-circuit), le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, elles sont parallèles à

l'axe est court-circuitées aux extrémités de la machine à l'aide des anneaux conducteurs à faible résistance.

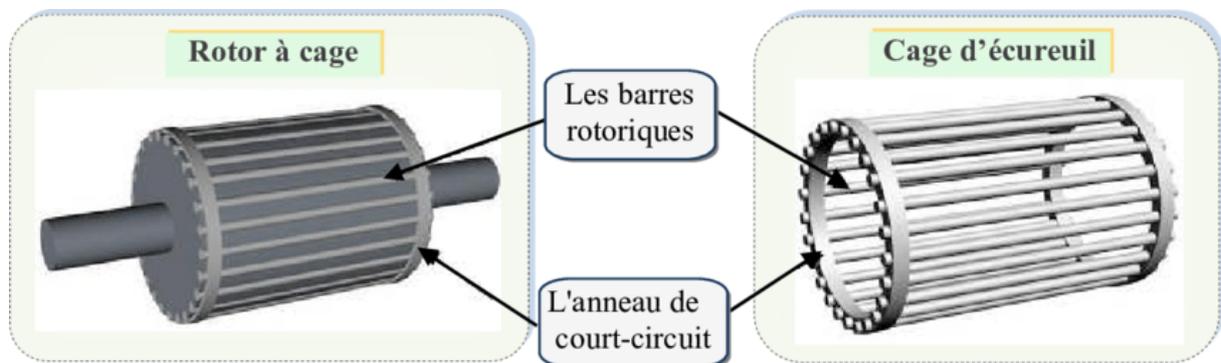


Figure I- 10: Rotor a cage d'écureille [16]

### I.13 L'accouplement mécanique

Le multiplicateur de vitesse, également appelé boîte de vitesses, est un composant clé du système de transmission qui permet d'augmenter la vitesse de rotation du rotor afin de générer une plus grande quantité d'électricité. Son rôle principal est de transmettre la puissance mécanique du rotor, qui tourne à une vitesse relativement basse avec un couple élevé, à la génératrice qui nécessite une vitesse de rotation plus élevée avec un couple moins élevé pour produire de l'électricité.



Figure I- 11: Multiplicateur de vitesse [17]

### I.14 Nombre de pâles

Le nombre de Betz, également appelé limite de Betz, est une limite théorique qui représente le rendement maximal théorique qu'une éolienne idéale peut atteindre qui est égale

à 59,3% (ou environ 0,593). En général, le nombre de pâles d'une éolienne n'affecte pas directement son rendement, le rendement d'une éolienne dépend principalement de facteurs tels que la vitesse spécifique, la surface balayée par les pâles et l'efficacité de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Donc une éolienne avec de très grande pâles est une vitesse de rotation très élevés peut avoir un rendement proche de 59%, Il est plus facile d'avoir une éolienne bipale ou tripale pour des contraintes technologiques est de prix mais aussi pour des raisons aérodynamiques. L'augmentation du nombre de pâles aura pour effet la baisse de la vitesse de rotation est cela par perturbation aérodynamique, est une facturation inutile du prix avec une complexité en plus.

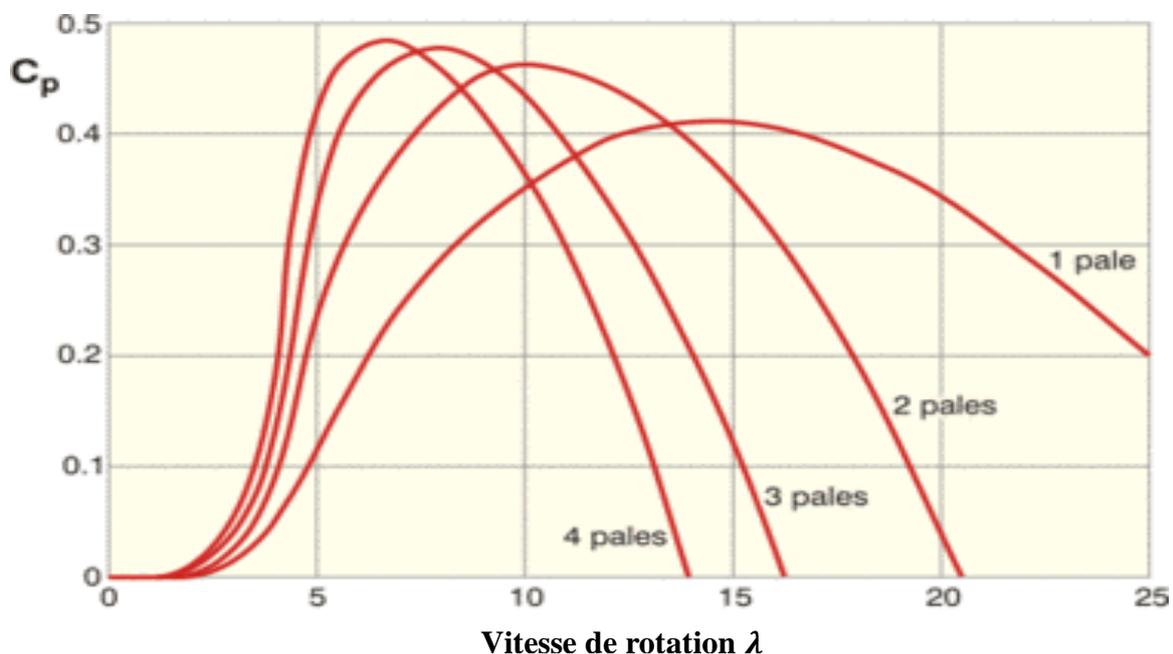


Figure I- 12: Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation [18]

### I.15 Description d'un système de pompage

Un système de pompage est un ensemble d'équipements et de composants conçus pour transférer un fluide d'un endroit à un autre en utilisant la force mécanique. Il est largement utilisé dans de nombreux domaines, tels que l'approvisionnement en eau, Notre système étudié est principalement constitué

- D'une éolien ;
- De convertisseurs statiques ;
- D'un groupe motopompe qui comprend un moteur asynchrone et une pompe.

### I.15.1 Le pompage éolien

Le pompage éolien est un système qui utilise l'énergie éolienne pour alimenter une pompe afin de puiser de l'eau d'un puits ou d'une réserve souterraine. C'est une méthode alternative de pompage qui peut être utilisée dans les régions où l'accès à l'électricité est limité ou coûteux. On compte deux types de pompage

- Pompage mécanique ;
- Pompage électrique.

## I.16 Pompes hydrauliques

### I.16.1 Description d'une pompe

Une pompe est un mécanisme en rotation qui permet le transfert d'énergie entre son arbre interne et le fluide en déplacement, en surpassant l'effet gravitationnelle. Ce processus entraîne une augmentation de l'énergie du fluide en convertissant l'énergie mécanique fournie par l'arbre de la pompe.

### I.16.2 Caractéristiques générales des pompes

Les caractéristiques des pompes sont [19] :

- **Le débit fourni (Q)** par une pompe est le volume d'eau qu'elle refoule par unité de temps. Il s'exprime en litres par minute (l/min) ou, en mètres cubes par heure (m<sup>3</sup> /h) ;
- **La hauteur manométrique (H)** qui tient compte des pertes de charge du circuit hydraulique ainsi que la différence entre le niveau d'aspiration et le niveau de refoulement. Ce paramètre est exprimé en mètres de fluide (mètres de colonne d'eau) et diminue généralement en fonction du débit pompé.

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales selon le débit et la pression voulue.

#### I.16.2.1 Pompe volumétrique

Dans ces machines volumétriques (à déplacement positif), un certain volume de fluide est, dans une première étape, forcé dans un espace fini où il est enfermé sous pression par un moyen mécanique. Il est ensuite, dans une seconde étape, relâché ou forcé en dehors de cet espace, et le cycle reprend de nouveau. Donc, dans ce type de machine, l'écoulement du fluide

est intermittent et le débit dépend des dimensions de l'espace qui reçoit le fluide et de la fréquence avec laquelle il est rempli et vidé [20].

Une pompe volumétrique est constituée :

- D'un corps fixe ou stator ;
- D'un ou de plusieurs éléments mobiles participant au déplacement de fluide à l'intérieur de la pompe ;
- D'autres éléments mobiles destinés à mettre en mouvement les éléments précédents.

### **I.16.2.2 Pompe centrifuge**

La pompe centrifuge est un dispositif mécanique largement utilisé pour le transfert de fluides, tels que l'eau, les liquides industriels, les produits chimiques, etc. Elle est constituée d'un rotor (ou impeller) monté sur un arbre, qui tourne à grande vitesse dans une enceinte appelée volute.

Le principe de base des pompes centrifuges repose sur la mise en rotation du fluide à pomper on le faisant circuler dans une roue tournant à vitesse plus ou moins élevée, Le fluide est admis au centre de la roue (l'ouïe) avec une pression dite pression d'aspiration ou il est repris par les aubes de la roue. Lors de sa mise en rotation et de son déplacement vers la périphérie de la roue, sa vitesse et son énergie cinétique augmentent.

La conception de la pompe centrifuge comprend également des éléments tels que des conduites d'aspiration et de refoulement, des joints d'étanchéité et des paliers pour soutenir l'arbre de rotation. Des moteurs électriques, tels que des moteurs asynchrones, sont utilisés pour entraîner l'arbre de la pompe.

La performance d'une pompe centrifuge est caractérisée par plusieurs paramètres, tels que le débit (volume de fluide transféré par unité de temps), la hauteur manométrique (différence de pression générée par la pompe), le rendement (rapport entre la puissance de sortie et la puissance d'entrée) et la NPSH , qui mesure la disponibilité de pression à l'entrée de la pompe pour éviter la cavitation.

La pompe centrifuge qui est aussi le moyen le plus simple est économique pour le déplacement des liquides.

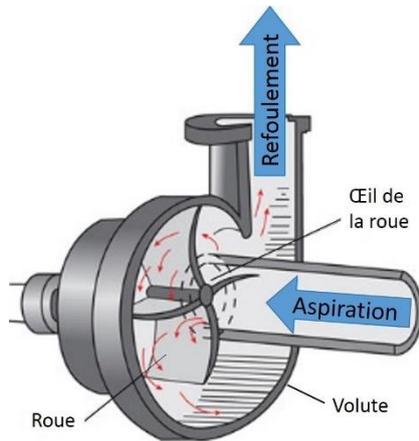


Figure I- 13: Pompe centrifuge [21]



Figure I-14 : Groupe motopompe [22]

### I.17 Conclusion

Après avoir récapitulé les concepts clés de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, nous avons décrit les types d'éoliennes et leur fonctionnement, ainsi que les composants d'un générateur éolien.

Nous avons également exploré les systèmes éoliens, passant par les machines à courant alternatif et ces différents types, jusqu'au divers éléments du système de pompage et les variétés de pompes existantes.

---

Chapitre II : Modélisation de la chaîne  
étudiée

---

## II.1. Introduction

Ce chapitre sera principalement consacré à la modélisation de notre système, qui nécessite l'établissement d'un ensemble d'équations décrivant tous les éléments du système étudiés. Pour ce faire, il est essentiel de connaître les critères d'entrée, c'est-à-dire les données météorologiques spécifiques aux sites étudiés.

## II.2. Description du système à étudier

Dans ce chapitre, nous procédons à la description des différents composants de notre système de pompage éolien. La représentation schématique générale du système est illustrée dans la figure (II-1), et il se compose principalement des plusieurs éléments suivants :

- Une turbine éolienne tripale à axe horizontal ;
- Une génératrice synchrone à aimants permanents ;
- Deux convertisseurs statiques MLI ;
- Un groupe motopompe qui comprend un moteur asynchrone à cage d'écureuil et une pompe centrifuge.

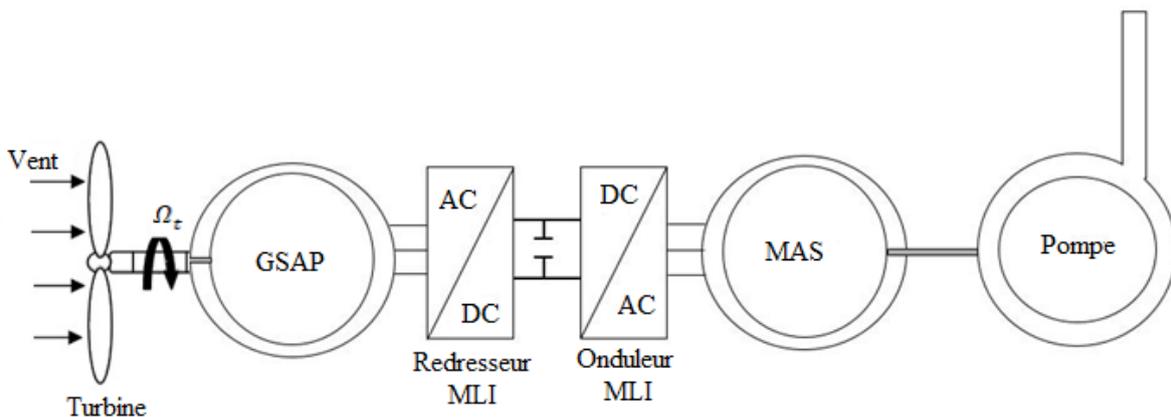


Figure II-1 : Structure de la chaîne de conversion éolienne étudiée.

## II.3. Modélisation de la partie mécanique

### II.3.1 Le vent

Les éoliennes tirent leur raison d'être du vent, dont l'énergie cinétique est partiellement captée et convertie en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur électrique. Le vent résulte du déplacement d'une masse d'air causée par des

différences locales de température et de pression. Sa vitesse et son amplitude géographique peuvent varier considérablement dans l'espace et dans le temps, allant d'une légère brise à une tempête violente.

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue au fil du temps

$$V_{vent} = f(t) \tag{II-1}$$

Dans cette étude, nous avons modélisé l'évolution de la vitesse du vent de manière déterministe en utilisant une approche basée sur la somme de plusieurs harmoniques. Cette représentation peut être décrite de la manière suivante :

$$V_{vent} = 10 + 0.02 \sin(0.8047t) + 0.9 \sin(0.5665t) + 0.65 \sin(0.8930t) + 0.05 \sin(0.6645t) \tag{II-2}$$

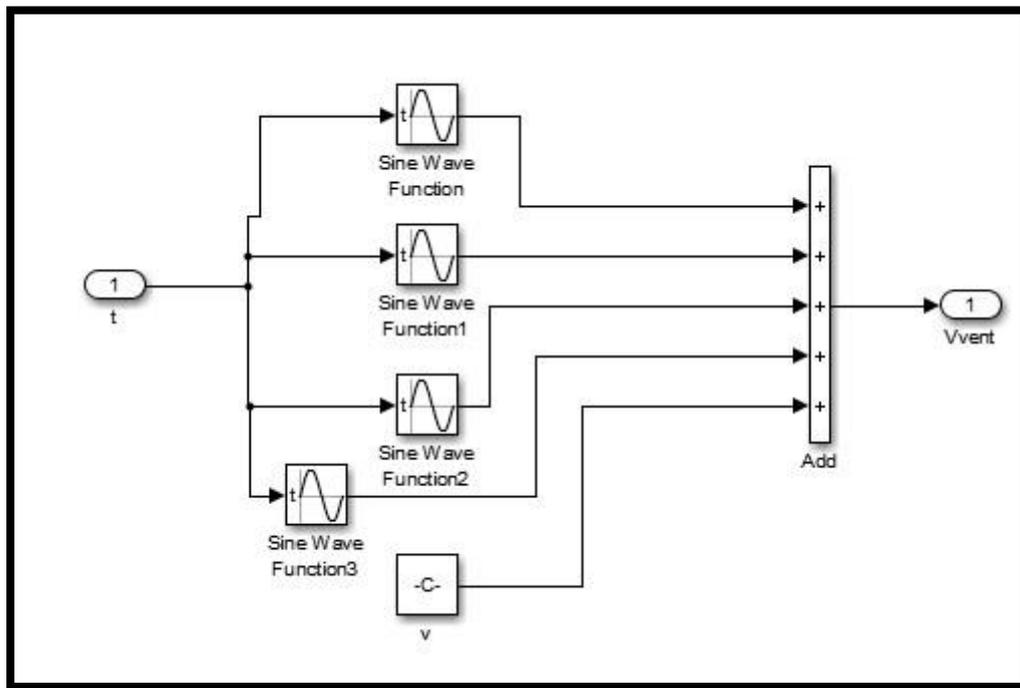


Figure II-2 : Schéma bloc de profil de vent

### II.3.2 La Turbine Eolienne

L'éolienne fonctionne en captant l'énergie cinétique du vent et en la transformant en un couple qui met en rotation les pales du rotor. Trois éléments sont essentiels pour déterminer l'efficacité de conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique par le rotor : la densité de

l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent ( $v$ ). La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui varient selon l'emplacement.

La puissance théorique du vent qui correspond à la puissance incidente, représente l'énergie que le vent exerce sur les pales de l'éolienne. Cette puissance est formulée de la manière suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.3})$$

La surface :  $S = \pi \cdot R^2$

Ce qui donne :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot S \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$\rho$  : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1.225 kg/m<sup>3</sup> en atmosphère normale) ;

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine ;

$R$  : Correspond pratiquement à la longueur de la pale ;

$V_{vent}$  : Vitesse du vent (en m/s).

Lorsque les pales d'une turbine éolienne sont entraînées en rotation par le vent, cela génère une puissance mécanique  $P_t$  au niveau de l'arbre de la turbine. Cette puissance mécanique est exprimée par une formule :

$$P_t = C_p(\lambda) \cdot P_v \quad (\text{II.5})$$

$C_p$  : Coefficient de puissance de l'éolienne ;

Le  $C_p$  dépend de la vitesse du vent, du nombre de pales, de rayon de la turbine, est de vitesse de la turbine.

