

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algerienne Democratique Et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique

## MEMOIRE

Présenté

pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : Electrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par :

**MOUMENI CHAIMA**

**LEMITA INESS**

**Sujet**

***MODELISATION ET SIMULATION D'UNE CHAINE DE  
CONVERSION EOLIENNE***

Présenté et soutenu, le 22 / 06 / 2021, devant le jury composé de :

Mr. Dib Djalel	Prof	Président
Melle. Yousfi Laatra	MCB	Rapporteur
Mme. Bouguerne Abla	MCB	Examineur

Promotion : 2020/2021

## Dédicace

Afin d'être reconnaissant envers ceux qui m'ont appuyé et encouragé à effectuer ce travail de recherche, je dédie ce mémoire :

À mon très cher père pour son soutien moral, et pour tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.

À ma très chère mère.

À tous les membres de ma famille sans aucune exception.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

Je dédie ce mémoire à mes parentes en premiers :

À mon oncle qui a disparu il n'y a pas long temps, j'espère qu'Allah lui fasse sa Miséricorde.

À ma maman qui était toujours à mes côtés dans les beaux et les mauvais moments.

À mes frères ; Farid, Mourad, Abdallah et Samir.

Je dédie ce mémoire à tous mes professeurs durant toute ma scolarité.

Je dédie aussi ce mémoire à toutes mes amies surtout Chaima et Bouthaina.

## Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux le Très Miséricordieux. Tout d'abord nous remercions Allah le Tout Puissant, Celui Qui nous a accordé la réussite d'accomplir ce mémoire.

Nous tenons à remercier notre encadreur de mémoire Mlle. Yousfi Laatra, Maître de conférence à l'université de Tébessa pour son aide et ses conseils constructifs.

Nous tenons à remercier monsieur le président de Jury Dib Djalel, Professeur à l'université de Tébessa d'avoir accepté de juger notre travail.

Nous tenons à remercier l'examinatrice Madame Bouguerne Abla, Maître de conférence à l'université de Tébessa d'avoir accepté d'examiner notre travail.

Nous tenons particulièrement à remercier Monsieur Lemita Abdallah, Maître assistant à l'université de Tébessa qui nous a beaucoup aidés à accomplir notre travail.

*Listes des symboles :*

*Turbine :*

$P_{vent}$	Puissance du vent.
$P_{turbine}$	Puissance produit par la turbine.
$C_p$	Coefficient de puissance.
$\Omega_{Turbine}$	Vitesse de la turbine
$\rho$	masse volumique de l'aire.
$C_{aer}$	Couple produit par l'aérogénérateur.
$\lambda$	Rapport de vitesse.
$k$	Paramètre de forme caractérise la répartition du vent.
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking.
$f$	Le coefficient de frottement du rotor de la génératrice.
$\beta$	L'angle de calage.
$R$	Rayon de la turbine
$S$	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
$V$	Volume balayée par le rotor de l'éolienne
$\Omega_s$	La vitesse de synchronisme
$\Omega_{Turbine\_estimée}$	Vitesse mécanique estimée de la turbine
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique
$v_v$	Vitesse du vent
$v_{estimée}$	Vitesse du vent estimée
$G$	Rapport de multiplication
$J$	Moment d'inertie totale

*MADA :*

$C_{aer} [N.m]$	Couple aérodynamique de l'éolienne
$C_{mec} [N.m]$	Couple mécanique total appliqué au rotor de l'éolienne
$C_{vis} [N.m]$	Couple des frottements visqueux
$C_{em} [N.m]$	Couple électromagnétique
$C_{em\_reff\_} [N.m]$	Couple électromagnétique référence