En remplaçant  $P_{vent}$  par son expression dans (II.5), on obtient :

$$P_t = C_p(\lambda) \cdot \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{vent}^3 \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine varie en fonction de sa vitesse de rotation.

La relation entre le coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne étudiée est approximativement donnée par la formule suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,576 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{\frac{-21}{\lambda_i}} + 0,0068\lambda \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Où : } \lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0,008\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}} \quad \text{Avec } \beta : \text{Angle d'orientation des pales.}$$

Il est possible de formuler cela en termes de vitesse spécifique  $\lambda$  de la manière suivante :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{v} \quad (\text{II.9})$$

Où :

$\Omega_t$  : Vitesse de la turbine ;

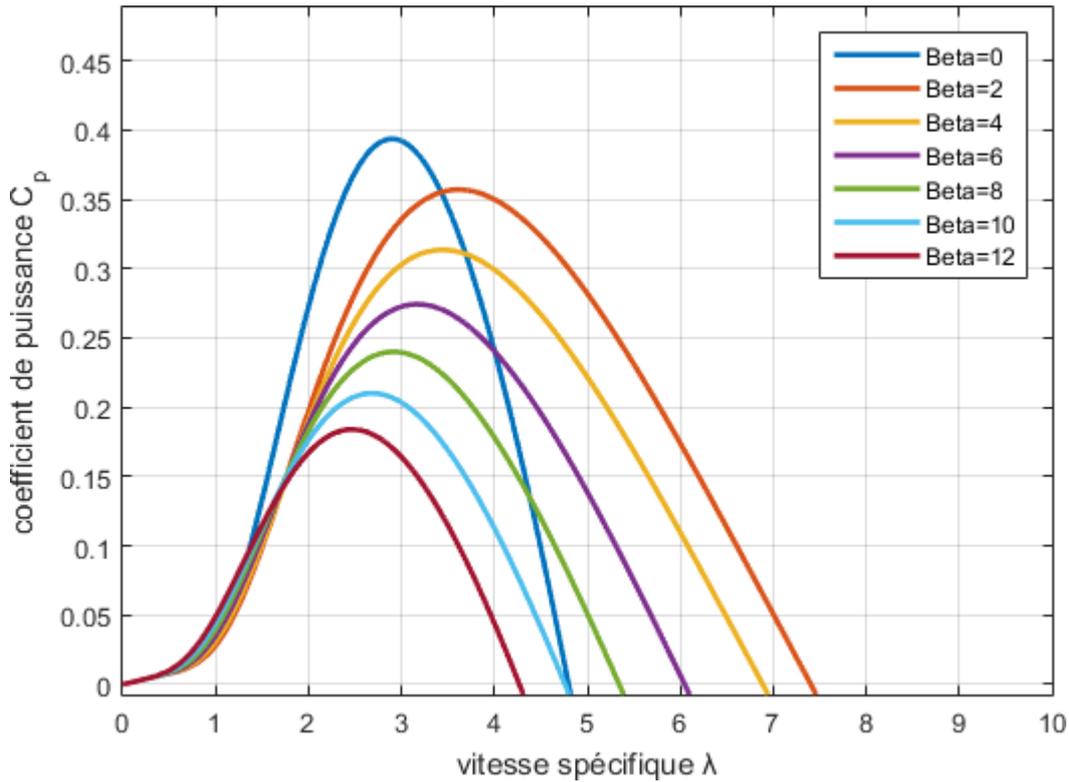
$R$  : Est le rayon de la turbine éolienne ;

$v$  : Est sa vitesse de rotation angulaire.

En se basant sur l'expression de la puissance mécanique de la turbine et en connaissant la vitesse de rotation de celle-ci, le couple mécanique disponible sur l'arbre de la turbine peut être exprimé de la manière suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2\Omega_t} \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3$$

Cette expression de  $C_p$  fait partie de la bibliothèque de SIMULINK et sera utilisée pour valider le modèle de notre système éolien. La courbe correspondante à cette formule est représentée dans la Figure (II-3). Cette figure présente plusieurs courbes en fonction de l'angle d'attaque  $\beta$ , mais nous nous intéresserons uniquement à celles correspondant à  $\beta = 0$  dans ce mémoire. Cette restriction est due au fait qu'il n'est pas possible de modifier l'angle de calage des pales sur une petite éolienne, car cela augmenterait son coût. En conséquence, nous nous concentrons sur cette courbe spécifique pour notre étude.

Figure II-3 : Caractéristiques  $C_p(\lambda, \beta)$  de l'éolienne utilisée

### II.3.3 L'arbre mécanique

L'inertie totale de  $J$  est la somme des inerties de la turbine  $J_t$  et de la génératrice  $J_g$ . Dans ce cas, l'éolienne n'est pas équipée d'un multiplicateur de vitesse, ce qui conduit à l'équation suivante :

$$J = J_t + J_g \quad (\text{II.10})$$

Lorsque l'on utilise l'équation fondamentale de la dynamique qui prend en compte les frottements et  $J$ , le couple électromagnétique de la génératrice, on parvient à obtenir le résultat suivant :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

$C_{vis} = f \cdot \Omega_g$  : Couple visqueux ;

$C_{em}$  : Couple électromagnétique.

Étant donné que notre système de pompage éolien n'inclut pas de multiplicateur de vitesse, nous avons la relation suivante :

$$\Omega_g = \Omega_t \quad (\text{II.12})$$

#### II.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne [23].

Les constructeurs d'éoliennes adoptent de plus en plus fréquemment ce type de machine en raison de sa capacité à fonctionner de manière autonome et de sa légèreté par rapport aux autres types de générateurs. Il convient de mentionner quelques avantages et inconvénients associés à ce type de machines

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices :[24]

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- La distribution sinusoïdale de le FMM crée 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.4.1 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques triphasées, dans un repère fixe attaché au stator, sont représentées par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Avec

$[V_s] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$  : Vecteur tension des phases statoriques ;

$[i_s] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$  : Vecteur courant des phases statoriques ;

$[\varphi_s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^t$  : Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

La représentation sous forme matricielle du système d'équations de l'enroulement statorique est la suivante :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Où

$R_s$  : La résistance des phases statoriques.

D'une autre manière on peut représenter ces équations comme suite :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} [\varphi_s]_{abc} \quad (\text{II.15})$$

Avec

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} : \text{Matrice des résistances statoriques.}$$

### Equations magnétiques :

Les flux présents dans le stator peuvent être séparés en flux auto-induits générés par les enroulements du stator, ainsi que les flux résultants du champ magnétique des aimants permanents. Ceci peut être exprimé de la manière suivante :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad (\text{II.16})$$

Ou bien

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + L_{s1}(\theta) \quad (\text{II.17})$$

Avec

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_0 & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_0 & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Où

$M_{s0}$  : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;

$L_{s0}$  : Inductance propre d'une phase statorique ;

$[L_{ss}]$ : Matrice des inductances statoriques ;

$[\varphi_f]$ : Flux des aimants permanents.

Et

$$[L_{s1}(\theta)] = L_{s1} \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) \\ \cos\left(2\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(2\theta) & \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec

$\theta$  : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

Le système d'équations (II.15) peut être réécrit de la manière suivante :

$$[V_s]_{abc} = [R_s][i_s]_{abc} + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][i_s]_{abc} + [\varphi_f]_{abc} \} \quad (\text{II.20})$$

#### II.4.2 Equation mécanique

L'équation mécanique suivante décrit la dynamique de la machine :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f\Omega_g \quad (\text{II.21})$$

#### II.4.3 Equations électriques et magnétiques de la MSAP dans le repère de Park

Pour passer du système triphasé (abc) vers le système biphasé (d, q, o), on utilise pour notre cas la transformation de Park modifiée qui est égale au produit de la matrice de rotation de Park par la matrice de transformation de Concordia.[25]

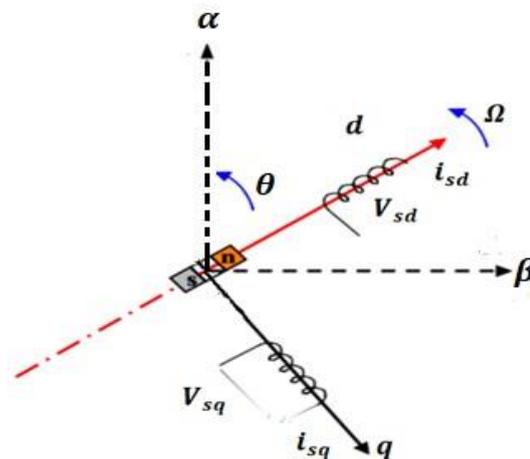


Figure II-4 : Représentations de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

$$\begin{bmatrix} X_{sd} \\ X_{sq} \\ X_0 \end{bmatrix} = [P(\theta_e)] \begin{bmatrix} X_{sa} \\ X_{sb} \\ X_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

La matrice de la transformation de Park pour le stator est donnée comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

La matrice de la transformation de Park inverse pour le stator est donnée comme suit :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Le changement de variable effectué, les équations des tensions sont :

$$[v_{dqo}] = [P(\theta)] [v_{abc}] \quad (\text{II.25})$$

$$[v_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [v_{dqo}] \quad (\text{II.26})$$

#### II.4.3.1 Equations électriques

Les équations statoriques de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) dans le référentiel de Park, qui est lié au rotor, sont décrites par les équations suivantes :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_S \cdot i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - P\Omega_g \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_S \cdot i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + P\Omega_g \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

#### II.4.3.2 Equation mécanique :

Les équations des flux magnétiques sont exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d \cdot i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Les inductances directe  $L_d$  et en quadrature  $L_q$ , sont supposées être indépendantes de  $\theta$ .

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (II.27), nous obtenons le résultat suivant :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} \cdot i_{sd} - P\Omega_g L_q i_{sq} \\ v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} \cdot i_{sq} + L_d \cdot i_{sd} P\Omega_g - P\Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

#### II.4.3.3 Expression du couple électromagnétique

En utilisant la formulation de Park modifié, l'expression de la puissance absorbée peut être écrite de la manière suivante :

$$P_a = (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \quad (\text{II.30})$$

En remplaçant  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$  par leur expression (II.29), on obtient :

$$P_a(t) = [(R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2))] + \left[ i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \right] + [\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}] \omega_e \quad (\text{II.31})$$

Où

$R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$ : Pertes par effet Joule ;

$i_{sd} \frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq} \frac{d\varphi_{sq}}{dt}$  : Variation de l'énergie magnétique emmagasinée ;

$\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}$  : Puissance électromagnétique ;

$\omega_e = P \cdot \Omega_g$ : Pulsation électrique.

Donc, on peut écrire

$$C_{em} = P (L_d - L_q) i_{sq} + P \varphi_f i_{sq} \quad (\text{II.32})$$

Dans les systèmes à aimants permanents avec rotor à pôles lisses, les inductances statoriques sur les axes d et q présentent une égalité, ce qui conduit à une expression du couple électromagnétique spécifique

$$C_{em} = P (\varphi_f i_{sq}) \quad (\text{II.33})$$

## II.5. Modélisation de convertisseur

Le développement rapide de l'électronique de puissance a permis d'offrir des avantages significatifs en termes de capacité, de qualité de puissance et de coût réduit. Cela a conduit à une utilisation répandue des convertisseurs de puissance dans le domaine de l'énergie éolienne.

L'intégration de ces convertisseurs dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne offre plusieurs avantages, notamment la capacité à obtenir la forme d'énergie souhaitée, mais aussi d'optimiser la puissance extraite.

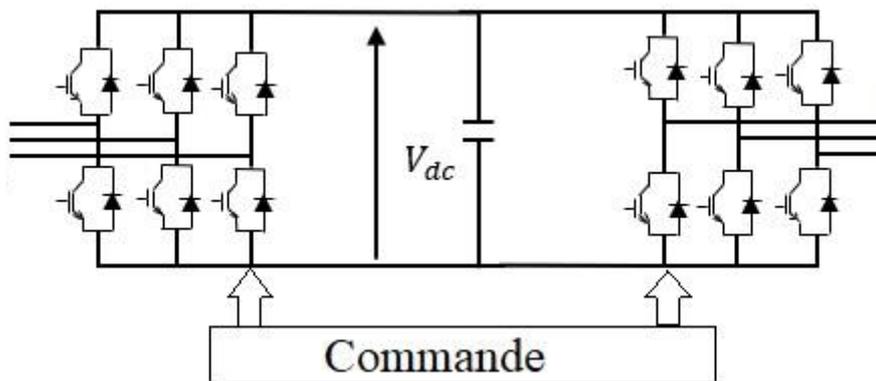


Figure II-5: Convertisseur statique MLI

### II.5.1 Redresseurs a commandé MLI

La configuration de référence consiste à utiliser un redresseur triphasé à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Il est possible d'obtenir un contrôle dynamique et fiable de la vitesse ou du couple de la génératrice synchrone. Cela permet de déplacer facilement le point de fonctionnement sur l'ensemble de la plage de vitesses de rotation. Cependant, Cette configuration nécessite un assemblage plus complexe comprenant trois bras complets, c'est à dire six interrupteurs, ainsi qu'une commande qui nécessite généralement un capteur mécanique de position.

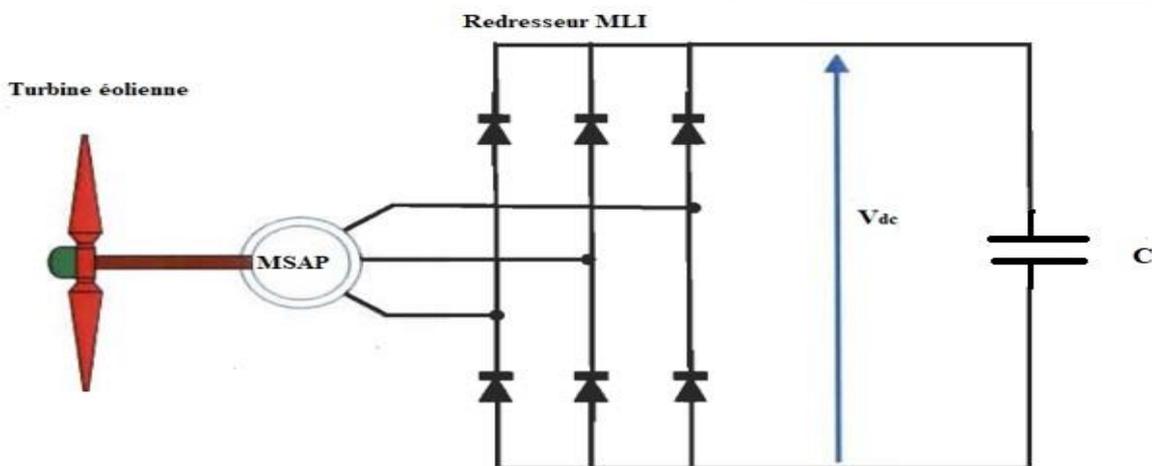


Figure II-6 : Msap relié à un Redresseur MLI.

$$\begin{cases} 1, \bar{S}_j = 0 \\ 0, \bar{S}_j = 1 \end{cases} ; j = 1,2,3 \quad (\text{II.34})$$

Les tensions de phase d'entrée et les courants de sortie peuvent être écrits en fonction de  $S_j$ ,  $V_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_a, i_b, i_c$  :

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (\text{II.35})$$

La description des tensions d'entrée entre phases du redresseur peut être exprimée de la manière suivante :

$$\begin{cases} U_{12} = (s_1 - s_2)V_{dc} \\ U_{23} = (s_2 - s_3)V_{dc} \\ U_{31} = (s_3 - s_1)V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Donc, on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{cases} V_1 = \frac{2s_1 - s_2 - s_3}{3} V_{dc} \\ V_2 = \frac{-s_1 + 2s_2 - s_3}{3} V_{dc} \\ V_3 = \frac{-s_1 - s_2 + 2s_3}{3} V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

Avec

$V_{dc}$  : Tension redressée ;

$s_1, s_2, s_3$  : Fonctions logiques correspondant à l'état des interrupteurs.

Le courant  $i_{red}$  est la somme du produit des courants de chaque phase par l'état de son interrupteur :

$$i_{red} = s_a \cdot i_a + s_b \cdot i_b + s_c \cdot i_c \quad (\text{II.38})$$

Avec

$i_{red}$  : Courant redressé.

### II.5.2 Modèle du bus continu

Le schéma électrique du bus continu illustrer dans la figure (II-7) démontre que le courant du condensateur provient d'un nœud avec deux courants circulant dans chaque convertisseur modulant.

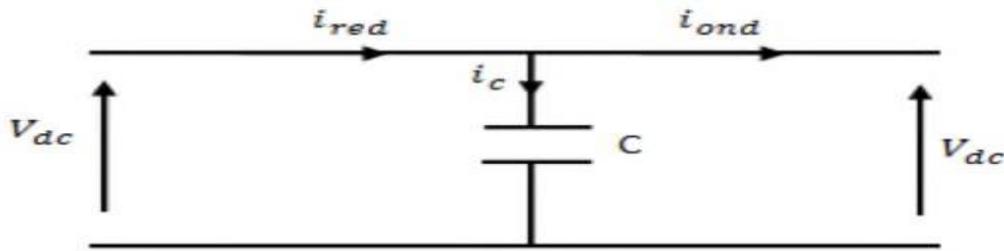


Figure II-7 : Schéma simple du circuit du bus continu.

$$\frac{d_{uc}}{dt} = \int \frac{1}{c} dt v_{dc} \quad (\text{II.39})$$

### II.5.3 Modélisations de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. Il partage la même structure que le redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI). En contrôlant les états de conduction et de blocage des transistors, on peut générer une tension alternative avec la fréquence requise pour alimenter la charge. Le signal de commande des transistors est fourni par le circuit de commande MLI.

Nous utilisons un onduleur à trois branches et deux niveaux de tension. Chaque branche de l'onduleur est composée de deux interrupteurs commandés pour l'ouverture et la fermeture. Ces interrupteurs sont des semi-conducteurs (transistors IGBT), qui sont connectés en antiparallèle avec des diodes.

L'onduleur est contrôlé à partir de grandeurs logiques via un circuit de commande. Les transistors sont représentés par  $T_i$  et  $T_i'$ , tandis que les commandes logiques associées sont représentées par  $S_i$  et  $S_i'$ . En supposant qu'il n'y ait pas de temps mort entre les interrupteurs de la même branche, la commande de ces derniers est alternée ( $S_i = S_i'$ ). Il existe donc deux états complémentaires.

- ✓  $S_i S_i = 1$ , alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert ;
- ✓  $S_i S_i = 0$ , alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant.

Un schéma de l'onduleur est représenté dans la figure (II-8).

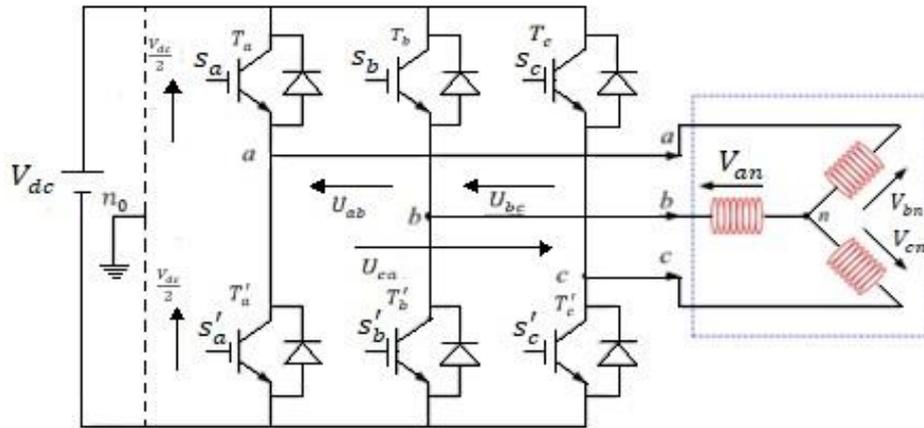


Figure II-8: Schéma de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Lorsqu'un onduleur est alimenté par une source de tension idéale, il produit en sortie une tension alternative composée d'une série d'impulsions rectangulaires. La période de fonctionnement de l'onduleur est déterminée par la commande des interrupteurs.

Soit "n", le point neutre du coté alternatif, alors les trois tensions composées :

Les tensions  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \quad (II.40)$$

La charge constituée par la machine est équilibrée ( $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ ), donc on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(U_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(U_{bc} - V_{ab}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(U_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad (II.41)$$

En utilisant les tensions de sortie de l'onduleur et en prenant en compte la tension du neutre de la charge par rapport à un point de référence  $n_0$ , il est possible d'écrire les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{an0} = V_{an} + V_{nn0} \\ V_{bn0} = V_{bn} + V_{nn0} \\ V_{cn0} = V_{cn} + V_{nn0} \end{cases} \quad (II.42)$$

Les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire ainsi, En introduisant le point de référence " $n_0$ " :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} + V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} + V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} + V_{an0} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

On peut déduire le potentiel entre les points  $n$  et  $n_0$ :

$$V_{nn_0} = \frac{1}{3}[V_{an_0} + V_{bn_0} + V_{cn_0}] \quad (\text{II.44})$$

On suppose que l'état des interrupteurs soit parfaits  $s_i$  ( $i = a, b, c$ ), on a :

$$V_{in} = s_i \cdot V_{dc} - \frac{V_{dc}}{2} = (s_i - \frac{1}{2})V_{dc} \quad (\text{II.45})$$

Donc on a :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{bn0} = (S_b - \frac{1}{2})V_{dc} \\ V_{cn0} = (S_c - \frac{1}{2})V_{dc} \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

En remplaçant (II.43) dans (II.42), on aura :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.47})$$

En remplaçant l'équation (II.46) dans (II.47), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & +2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.48})$$

## II.6 Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil

Le moteur asynchrone est largement répandu et utilisé dans le domaine des applications de puissance. Il est un composant essentiel de nombreux procédés industriels qui impliquent l'utilisation de convertisseurs statiques et de machines électriques.

Le fonctionnement d'une machine asynchrone repose sur l'interaction électromagnétique entre le champ tournant généré par le courant triphasé alimentant l'enroulement statorique à partir du réseau électrique, et les courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs du rotor sont traversés par le champ tournant.

### II.6.1 Équations générales d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil

#### II.6.1.1 Équations des tensions et des flux

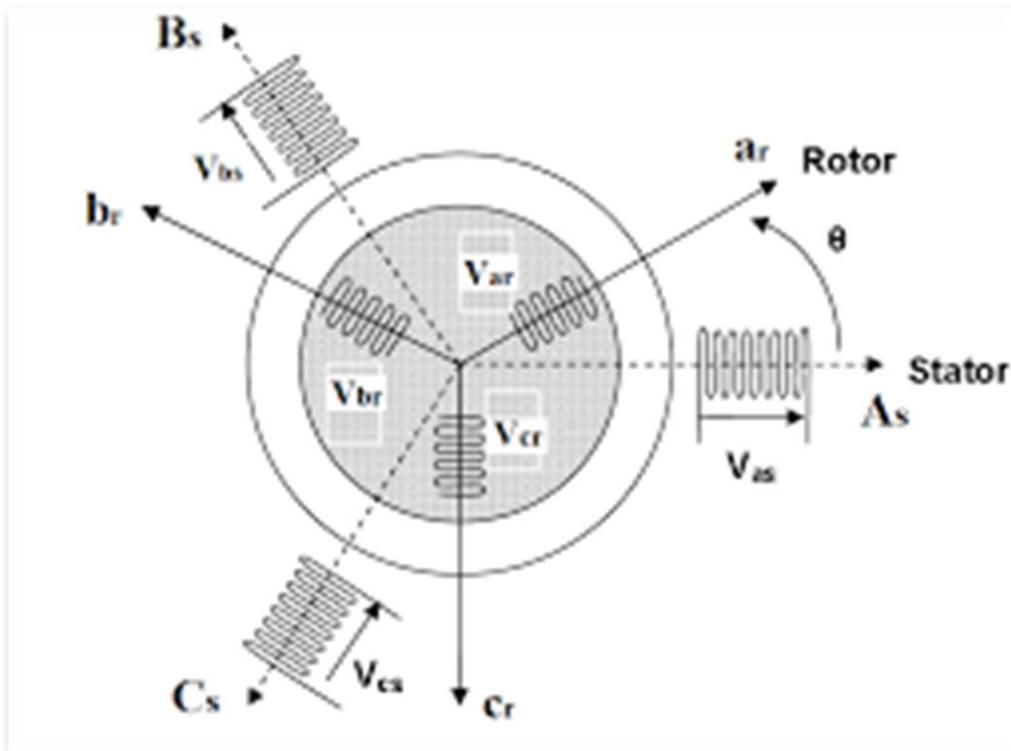


Figure II-9 : Représentation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on trouve les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone et elles s'écrivent sous forme matricielle :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \quad (II.49)$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (II.50)$$

Avec

Les tensions statorique et rotorique respectivement représentés par des vecteurs ainsi :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Les courants statorique et rotorique respectivement représentés par des vecteurs ainsi :

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Les vecteurs des flux statorique et rotorique respectivement représentés ainsi :

$$[\varphi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\varphi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix}$$

Les matrices des résistances statorique et rotorique respectivement représentés par des vecteurs ainsi :

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.50) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \quad (\text{II.51})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) qui s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left( \frac{d}{d\theta} [\varphi_{sabc}, \varphi_{rabc}] \right) \quad (\text{II.52})$$

Les flux totalisés  $\varphi_{sabc}$  et  $\varphi_{rabc}$  des phases statorique et rotorique sont exprimés en fonction des inductances sous la forme suivante :

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (\text{II.53})$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (\text{II.54})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Les inductances propres et mutuelles de la phase statorique ( $L_s$ ,  $M_s$ ) et de la phase rotorique ( $L_r$ ,  $M_r$ ) sont constantes, tandis que les inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases du rotor varient. Ces inductances mutuelles dépendent de l'angle  $\theta$  :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Avec

$M_{sr}$ : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase correspondante du rotor.

Finalement les équations électriques de moteur asynchrone peuvent s'écrire :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + [L_s] \cdot \frac{d}{dt} [I_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (\text{II.56})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + [L_r] \cdot \frac{d}{dt} [I_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \} \quad (\text{II.57})$$

Les équations (II.56) et (II.57) conduisent à des équations différentielles avec des coefficients variables. L'analyse du comportement du système devient donc plus complexe, ce qui justifie l'utilisation du modèle de Park pour faciliter cette étude analytique.

### II.6.1.2 Modèle de Park de la Machine Asynchrone

Le modèle diphasé de la MAS est obtenu en convertissant le repère triphasé en un repère diphasé (transformer de Park). Cette conversion correspond essentiellement à un changement de base des grandeurs physiques telles que les tensions, les flux et les courants. En d'autres termes cette transformer exprime les équations électriques du stator et du rotor dans des axes électriquement perpendiculaires appelés "d" pour l'axe direct et "q" pour l'axe en quadrature.

Pour faciliter les choses, nous supposons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est constant ;
- L'effet des encoches et les pertes ferromagnétiques sont négligeables ;
- Une distribution sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- Nous ne tenons pas compte de l'impact de l'échauffement sur les caractéristiques et de l'effet de peau.

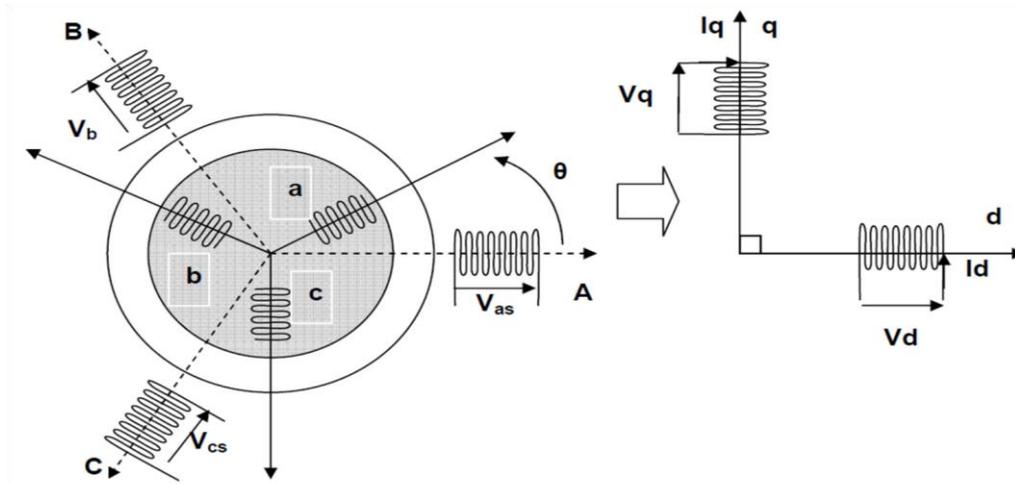


Figure II-10 : Modèle de Park de moteur asynchrone

Les amplitudes directes (d) et en quadrature (q) des grandeurs statoriques et rotoriques sont considérées comme fictives. Les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont les suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.58})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.59})$$

Les deux équations présentées sont universelles et peuvent être étendues à toutes les grandeurs, y compris les courants et les flux.

Pour décrire le fonctionnement de la machine asynchrone dans le système biphasé (d, q) lié au champ tournant, on peut obtenir les équations correspondantes en appliquant la transformée de Park.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\varphi_{s0}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} - \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} - \frac{d\varphi_{rq}}{dt} - (\omega_s - \omega) \varphi_{rd} \\ V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\varphi_{r0}}{dt} \end{array} \right. \quad (\text{II.60})$$

Avec

$V_{sd}, V_{sq}$  : Tension statorique direct et quadratique ;

$I_{sd}, I_{sq}$  : Courant statorique direct et quadratique ;

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$  : Flux rotorique direct et quadratique ;

$I_{rd}, I_{rq}$  : Courant rotorique direct et quadratique ;

$\omega_s, \omega_r$  : Vitesse statorique et rotorique [rd/s] ;

$\omega = p \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$  : Vitesse mécanique [rd/s].

Les flux statorique et rotorique peuvent être exprimés dans le repère de Park en fonction des courants à l'aide de la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.61})$$

Avec

$L_s = I_s + M$  : Inductance cyclique statorique ;

$L_r = I_r + M$  : Inductance cyclique rotorique ;

$I_s$  : Inductance de fuite statorique ;

$I_r$  : Inductance de fuite rotorique ;

$M$  : Inductance mutuelle.

On obtient finalement la matrice suivante qui rassemble toutes les équations de moteur asynchrone :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_s & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.62})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\varphi_{rd} \cdot I_{sq} - \varphi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{II.63})$$

L'équation mécanique est donnée par :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \cdot \omega \quad (\text{II.64})$$

## II.7 Modélisation de la pompe centrifuge

Trois paramètres sont impliqués dans le fonctionnement d'une pompe centrifuge : la hauteur, le débit et la vitesse.

$$C_r = K_r \Omega^2 + C_s \quad (\text{II.65})$$

Avec

$K_r$  : Coefficient de proportionnalité ;

$C_s$  : Couple statique qui est très petit.

En négligeant le couple statique ( $C_s$ ) l'équation (II.65), le couple résistant devient :

La pompe centrifuge exerce un couple de charge sur le moteur qui est directement proportionnel au carré de sa vitesse de rotation. On peut décrire cette relation de la manière suivante :

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.66})$$

La relation qui détermine l'équation de la puissance mécanique de la pompe est également basée sur la vitesse de rotation. On peut l'exprimer de la manière suivante :

$$P_{mec} = K_r \Omega^3 \quad (\text{II.67})$$

La formule générale pour exprimer la puissance hydraulique est la suivante :

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (\text{II.68})$$

Où

$\rho$ : Masse volumique de l'eau (1 000 kg/m<sup>3</sup>) ;

$g$  : Accélération de la pesanteur (9.81m/s<sup>2</sup>) ;

$P_h$  : Puissance hydraulique (W) ;

$H$  : Hauteur manométrique (m) ;

$Q$  : Débit volumique (m<sup>3</sup> /s).

La formule suivante permet de calculer le rendement de la pompe :

$$\eta_h = \frac{P_h}{P_{mec}} \quad (\text{II.69})$$

## II.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation de chaque élément de la chaîne étudiée : la turbine éolienne, le générateur synchrone à aimant permanent, les convertisseurs statiques (redresseurs et onduleurs) ainsi que le groupe motopompe composé d'une pompe centrifuge et d'un moteur asynchrone.

Le chapitre suivant sera consacré au contrôle et l'optimisation de notre système.

---

## Chapitre III : Contrôle et optimisation du système étudié

---

### III.1 Introduction

Ce chapitre sera divisé en deux parties distinctes. La première partie on appliquera une commande MPPT à la turbine ainsi une commande vectorielle à notre machine synchrone à aimants permanents qui fonctionne en mode génératrice, alimentée par une turbine éolienne associée à un redresseur à commande à hystérésis. Nous étudierons également la régulation du bus continu dans ce contexte, ainsi la commande vectorielle indirecte appliquée à un groupe motopompe, en mettant l'accent sur la régulation de la vitesse de la machine asynchrone à induction (MAS).

La deuxième partie sera consacrée à l'étude de la simulation grâce au logiciel MATLAB/SIMULINK. Nous examinerons l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne afin de confirmer le bon fonctionnement du système proposé.

### III.2 Production de la puissance maximale de la turbine (MPPT)

Le système éolien à vitesse variable utilise un sous-système MPPT (Maximum Power Point Tracking), pour permettre au système de fonctionner efficacement à des vitesses différentes de la vitesse nominale optimale. L'objectif de l'MPPT est de maximiser la production d'énergie électrique en extrayant la puissance maximale de l'énergie cinétique du vent disponible. L'MPPT peut être défini comme un algorithme ou un système qui aide un système éolien à axe horizontal à vitesse variable à optimiser la conversion de l'énergie éolienne en électricité en suivant le point de puissance maximale.

#### III.2.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Le MPPT classique simplifie la recherche du point de puissance maximale en utilisant les caractéristiques de la turbine éolienne. Cette méthode permet d'approcher rapidement le point optimal en utilisant des mesures internes au convertisseur mécano-électrique, sans avoir besoin d'un capteur de vitesse du vent. La courbe de puissance spécifique de la turbine présente une forme de cloche, où le sommet de la courbe correspond à la puissance maximale. Ce point est caractérisé par la vitesse optimale ( $\lambda_{opt}$ ) et le facteur de puissance maximum ( $C_{opt}$ ). Selon l'équation (III.1), la valeur de la vitesse du vent est égale à :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (III.1)$$

Nous pouvons en extraire l'expression de la vitesse du vent :

$$v = \frac{\Omega_t \cdot R}{\lambda} \quad (III.2)$$

Nous remplaçons l'expression (III.2) dans l'équation de la puissance extraite de l'éolienne :

$$p_t = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot S \cdot R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \tag{III.3}$$

Le couple de la turbine est donné par :

$$C_t = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot S \cdot R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^2 \tag{III.4}$$

En se plaçant dans les conditions d'exploitation optimale de l'éolienne, c'est-à-dire

$\lambda = \lambda_{opt}$  : Le rapport en vitesse angulaire et couple pour avoir le maximum de la puissance est donné par la relation :

$$C_{t\_opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \tag{III.5}$$

Avec :  $K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{\rho \cdot C_{p\_max} \cdot \pi \cdot R^5}{\lambda_{opt}^3}$

Lorsque l'éolienne fonctionne à son point optimal, le couple aérodynamique est directement proportionnel au carré de la vitesse de rotation de l'éolienne. En effectuant cette opération à chaque itération de calcul, on peut converger vers le point optimal.

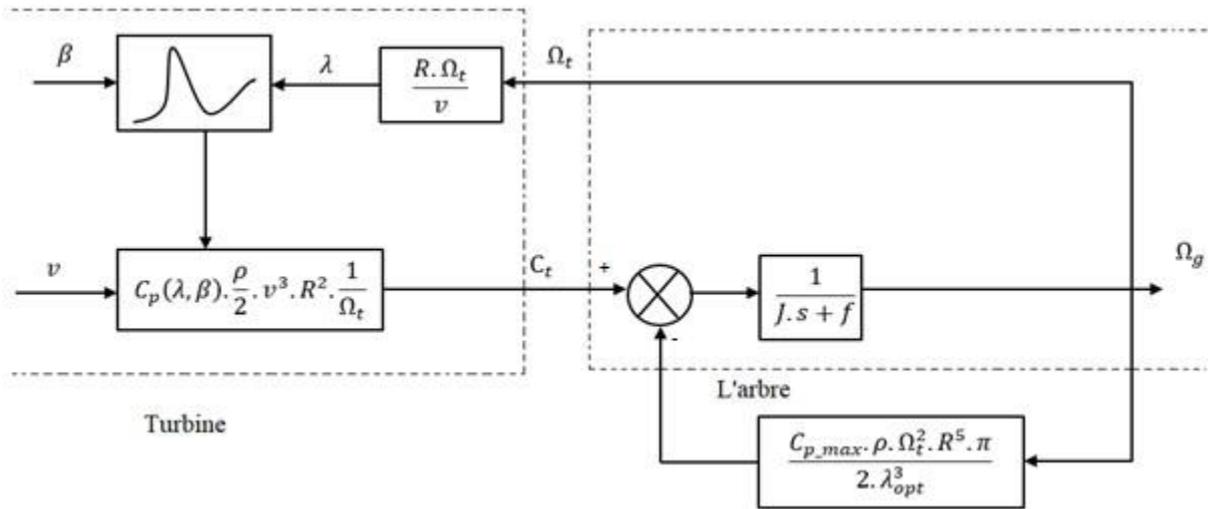


Figure III-1 : Schéma bloc de MPPT sans asservissement de la vitesse

### III.3 Régulation de tension $V_{dc}$

La régulation de la tension continue du bus est effectuée à l'aide d'un régulateur de type PI (proportionnel-intégral). Ce régulateur compare la tension continue mesurée avec la

référence de tension et corrige l'erreur entre les deux. La Figure III.2 présente le schéma bloc de la régulation de la tension du bus continue.

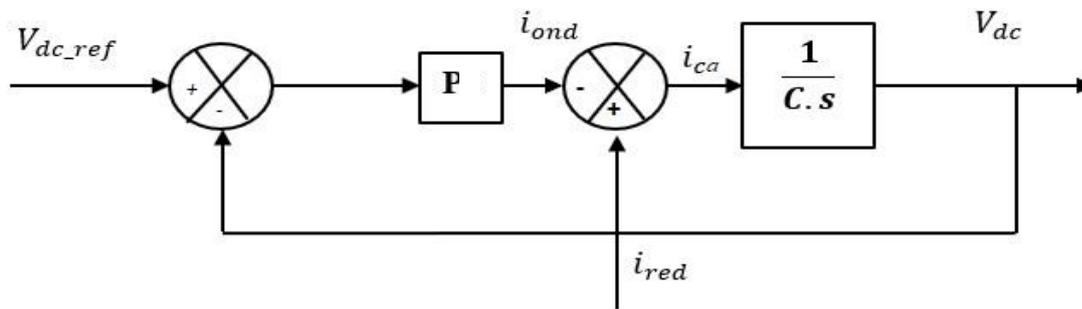


Figure III-2 : Schéma bloc de la régulation de  $V_{dc}$

### III.4 Contrôle du courant par hystérésis de redresseur

La commande à hystérésis capitalise sur les propriétés non linéaires du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Les états de commutation des interrupteurs de puissance sont déterminés en comparant la grandeur mesurée avec sa valeur de référence, tout en prenant en compte une plage de tolérance appelée largeur d'hystérésis. Cette approche est couramment employée dans des applications basiques, notamment pour le contrôle du courant par hystérésis.[26]

La stratégie de commande à hystérésis repose sur la régulation des interrupteurs de manière à limiter les variations du courant dans chaque phase à l'intérieur d'une plage définie par les références de courant. Cette régulation s'effectue en comparant en permanence les courants réels avec les courants de référence, comme illustré dans la figure III. 3. La sortie du comparateur à hystérésis est connectée à la logique de commande du redresseur et fournit directement les instructions de commande aux interrupteurs. Dans ce système de contrôle, la fréquence de commutation est libre et peut varier considérablement, ce qui entraîne un niveau de bruit relativement élevé et des pertes de puissance. De plus, l'utilisation de ce type de contrôle peut générer des sous-harmoniques de courant dans les applications comportant un filtre actif.[27]

L'algorithme de la commande par hystérésis en courant est le suivant :

$$\text{Si } \varepsilon k \geq \Delta i \Rightarrow sk = 0$$

$$\text{Si } \varepsilon k \leq -\Delta i \Rightarrow sk = 1$$

Avec :  $\varepsilon k = I_{mes\_k} - I_{ref\_k}$  : Ecart entre le courant de référence et le courant réel pour une phase k.

$\Delta i$  : Largeur de bande hystérésis.

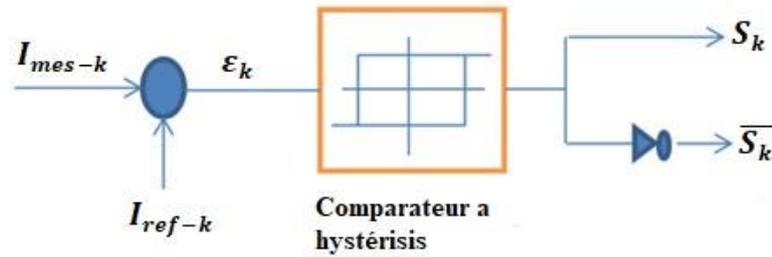


Figure III-3 : Principe de contrôle du courant par hystérésis

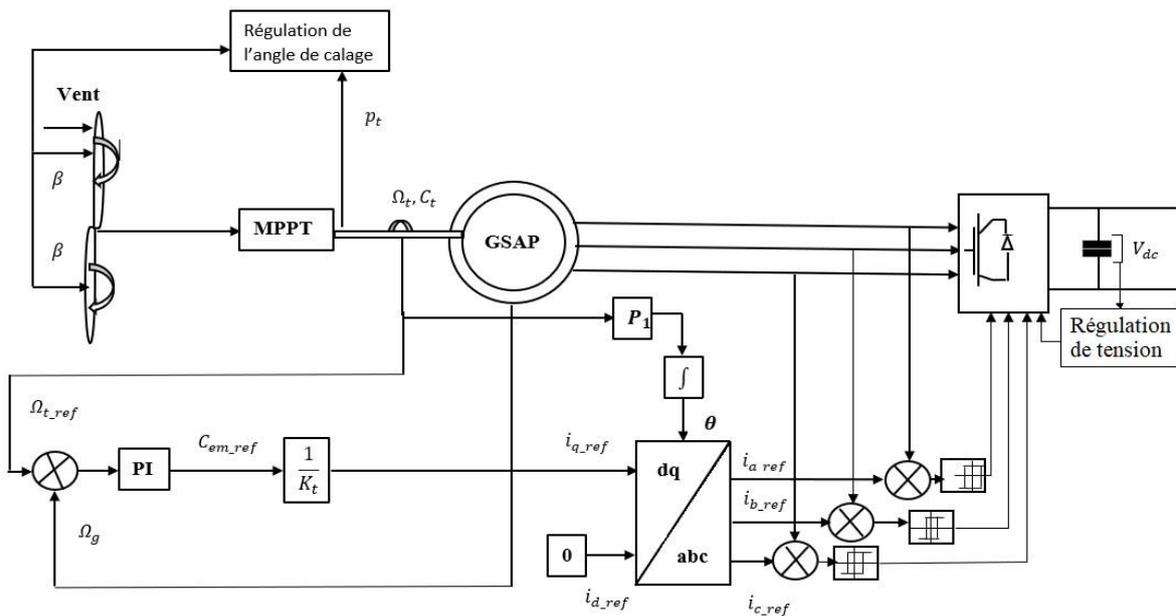


Figure III-4 : Schéma bloc de commande de générateur éolien

### III.5 Commande MLI de l'onduleur

L'objectif de l'onduleur est de générer des tensions à sa sortie qui se rapprochent le plus possible d'une forme sinusoïdale. Pour atteindre cet objectif, différentes stratégies de commande sont utilisées pour déterminer les trois fonctions logiques ( $sa$ ,  $sb$ ,  $sc$ ). Dans ce travail, nous nous intéressons à la méthode sinus-triangle qui est considérée comme la plus adaptée pour la commande des machines électriques. Cette méthode permet de régler simultanément la fréquence et la tension, tout en minimisant les oscillations de la vitesse, du couple et du courant.[28]

La méthode sinus-triangle consiste à calculer la largeur d'une impulsion afin d'obtenir la valeur moyenne de la tension de référence sur une période de commutation. Son principe repose sur la comparaison de deux signaux : le premier est une onde triangulaire de fréquence

très élevée (appelée porteuse) et d'amplitude fixe, tandis que le deuxième est une onde sinusoïdale de fréquence  $F$  et d'amplitude variable, qui détermine la fréquence de la tension de sortie (appelée référence). Ce processus de comparaison génère le signal MLI, qui est utilisé comme fonction de commutation pour commander les interrupteurs de l'onduleur. Le réglage de l'amplitude et de la fréquence de la tension de sortie de l'onduleur est déterminé par le coefficient de réglage en tension " $r$ ", qui représente le rapport entre l'amplitude de la tension de référence et la valeur crête de la porteuse, ainsi que par l'indice de modulation " $m$ ", qui indique le rapport des fréquences entre la porteuse et la référence [29].

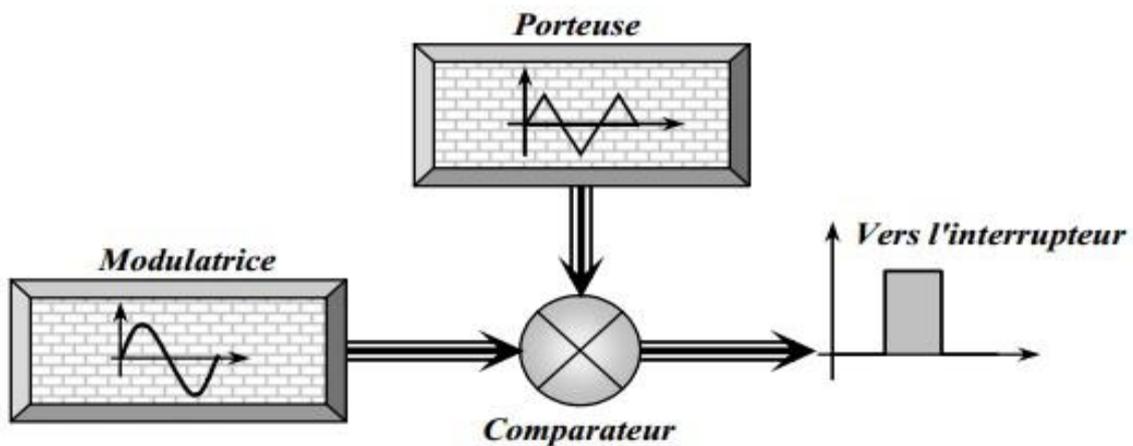


Figure III-5 : Schéma synoptique de la MLI

$$\text{Où : } r = \frac{V_{ref}}{v_p} \quad \text{et} \quad m = \frac{F_p}{F_{ref}}$$

Avec :  $F_p$  : Fréquence de la porteuse ;

$F_{ref}$  : Fréquence de référence ;

$V_p$  : Amplitude de tension de la porteuse ;

$V_{ref}$  : Amplitude de tension de référence.

### III.6 Le principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle a pour but le contrôle de la machine asynchrone est synchrone de manière similaire à une machine à courant continu à excitation indépendante, où il existe un découplage naturel entre la grandeur qui commande le flux (le courant d'excitation)

et celle qui est liée au couple (le courant d'induit). Ce découplage offre l'avantage d'obtenir une réponse très rapide du couple [30]

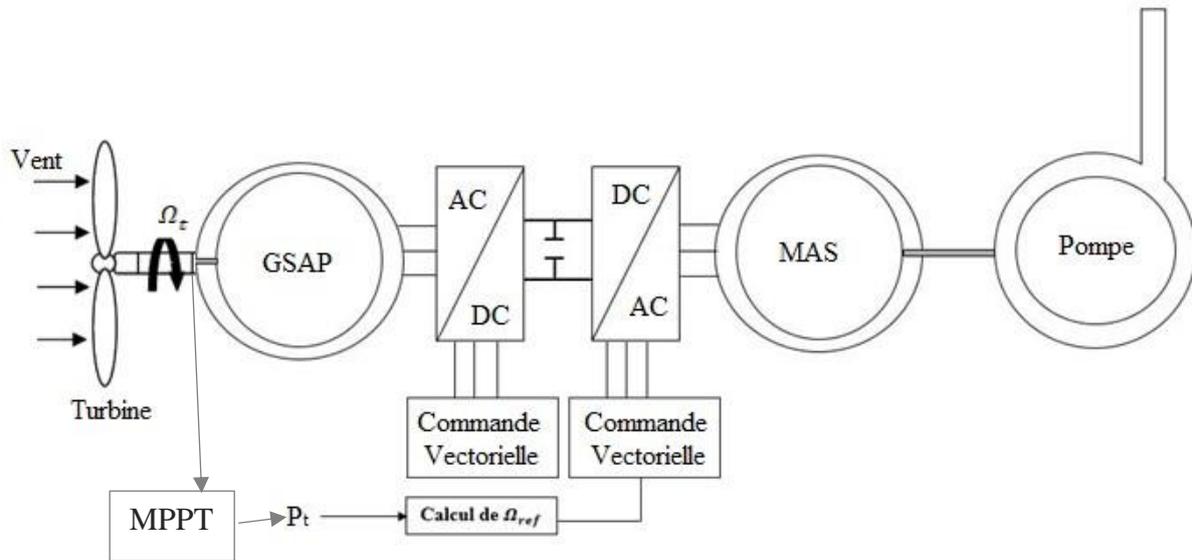


Figure III-6 : Schéma globale du système de pompage éolien

### III.6.1 Types de commande vectorielle :

Pour les applications de l'énergie éolienne, l'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones requiert une excellente performance en termes de commande de couple et de vitesse.[31]

On cite deux méthodes de commande vectorielle :

- La commande vectorielle directe ;
- La commande vectorielle indirecte.

#### III.6.1.1 Commande vectorielle directe

La mesure du flux rotorique est réalisée à l'aide de capteurs à effet Hall positionnés sous les dents du stator. Ces capteurs fournissent des valeurs locales du flux. Cependant, il est nécessaire de traiter ces valeurs pour obtenir une estimation du flux global. Cette approche présente des inconvénients en termes de fiabilité de la mesure. Telles que :

- Le problème de filtrage du signal mesuré ;
- La mesure varie en fonction de la température ;
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre, ...).

### III.6.1.2 Commande vectorielle indirecte

A cause des défauts vus dans la précédente commande, On privilégie généralement l'utilisation du contrôle vectoriel indirect, considéré comme étant plus pratique. Dans ce type de commande, on estime le courant rotorique, le flux rotorique et la position angulaire ( $\theta$ ) en se basant sur les mesures des paramètres de la machine accessibles, tels que la tension et le courant statorique. Toutefois, cette méthode présente un inconvénient majeur, à savoir sa sensibilité aux variations des paramètres de la machine, causées notamment par la saturation du circuit magnétique et les variations de température. Afin de remédier à cette sensibilité, il est souvent nécessaire de simplifier le modèle en établissant des hypothèses simplifiées.

### III.7 Commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents

La machine à courant continu présente une adaptation parfaite aux applications à vitesse variable en raison de la séparation entre la production du couple électromagnétique et la magnétisation du flux. Cependant, la présence du système de balais et de collecteur limite la puissance et la vitesse maximales, tout en posant des problèmes de maintenance et des interruptions de fonctionnement. Pour toutes ces raisons, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) tend à remplacer la machine à courant continu. Cette transition est motivée par les qualités incontestables de robustesse et de fiabilité offertes par la MSAP.

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à aimants permanents à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Les méthodes utilisées pour réaliser cette commande consistent, dans le cas d'une MSAP à pôles lisses, à maintenir le courant d'induit ( $i_{sd}$ ) à une valeur nulle et à contrôler la vitesse et/ou la position en agissant sur le courant quadrature ( $i_{sq}$ ), qui correspond au couple développé par la machine.

#### III.7.1 Stratégie de la commande vectorielle de la MSAP

La commande vectorielle, également connue sous le nom de commande à orientation de flux rotorique, repose sur l'utilisation d'un repère de référence lié au flux rotorique. En décomposant le courant statorique en ses composantes  $i_{sd}$  alignée avec l'axe du flux rotorique et  $i_{sq}$  en quadrature avec ce flux, on parvient à une commande découplée du flux et du couple.[32]

Dans la stratégie de contrôle vectoriel appliquée aux machines synchrones à aimants permanents (MSAP), il est courant de mettre la valeur de référence du courant direct à zéro.

Cette approche permet d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature le long de l'axe d, tout en permettant de travailler au couple maximal.[33]

La commande doit maintenir  $i_{sd} = 0$ , et réguler le couple avec  $i_q$ .

En imposant le courant  $i_{sd} = 0$ , le système d'équation (II.28) devient :

$$\begin{cases} V_{sd} = -L_q i_{sq} P_1 \Omega_g \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d i_{sq}}{dt} + P_1 \Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Le couple de l'équation (II.34) est simplifié en une expression linéaire donné par :

$$C_{em} = P_1 \cdot i_{sq} \cdot \varphi_f \quad (\text{III.7})$$

$$C_{em} = K_t \cdot i_{sq} \quad (\text{III.8})$$

Tels que :

$$K_t = P_1 \cdot \varphi_f$$

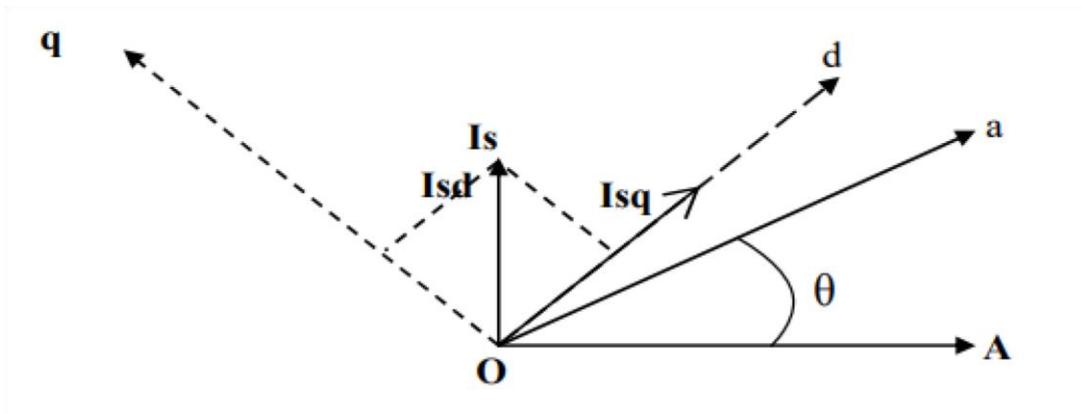


Figure III-7: Représentation spatiale de l'orientation du flux rotorique dans une MSAP

## III.8 Commande vectorielle de moteur asynchrone à cage d'écureuil

### III.8.1 Choix d'orientation du flux [34]

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axe « d.q ».

Un choix judicieux de l'angle d'orientation du repère « d, q » entraîne l'alignement de l'axe d sur la résultante du flux, cet alignement permet l'annulation de la composante transversale du flux comme il est illustre sur la figure (III-7)

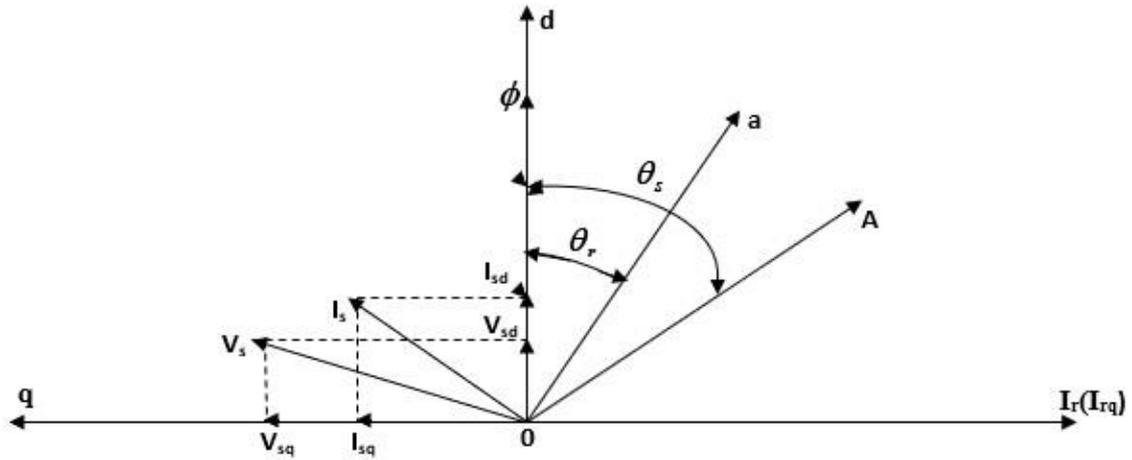


Figure III-8 : Orientation du flux (rotorique, statorique, d'entrefer)

Dans ce cas le flux rotorique est orienté sur l'axe d d'une référence solide au champ tournant de vitesse ( $w_s$ ), donc on peut remarquer les propriétés suivantes :

- La composante transversale du flux rotorique est nulle ;
- L'axe d est aligné systématiquement sur le vecteur du flux rotorique ;
- La composante longitudinale du courant rotorique est nulle si le flux rotorique est maintenu constant.

D'après ces propriétés on peut écrire :

$$\begin{cases} \varphi_{rq} = 0 \\ \varphi_{rd} = \varphi_r = cst \\ I_{rd} = 0 \end{cases} \quad (III.9)$$

On remplace ce système d'équations dans le système (II.47) on obtient :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = M i_{sd} = \varphi_r \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} = 0 \end{cases} \quad (III.10)$$

À partir de la dernière équation de système (III.10) on aura l'équation suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} I_{sq} \quad (III.11)$$

On remplace le système (III.9) dans l'équation (II.49) on obtient :

$$C_{em} = -\frac{PM}{L_r} \varphi_r I_{sq} \quad (\text{III.12})$$

On remplace l'équation (III.10) dans l'équation (III.12), le couple devient :

$$C_{em} = K_1 I_{sd} I_{sq} \quad (\text{III.13})$$

Avec

$$K_1 = \frac{PM^2}{L_r} \quad (\text{III.14})$$

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sq} \quad (\text{III.15})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{sd} \quad (\text{III.16})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rq} \quad (\text{III.17})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{rd} \quad (\text{III.18})$$

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} & (\text{III.19}) \\ \varphi_{sq} = L_s I_{sq} + M I_{rq} & (\text{III.20}) \\ \varphi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} & (\text{III.21}) \\ \varphi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} & (\text{III.22}) \end{cases}$$

D'après l'équation matricielle (III.17) :

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = -R_r I_{rd} \quad (\text{III.23})$$

Par ailleurs, l'équation (III.18) permet d'exprimer le flux en fonction du courant et de la pulsation rotorique sous la forme suivante :

$$\varphi_r = -\frac{R_r I_{rq}}{\omega_r} \quad (\text{III.24})$$

La relation (III.24) représente la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle indique la valeur que doit prendre en fonction de pour maintenir l'orientation du flux rotorique.

On peut, à partir de la relation (III.21), exprimer le courant  $I_{rd}$  comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\varphi_r - M I_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.25})$$

D'après la relation matricielle (III.22), on peut écrire pour :

$$I_{rq} = -\frac{M I_{sq}}{L_r} \quad (\text{III.26})$$

### III.8.2 Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté

En utilisant les simplifications précédemment énoncées, nous pouvons exprimer les tensions statoriques en fonction des courants statoriques et du flux  $\varphi_r$ . Les développements seront effectués pour  $V_{sd}$ , en gardant à l'esprit que le raisonnement est identique pour  $V_{sq}$ .

En dérivant le flux  $\varphi_{sd}$  par rapport au temps, en utilisant l'expression donnée par (III.19), nous obtenons :

$$\frac{d\varphi_{sd}}{dt} = L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + M \frac{dI_{rd}}{dt} \quad (III.27)$$

En utilisant l'équation (III.15), nous remplaçons ensuite  $\varphi_{sq}$  (conformément à la relation (III.20)) et  $\frac{d\varphi_{sd}}{dt}$  par leurs expressions respectives. Cela conduit à l'expression suivante :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + L_s \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - w_s \cdot L_s \cdot I_{sq} + M \frac{dI_{rd}}{dt} - w_s \cdot M \cdot I_{rq} \quad (III.28)$$

En utilisant les relations (III.25) et (III.26), en échangeant les courants rotoriques, nous obtenons :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \left(L_s + \frac{M^2}{L_r}\right) \frac{dI_{sd}}{dt} - w_s \cdot \left(L_s + \frac{M^2}{L_r}\right) \cdot I_{sq} + -w_s \cdot M \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (III.29)$$

En utilisant l'expression du coefficient de dispersion  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$  les tensions statoriques peuvent être écrites de la manière suivante :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} - w_s \cdot \sigma L_s I_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (III.30)$$

De manière similaire, on peut réécrire  $V_{sq}$  comme suit :

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + w_s \cdot \sigma L_s I_{sd} + w_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\varphi_r}{dt} \quad (III.31)$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il est nécessaire d'estimer les valeurs du  $\varphi_r$  et du  $w_s$  pour l'application de la transformation de Park.

### III.8.3 Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, tandis que les grandeurs relatives au rotor ne le sont pas. Par conséquent, il est nécessaire de les estimer à partir des grandeurs statoriques.

En utilisant les équations (III.23) et (III.25) et en appliquant la notation de Laplace, nous obtenons :

$$\varphi_r = \frac{M.I_{sd}}{1+T_r s} \quad (III.32)$$

Tel que :

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.33)$$

À partir des équations (III.24) et (III.26), on peut déduire la formule de la pulsation rotorique :

$$\varphi_r = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} \quad (III.34)$$

En remplaçant la dernière relation dans l'équation  $w_s - w_r = P \cdot \Omega = w$  on aura :

$$w_s = \frac{M.I_{sq}}{T_r \cdot \varphi_r} + P \cdot \Omega \quad (III.35)$$

Avec

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} : \text{Le coefficient de la fuite totale ;}$$

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} : \text{Constante de temps statorique ;}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{Constante de temps rotorique.}$$

### III.8.4 Bloc de découplage par retour d'état

En réexaminant la description de la commande vectorielle par orientation du flux rotorique sur l'axe (d) du repère lié au champ tournant, nous pouvons réécrire le système d'équations de la manière suivante :

$$I_{sd}^* = \frac{1}{M} \varphi_r^* \quad (III.36)$$

$$I_{sq}^* = C_e^* \frac{L_r}{P M \varphi_r^*} \quad (III.37)$$

$$w_s^* = \frac{M.I_{qs}^*}{T_r \cdot \varphi_r^*} + w_r^* \quad (III.38)$$

$$\begin{cases} V_{sd}^* = R_s I_{sd}^* - w_s^* \sigma L_s I_{sq}^* \\ V_{sq}^* = R_s I_{sq}^* + w_s^* \frac{M}{L_r} \varphi_r^* + w_s^* \sigma L_s I_{sd}^* \end{cases} \quad (III.39)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd}^* \\ V_{sq}^* \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} + w_s^* D \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} \quad (III.40)$$

Avec :C et D son des matrices

$$[C] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \end{bmatrix}; [D] = \begin{bmatrix} 0 & -\sigma L_s & 0 \\ \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \quad (III.41)$$

On remplacer (III.41) dans (III.40) Alors on aura ces équations :

$$\begin{bmatrix} V_{sd}^* \\ V_{sq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} + w_s^* \begin{bmatrix} 0 & -\sigma L_s & 0 \\ \sigma L_s & 0 & \frac{M}{L_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd}^* \\ I_{sq}^* \\ \varphi_r^* \end{bmatrix} \quad (III.42)$$

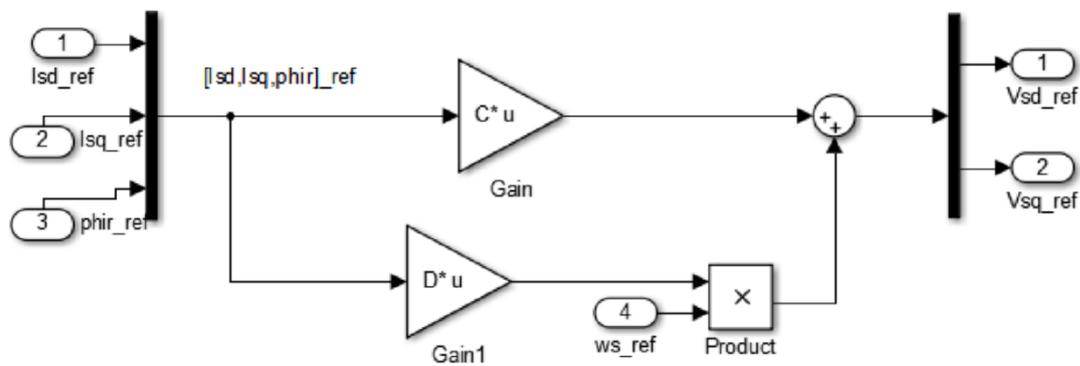


Figure III-9 : Schéma Bloc de découplage par retour d'état

### III.9 Filtre pour le réglage de la vitesse

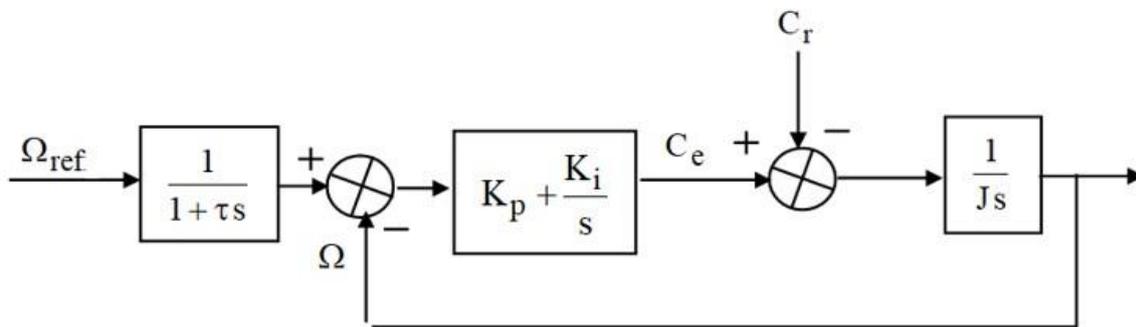


Figure III-10 : Schéma fonctionnel de régulation de vitesse avec filtre

L'expression de la fonction de transfert en boucle fermée, avec un couple résistant nul, s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{w_{ref}(s)}{w(s)} = \frac{K_p s + K_i}{J s^2 + (K_p + f)s + K_i} \tag{III.43}$$

La fonction de transfert présente une dynamique de 2<sup>ème</sup> ordre qui peut être exprimée sous une forme canonique comme suit :

$$\frac{1}{\frac{1}{w_n^2} s^2 + \frac{2\xi}{w_n} s + 1} \tag{III.44}$$

En comparant avec un coefficient d'amortissement  $\xi = 0.7$  et une pulsation donnée  $w_n$ , on obtient :

$$\begin{cases} K_i = J \cdot w_n^2 \\ K_p = 2 \cdot \xi \cdot w_n - f \end{cases} \tag{III.45}$$

La méthode de défluxage pour la régulation de vitesse repose sur le principe de déterminer directement la composante du flux rotorique en utilisant la vitesse mécanique de rotation du rotor mesurée par un capteur de vitesse. Cela peut être réalisé à l'aide d'un bloc de défluxage qui est défini par la fonction non linéaire suivante :

$$\begin{cases} \Phi_{ref} = \Phi_{r,nom} & \text{Si } |\Omega| \leq \Omega_{nom} \\ \Phi_{ref} = \frac{\Phi_{r,nom}}{|\Omega|} \cdot \Omega_{nom} & \text{Si } |\Omega| > \Omega_{nom} \end{cases}$$

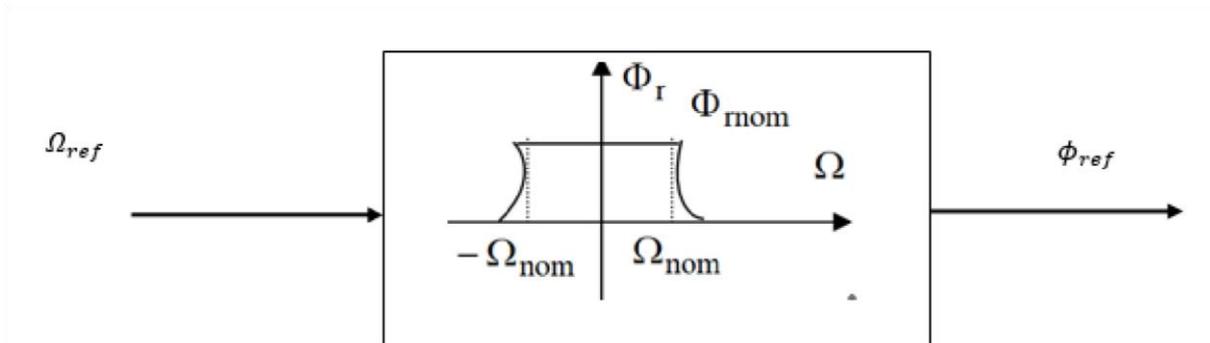


Figure III-11 : Schéma de défluxage

### III.10 Régulation des courants statoriques

Chaque circuit de courant est équipé d'un régulateur PI (proportionnel intégral) classique, qui comprend une action proportionnelle pour ajuster la vitesse à laquelle la

régulation doit être effectuée, ainsi qu'une action intégrale pour éliminer l'erreur statique entre la valeur régulée et sa consigne respective.

Pour les systèmes dont la fonction de transfert est du premier ordre, l'identification des paramètres des régulateurs PI peut être réalisée de la manière suivante :

$$H(p) = \frac{a}{ap+b} \quad (\text{III.46})$$

La fonction de transfert du PI est :

$$C_p = K_p + \frac{K_i}{p} \quad (\text{III.47})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du système asservi peut être exprimée de la manière suivante :

$$T(p) = H(p)C(p) = \frac{KpP.k_i}{ap^2+a+bp} \quad (\text{III.48})$$

En boucle fermée, on obtient :

$$F(p) = \frac{T(p)}{1+T(p)} = \frac{KpP.k_i}{ap^2+(b+Kp)p+k_i} \quad (\text{III.49})$$

Pour obtenir un comportement similaire à celui d'un système du premier ordre, la fonction de transfert peut être exprimée sous la forme suivante :

$$G(p) = \frac{1}{\tau p+1} \quad (\text{III.50})$$

En identifiant les deux expressions (III.43) et (III.44) :

$$\frac{KpP.k_i}{ap^2+(b+Kp)p+k_i} = \frac{T(p)}{1+T(p)} \quad (\text{III.51})$$

Ce qui donne :

$$k_p \cdot \tau^2 + (k_i\tau + k_p)p + k_i = a_p^2 + (b + k_p)p + k_i \quad (\text{III.52})$$

$$\text{avec : } \begin{cases} k_p = \frac{a}{\tau} \\ k_i = \frac{b}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.53})$$

La figure (III-11) représente le schéma de la boucle de régulation des courants statoriques :

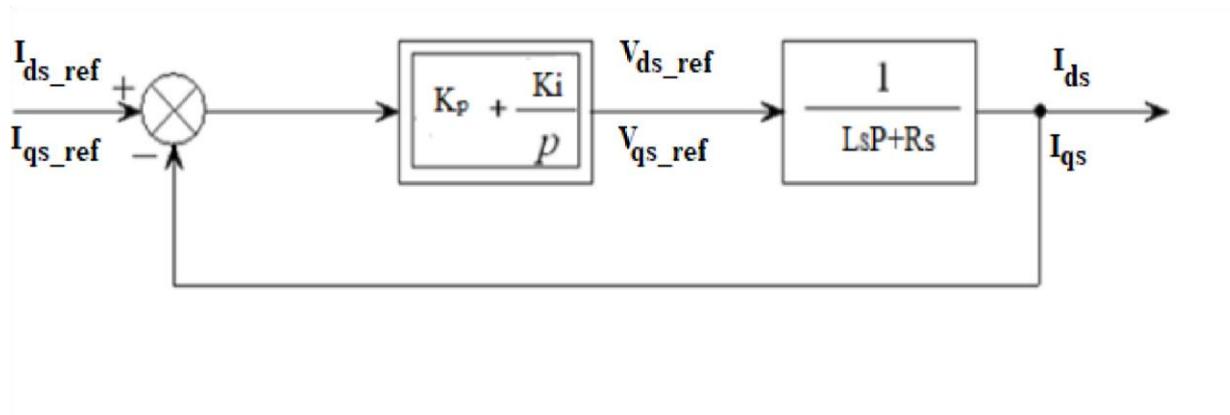


Figure III-12 : Schéma de la boucle de régulation des courants statoriques

$$\text{avec : } \begin{cases} k_p = \frac{a}{\tau} \\ k_i = \frac{b}{\tau} \end{cases} \quad (\text{III.54})$$

$K_p$  : constante de proportionnalité ;

$K_i$  : constante d'intégration.

On prend  $\tau = \frac{\tau_r}{6}$  pour avoir une dynamique du processus rapide, avec  $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  est la Constante de temps électrique (rotorique) du système.

### III.11 Simulation et interprétation des résultats

Cette partie se concentrera sur la simulation du système global représenté dans la figure précédente III-12.

Nous utilisons le profil du vent illustré dans la figure (III-13) pour simuler le comportement de la chaîne complète du système. Les résultats de simulation obtenus sont récapitulés dans les figures (III-14), (III-15) et (III-16) :

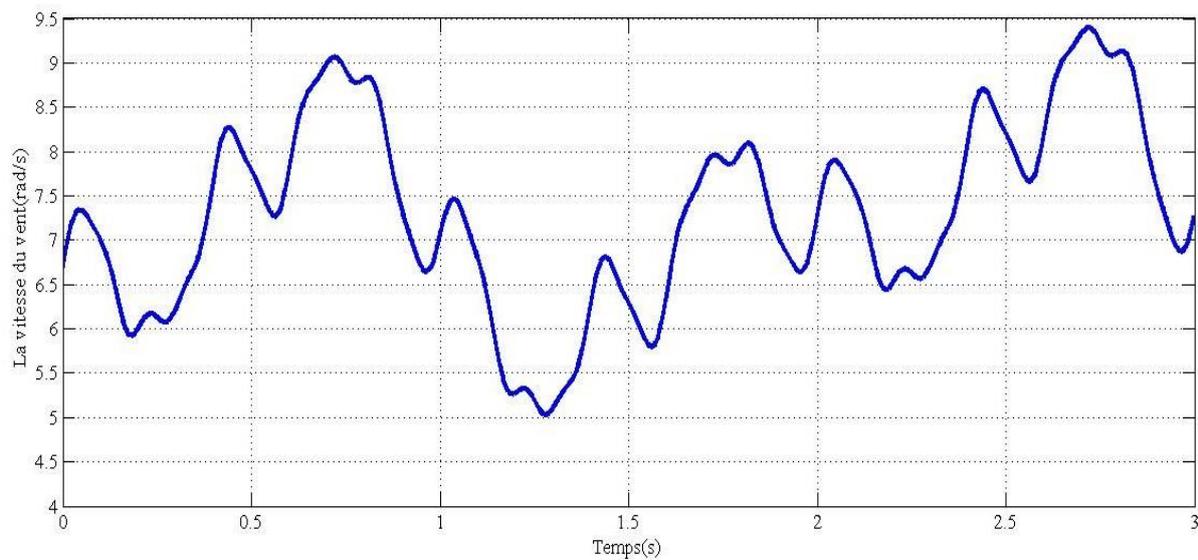
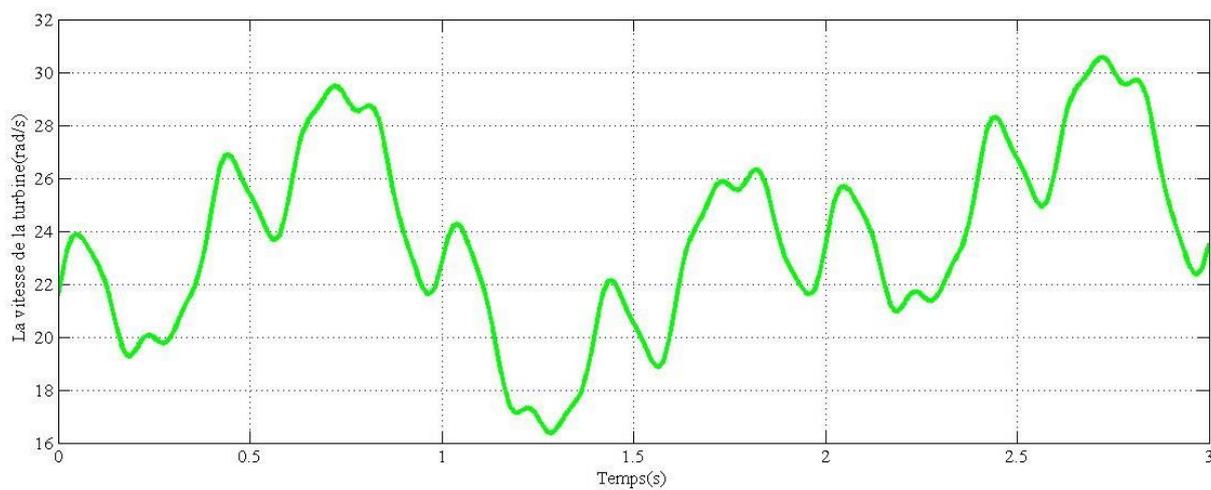
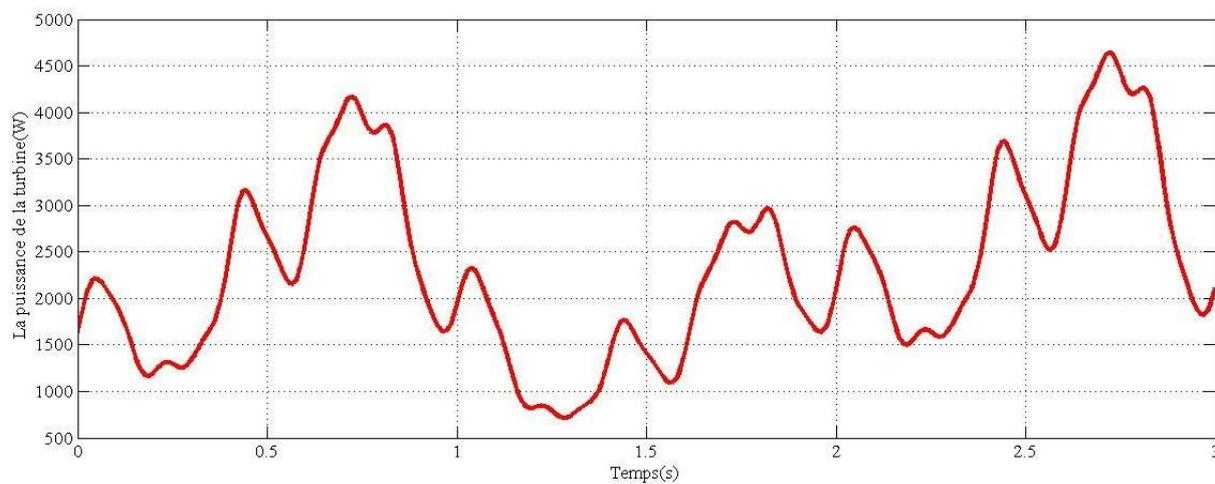


Figure III-13 : Allure utilisée de la vitesse du vent



(A)



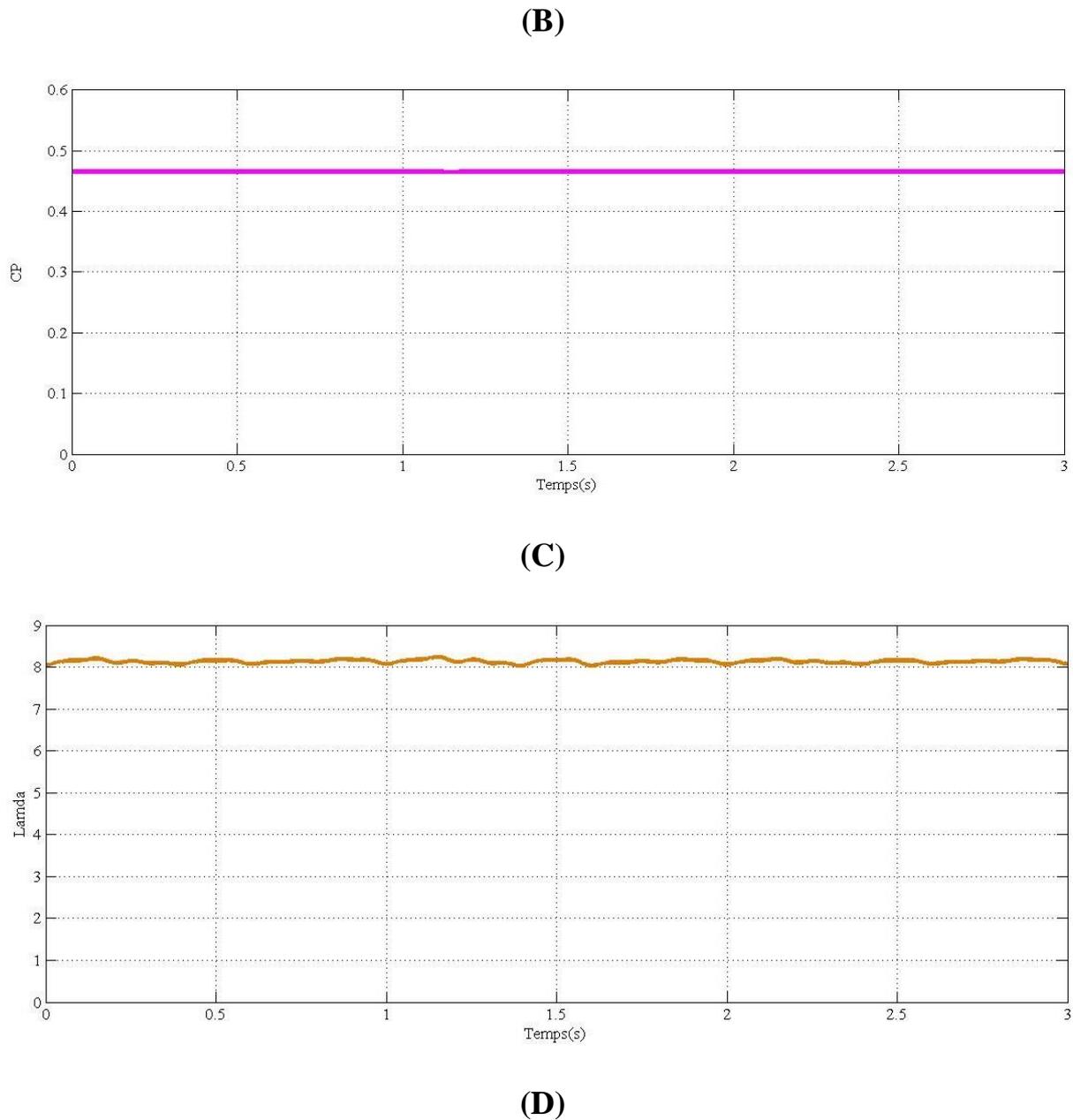
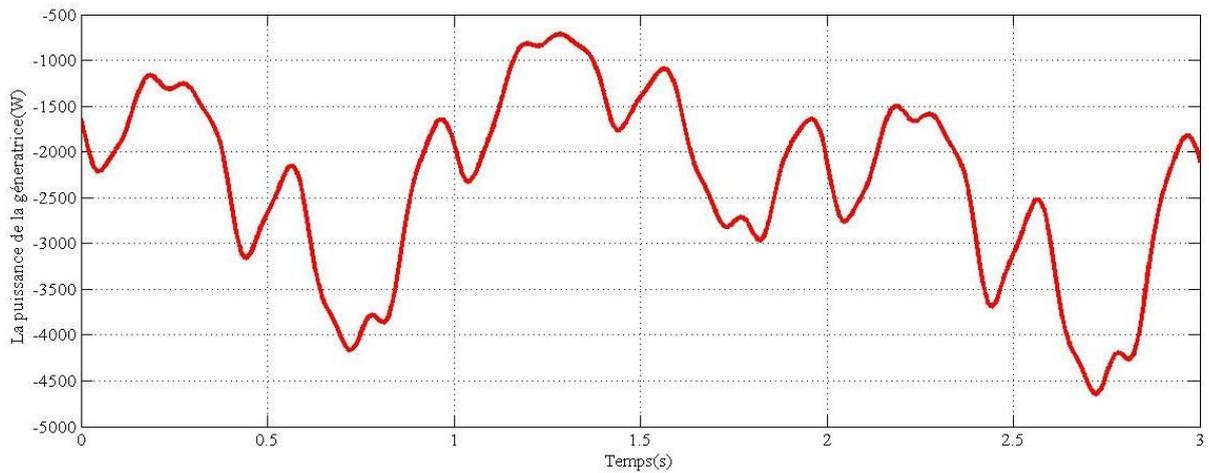


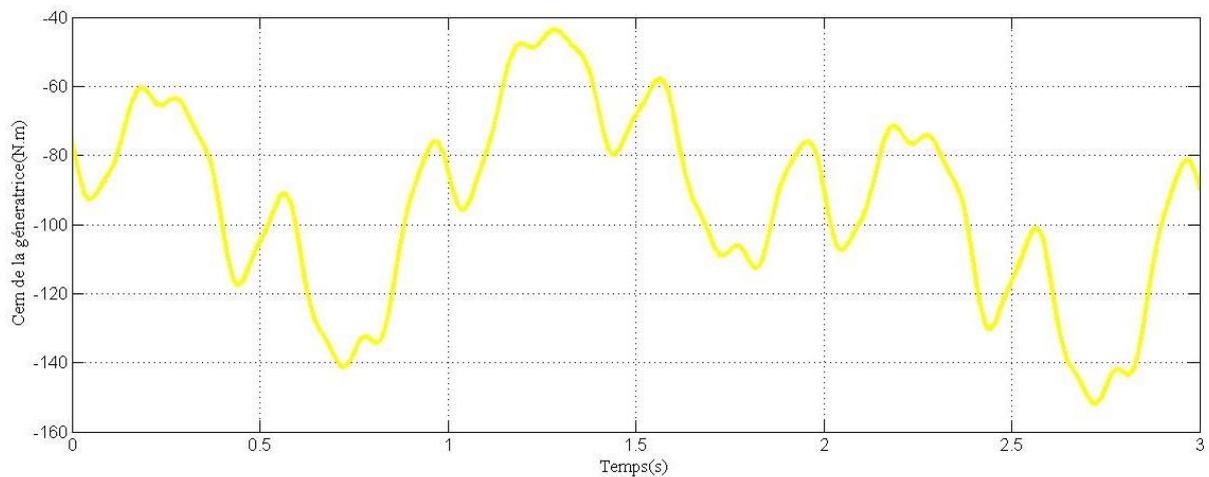
Figure III-14 : Résultats de simulation de la turbine(A,B,C,D)

Les figures (III-14 A, B, C, D) illustrent l'évolution de différents paramètres tels que la vitesse de la turbine, la puissance de la turbine, le coefficient de puissance et la vitesse spécifique, on remarque que la vitesse ainsi que la puissance obtenue suivent leurs caractéristiques optimales. Cela démontre l'efficacité de l'application du contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking), En observant la figure (III-14 A et B). En plus, du maintien du coefficient de puissance à sa valeur maximale (0.47) (la figure III-14 C), ce qui correspond, dans ce cas, à une vitesse spécifique constante, comme indiqué dans (la figure III-14 D).

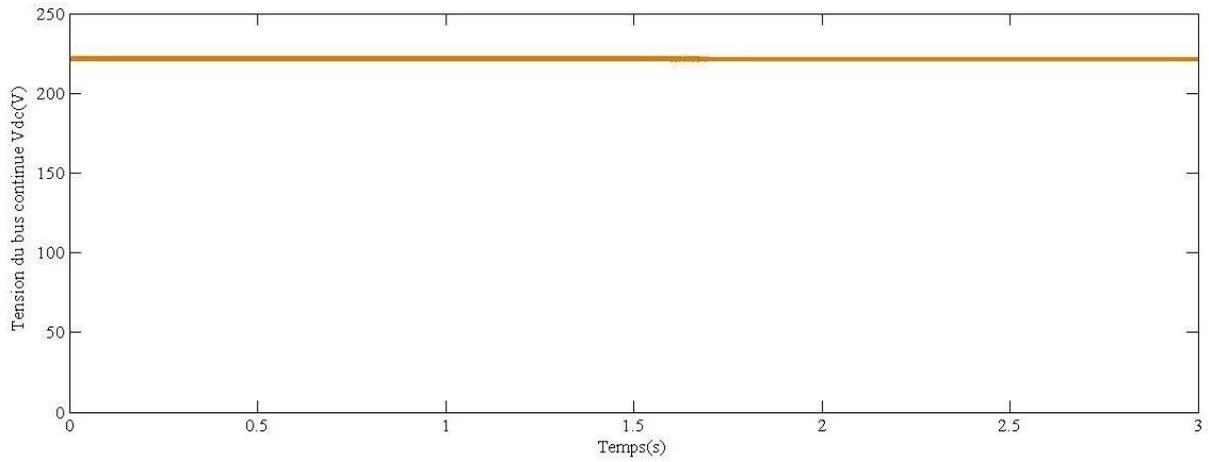
Les figures (III-15, A, B, C, D, E, F) présentent les variations du couple électromagnétique, de la puissance, des courants directs et en quadrature du générateur, ainsi que la tension du bus continu  $V_{dc}$  :



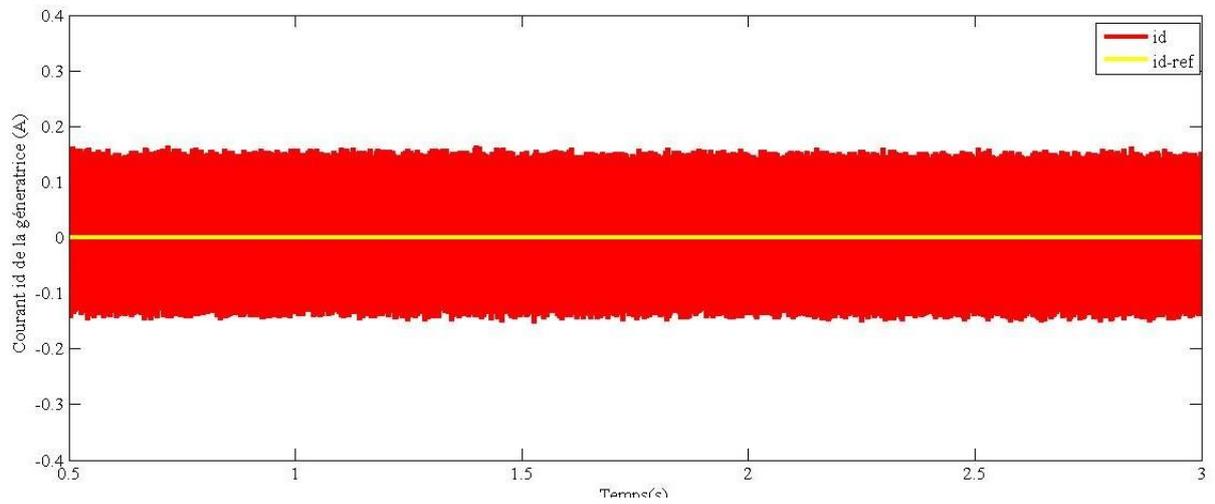
(A)



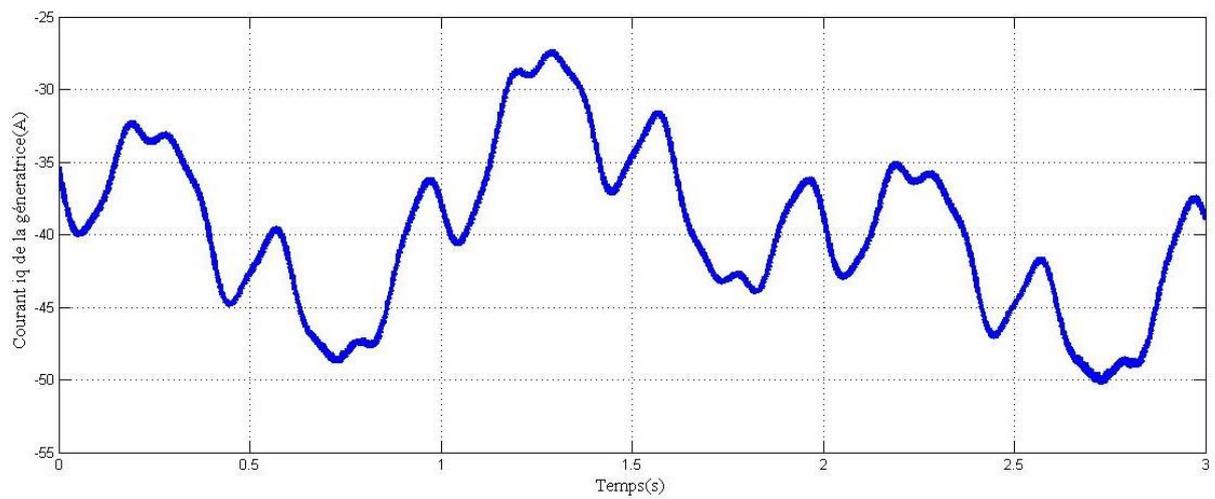
(B)



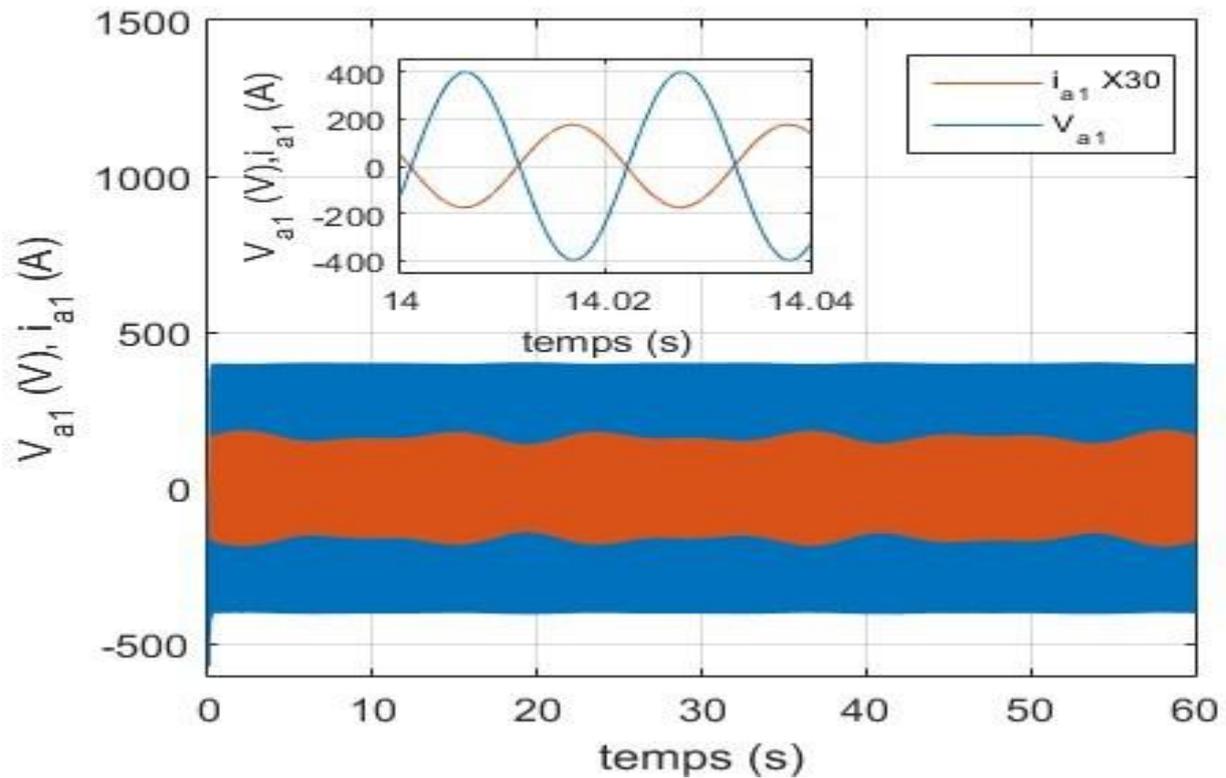
(C)



(D)



(E)



(F)

Figure III-15 : Résultats de simulation de la génératrice (A, B,C,D,E,F)

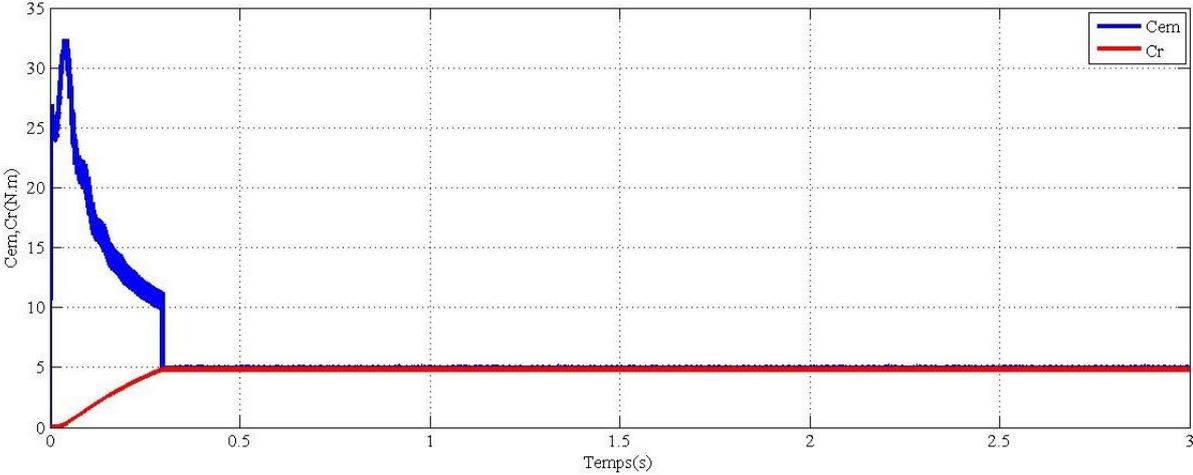
En analysant les résultats, plusieurs observations peuvent être faites.

Tout d'abord, la puissance et le couple de la génératrice ainsi que le courant  $i_q$  sont de signes négatifs (la figure III-14 A, B, E), ce qui indique que le générateur fonctionne correctement.

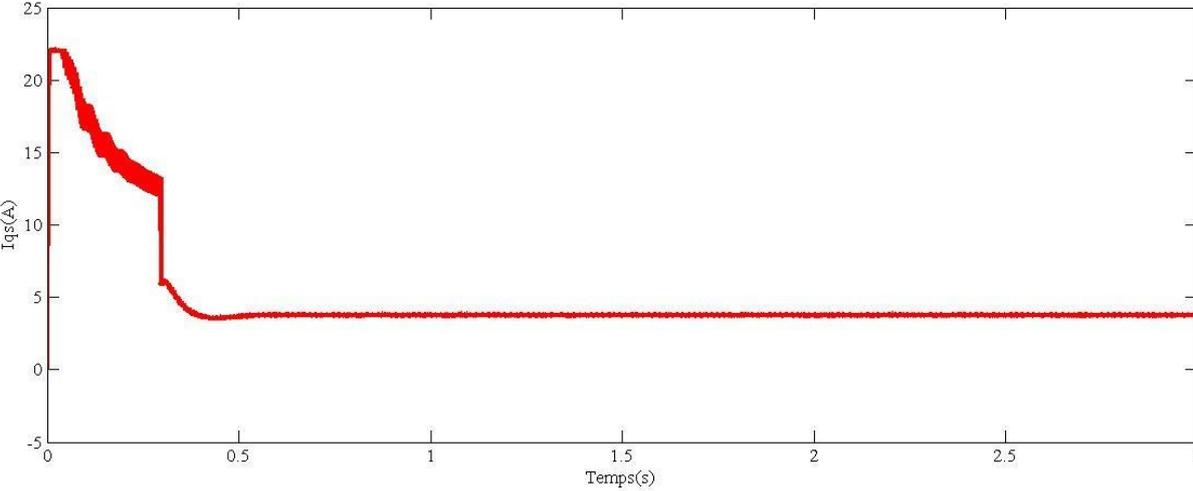
De plus, la tension du bus continu est régulée et suit la consigne fixée à 230 V (la figure III-14 C).

Il est également intéressant de noter que le courant  $i_d$  est quasiment nul et qu'il suit sa référence (la figure III-14 D), ce qui confirme l'application de la commande vectorielle à la MSAP.

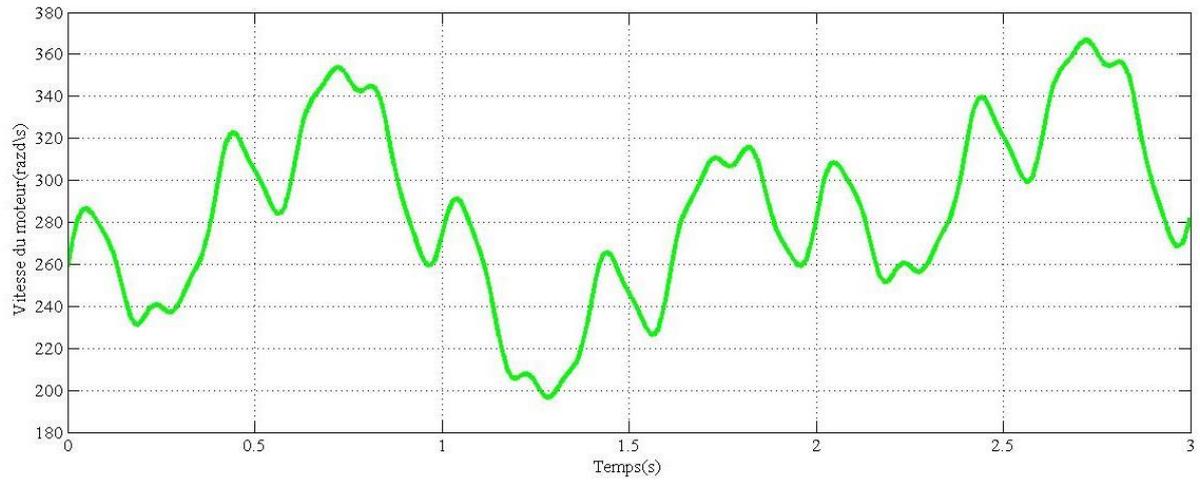
La figure III-16 illustre le comportement de la machine asynchrone synchronisée (MAS) avec la régulation de vitesse, ainsi que l'effet d'un couple de charge appliqué par la pompe.



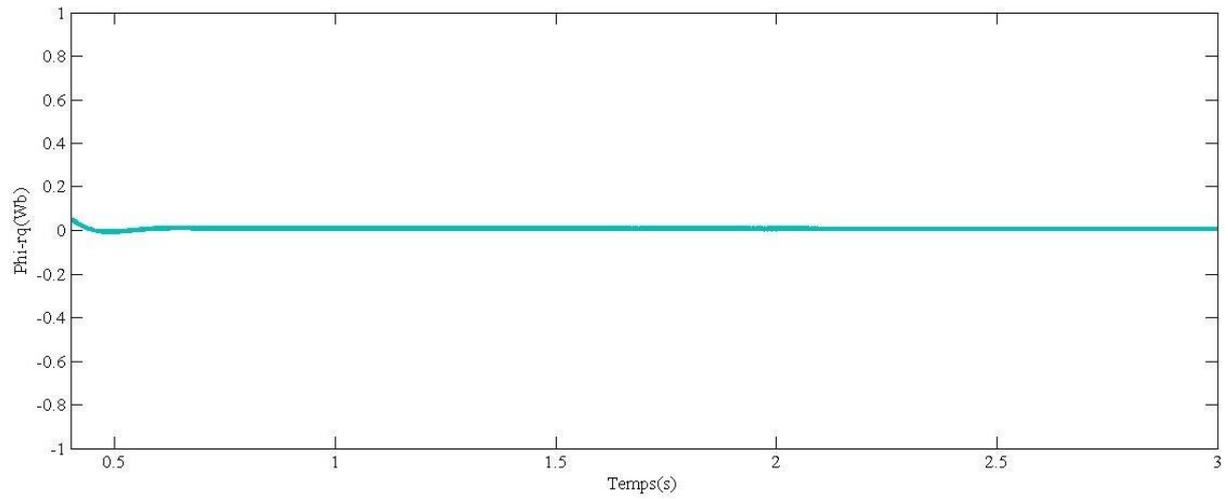
(A)



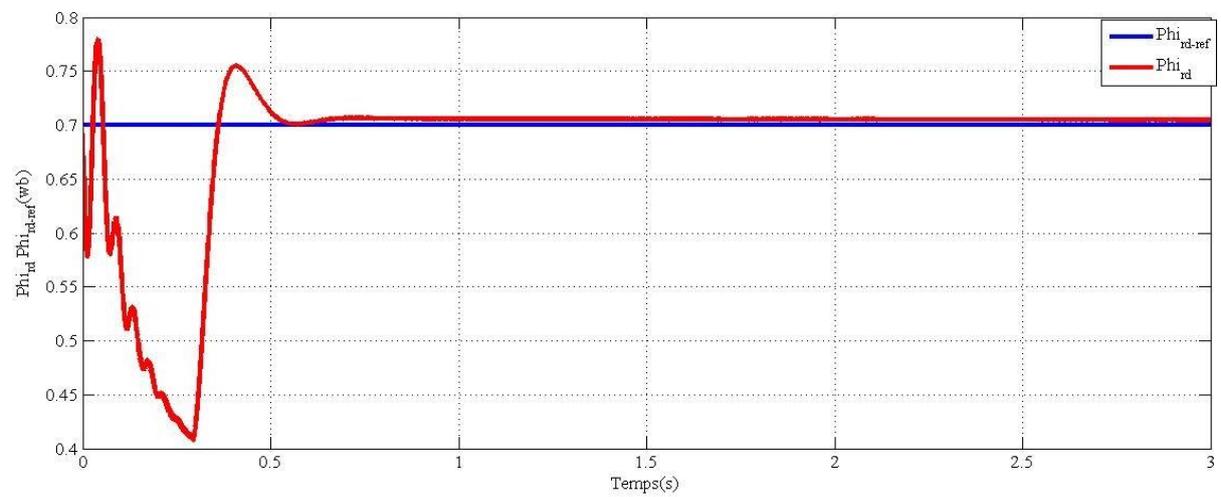
(B)



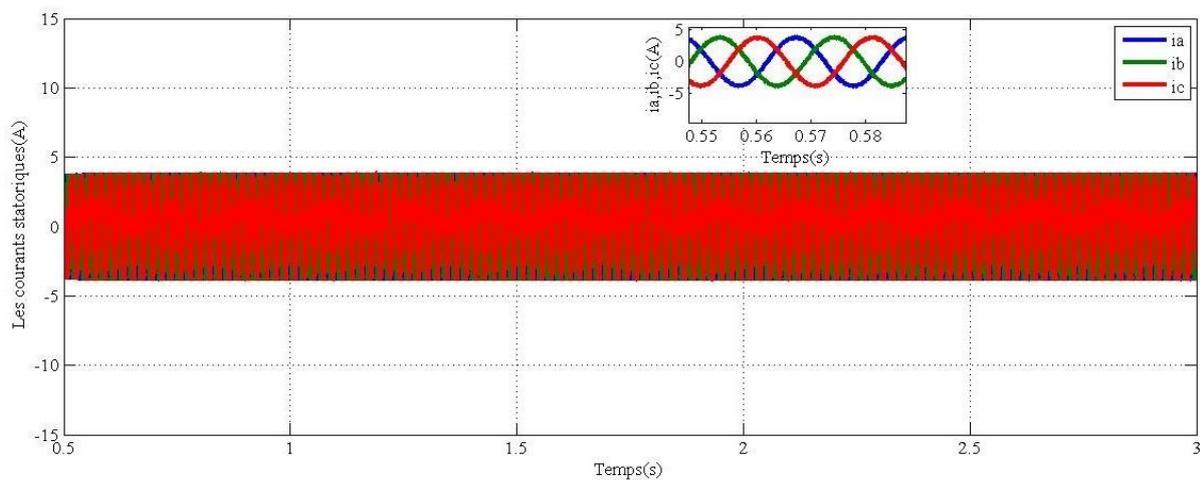
(C)



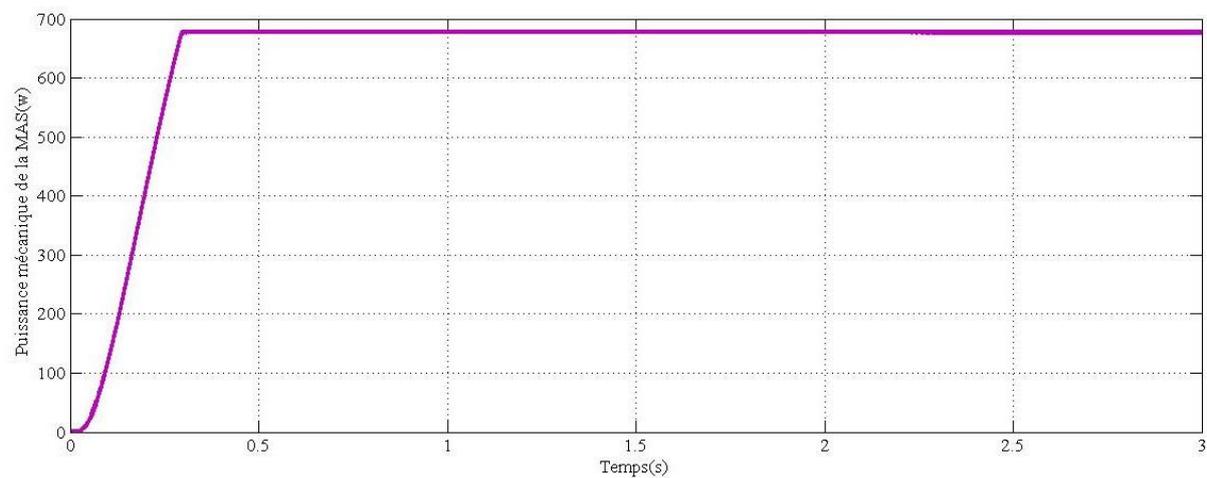
(D)



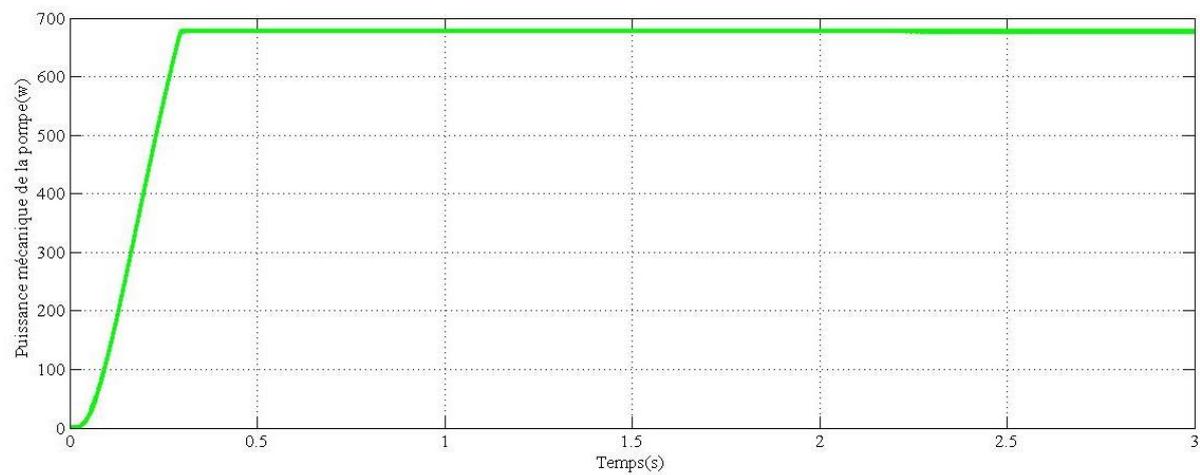
(E)



(F)



(G)



(H)

Figure III-16 : Résultats de simulation de du groupe motopompe(A,B,C,D,E,F,G,H)

Il est remarquable que la vitesse du moteur suive une forme similaire à celle du vent (Figure III.16-C).

Le couple électromagnétique, une fois le régime transitoire passé, est presque égal au couple de charge appliqué par la pompe (Figure III-16. A).

Pour les flux, on observe que le flux  $\phi_{rq}$  est quasiment nul et que le flux  $\phi_{rd}$  suit sa référence  $\phi_{rd_{ref}}$  (figure III-16. D.E)

Des courants d'appel élevés sont observés dans les courants statoriques, puis ils évoluent de manière sinusoïdale en régime permanent (Figure III-16. F).

Le courant en quadrature évolue de manière similaire au couple électromagnétique et suit approximativement sa référence une fois le régime établi (Figure III-16. B).

La puissance de la pompe et la puissance de la machine asynchrone (MAS) sont identiques (Figure III-16. G, H).

### III.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé une commande du côté de la génératrice pour suivre la puissance maximale générée par une éolienne à vitesse variable en utilisant la technique du point de puissance maximal (MPPT). La génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) a été contrôlée à l'aide de la commande vectorielle, ce qui nous a permis de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur pour assurer une tension constante et stable, indépendamment des perturbations engendrées par la vitesse du vent, est on a appliqué une commande vectorielle par orientation du flux rotorique à la machine asynchrone à vitesse variable (MAS), avec pour objectif la régulation de la vitesse.

Enfin, la deuxième partie était dédiée à la simulation de l'ensemble de la chaîne de pompage.

### Conclusion générale

L'objectif de ce mémoire de fin d'études est d'optimiser et contrôler le système de pompage éolien, Le travail est organisé en trois chapitres distincts :

Le premier chapitre de ce mémoire s'est concentré sur la technologie de pointe en matière de conversion de l'énergie éolienne. Dans notre étude, nous avons spécifiquement choisi une éolienne tripale à axe horizontal avec un entraînement direct, basée sur un générateur synchrone à aimants permanents comportant un grand nombre de paires de pôles et une vitesse variable.

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, on s'est focalisé sur la modélisation des différents éléments constituant le système de pompage éolien à vitesse variable, Une attention particulière est accordée à la modélisation détaillée de chacun de ces composants afin de comprendre leur fonctionnement et leur interaction au sein du système global de pompage éolien.

Dans le troisième chapitre, on a abordé l'optimisation et la simulation de notre système de pompage éolien. En utilisant la stratégie de contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking), nous sommes parvenus au maintien le coefficient de puissance à une valeur optimale, même lorsque la vitesse du vent est inférieure à la vitesse nominale. Nous avons introduit aussi le concept de contrôle vectoriel appliqué au générateur synchrone à aimants permanents (GSAP) cette commande nous a permis l'obtention d'un contrôle précis et dynamique du couple et de la vitesse de la GSAP, nous utilisons cette technologie de commande pour réguler la tension du bus continu à la sortie du convertisseur à modulation de largeur d'impulsion (MLI). On a expliqué également le principe du contrôle vectoriel indirect à flux rotorique orienté et du découplage par retour d'état pour les moteurs asynchrones à cage d'écureuil, Ce contrôle vectoriel indirect nous a donné la possibilité de contrôler de manière précise le flux magnétique dans notre machine asynchrone en ajustant le courant rotorique. Cela permet de réguler efficacement le flux magnétique et d'optimiser les performances de la machine en termes d'efficacité énergétique et de réduction des pertes.

---

**BIBLIOGRAPHIE**

- [1] <https://i.pinimg.com/originals/99/93/ec/9993ec5d542db169c37578c5ef3b43a9.jpg>
- [2] O. **Akrabou** et B. **Aichaoui** « Etude des paramètres métrologiques intervenant dans la simulation d'un parc éolien-cas du site d'adrar », Mémoire de fin d'étude, Université de adrar 2017
- [3] <https://www.researchgate.net/publication/337907494/figure/fig2/AS:835250884194305@1576150737279/4-Les-elements-principaux-dune-eolienne.png>
- [4] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – Intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004
- [5] <https://www.researchgate.net/publication/330225602/figure/fig3/AS:712911156682759@1546982673757/Eolienne-a-axe-horizontal-28.png>
- [6] <https://www.diwatt.fr/scripts/files/63f39eaf4933c9.39279236/eolienne-axe-vertical-helix--1.jpg>
- [7] **S. Bellarbi** ; « Estimation technico-économique de la production d'électricité par Voie éolienne, intégrée aux réseaux interconnectés de transport électrique » ; thèse de doctorat en physique ; université Aboubekr Belkaid de Tlemcen.
- [8] **A. Ziami** ; « optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimant permanents » ; conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc ; 2014.
- [9] <https://sites.uclouvain.be/lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/DifferentesTechnologies/DifferentesTechnologiesEolien2.htm>
- [10] K. **Idjdarene** << Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eolien autonomes >> Thèse de Doctorat Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, Université Lille 1, 2010
- [11] **M.T. Latreche** « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un Système Eolien », Mémoire de magister, Université de Sétif 2012
- [12] <https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/moteursynchrone1.gif>

- [13] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Machine\\_asynchrone\\_8\\_kW.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Machine_asynchrone_8_kW.jpg)
- [14] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/Stator\\_and\\_rotor\\_by\\_Zureks.JPG/1024px-Stator\\_and\\_rotor\\_by\\_Zureks.JPG](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/58/Stator_and_rotor_by_Zureks.JPG/1024px-Stator_and_rotor_by_Zureks.JPG)
- [15] <https://www.syl.ru/misc/i/ai/176908/688005.jpg>
- [16] <https://www.researchgate.net/publication/354169480/figure/fig1/AS:1061440857329669@1630078629455/Rotor-de-la-machine-asynchrone-triphasee-a-cage.png>
- [17] [https://eolienne.f4jr.org/\\_media/boite\\_de\\_vitesse.jpg?cache=](https://eolienne.f4jr.org/_media/boite_de_vitesse.jpg?cache=)
- [18] <https://www.researchgate.net/publication/258049959/figure/fig1/AS:297350993072138@1447905409913/Coefficient-aerodynamique-de-puissance-en-fonction-de-la-vitesse-de-rotation-normalisee.png>
- [19] **A. Daoud** « Contrôle de la puissance d'un générateur photovoltaïque pour le pompage solaire » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Boudiaf, Oran 2013
- [20] **A. Hachemi** « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système hybride dédié au pompage » Thèse de Doctorat Université Mohamed Khider, Biskra, 2017
- [21] <https://www.researchgate.net/publication/342466115/figure/fig1/AS:906581168365568@1593157202170/Schema-dune-pompe-centrifuge.jpg>
- [22] <https://www.tech-pompes.fr/wp-content/uploads/2016/03/NSCF-1.jpeg>
- [23],[24] **L. Allouti et M. Adour** « Etude et maximisation d'un système éolien » Mémoire De Fin D'études, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2013 ;
- [25] **M. Slimanou et I. Chelghoumm** « Etude d'un système de pompage éolien à base de deux machines synchrones à aimants permanents » Mémoire De Fin D'études, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2019 ;
- [26] **H. Mesloub** « Commande DTC Prédictive D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, 2016 ;
- [27] [28] **T. Rekioua** « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents » Thèse de Doctorat de l'INPL Nancy, 1991 ;

- [29] **S. Chikha** « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne » Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 2017 ;
- [30] **N. Hamdi** « Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes », Mémoire de magister, Université de Constantine, 2008.
- [31] **M. Behnous** et **L. Nasri** « Contrôle d'un système de pompage éolien » Mémoire De Fin D'études, Université Abderrahmane Mira De Bejaia, 2016 ;
- [32] **S. Chikha** « Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne » Thèse de Doctorat, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, 2017 ;
- [33] **A. Boukhelifa** « Les éléments d'optimisation du pilotage d'une machine asynchrone en vue d'un control vectoriel » mémoire de magistère, Ecole nationale polytechnique, 2007.
- [34] **C. Serir** « Optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », mémoire de magister en Electromécanique université A. MIRA Bejaïa, 2012

## Annexe

### Paramètres de la turbine éolienne

La turbine utiliser dans ce mémoire est une turbine tripale à axe horizontal, ses caractéristiques sont les suivantes :

$$C_p = 0.384, \lambda = 2.8, R = 1.283m, P_n = 2.1 kW$$

### Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents

$$P_n = 2kW \quad J=0.011$$

$$R_s = 5 \Omega$$

$$L_d = 0.0025 H$$

$$L_q = 0.0025 H$$

$$\varphi = 0.00014 Wb$$

$$P = 12$$

### Paramètres du moteur asynchrone a cage d'écureuil

$$R_s=4.580\Omega \quad p=2$$

$$R_r=3.865 \Omega \quad M=0.258$$

$$L_s=0.274 \quad C=10^{-3}=0.001$$

$$L_r=0.274 \quad \varphi = 0.7022$$

$$f=0.00114$$

$$J=0.031$$

### Paramètre de la pompe

$$d=0.06 \quad g=9.81$$

$$\psi=6.3$$

$$L=8.4$$

$$L_{\text{Landau}}=0.036$$

## Résumé

Dans ce mémoire de fin d'étude se concentre sur l'optimisation d'un système de pompage éolien, une application de l'énergie éolienne utilisée pour le pompage de l'eau. L'objectif principale de ce projet est d'améliorer l'efficacité est la performance de notre système. Pour cela on a appliqué une MPPT pour notre turbine éolienne pour une production de puissance maximale ainsi une commande vectorielle pour la génératrice synchrone a aimant permanent et le moteur asynchrone a cage d'écureuil ce qui nous a permis l'obtention d'un contrôle précis et dynamique du couple et de la vitesse.

In this final thesis focuses on the optimization of a wind pumping system, an application of wind energy used for water pumping. The main objective of this project is to improve efficiency is the performance of our system. For this we applied a MPPT for our wind turbine for maximum power production as well as a vector control for the synchronous generator has permanent magnet and the asynchronous motor has squirrel cage which allowed us to obtain precise control and torque and speed dynamics.