$\theta$	Angle entre l'axe de la phase du premier enroulement statorique et l'axe du rotor.
$\theta_s$	Angle entre l'axe de la première phase de l'enroulement Statorique et l'axe d
$\theta_r$	Angle entre l'axe de la première phase du rotor et l'axe d.
$\omega$	Vitesse de rotation électrique ( $\omega = p\Omega$ )
$\omega_s, \omega_r$	Pulsation électrique statorique et rotorique
$P_s[\text{w}]$	La puissance active au stator
$Q_s[\text{VAR}]$	La puissance réactive au stator
$g$	Glissement
$I[\text{A}]$	Courant
$[\text{wb}]$	Flux
$M[\text{H}]$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe A coïncide avec l'axe a ( $\theta=0$ )
$L_s$	Inductance de chaque enroulement du stator
$L_r$	Inductance de chaque enroulement du rotor
$R_s$	Résistance de chaque enroulement du stator
$R_r$	Résistance de chaque enroulement du rotor
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}[\text{wb}]$	Flux statorique selon l'axe d,q
$\Phi_{rd}, \Phi_{rq}[\text{wb}]$	Flux rotorique selon l'axe d,q
$V_{sd}, V_{sq}[\text{V}]$	Tension statorique selon l'axe d,q
$V_{rd}, V_{rq}[\text{V}]$	Tension rotorique selon l'axe d,q
$I_{sd}, I_{sq}[\text{A}]$	Courant statorique selon l'axe d,q
$I_{rd}, I_{rq}[\text{A}]$	Courant rotorique selon l'axe d,q
$p$	Nombre de paire de pole de la MADA
$f_r [\text{HZ}]$	Fréquence de rotor
$f_s[\text{HZ}]$	Fréquence de stator
$K_p, K_i$	Constantes du régulateur PI
$\tau$	Temps de réponse du système

*Liste des tableaux :*

*Chapitre I : GENERALITES SUR LES*

*SYSTEMES EOLIENS*

<b><i>Tableau</i></b>	<b><i>Titre</i></b>	<b><i>P</i></b>
<b><i>Tableau (1 .1)</i></b>	Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical	7
<b><i>Tableau (1 .2)</i></b>	Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal	9
<b><i>Tableau (1 .3)</i></b>	Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et variable	12
<b><i>Tableau (1 .4)</i></b>	Avantages et inconvénients de génératrice éolienne à vitesse et variable	12
<b><i>Tableau (1 .5)</i></b>	Avantages et inconvénients d'une éolienne à base d'une MAS	13
<b><i>Tableau (1 .6)</i></b>	Avantages et inconvénients d'une éolienne à base d'une MADA	14
<b><i>Tableau (1 .7)</i></b>	Avantages et inconvénients d'une éolienne à base d'une MAS	15

## **CHAPITRE I :**

# **GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS**

<b>Figure (1.1): Conversion de l'énergie cinétique du vent.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure (1.2) : Le développement de l'énergie éolienne.....</b>	<b>5</b>
<b>Figure (1.3): Différents types de tour.....</b>	<b>7</b>
<b>Figure (1.4): Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure (1.5): Les types d'éoliennes à axe vertical.....</b>	<b>10</b>
<b>Figure (1.6): Les types d'éoliennes à axe horizontal.....</b>	<b>12</b>
<b>Figure (1.7): Eoliens à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure (1.8): Eoliens à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure (1.9): Machine asynchrone avec liaison directe au réseau.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure (1.10): Machine Asynchrone à Double Alimentation.....</b>	<b>16</b>
<b>Figure (1.11): Eolienne à base d'une génératrice synchrone.....</b>	<b>17</b>

## **CHAPITRE II :**

# **MODELISATION ET SIMULATION DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE**

<b>Figure 2.1: Architecture globale d'une éolienne.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure 2.2 : Bloc de simulation du profil de vitesse du vent.....</b>	<b>21</b>

<b>Figure 2.3 : Profil de la vitesse du vent.....</b>	<b>22</b>
<b>Figure 2.4: Différent partie de la turbine.....</b>	<b>23</b>
<b>Figure 2.5: Coefficient de puissance pour différents angles de calages.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure 2.6 : Modèle de la turbine éolienne.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure 2.7: schéma bloc général de la turbine sous Matlab/Simulink.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 2.8: Profil de la Vitesse constante du vent.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 2.9: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine..... (vitesse du vent constante).....</b>	<b>28</b>
<b>Figure 2.10 : Profil de la Vitesse constante du vent.....</b>	<b>29</b>
<b>Figure 2.11: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine...30</b>	
<b>Figure 2.12: Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent.....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 2.13: Schéma bloc de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse.....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 2.14: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse.....</b>	<b>34</b>
<b>Figure 2.15: Schéma bloc de la turbine avec MPPT par asservissement de la vitesse.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 2.16: Schéma bloc de régulation de la vitesse mécanique.....</b>	<b>35</b>
<b>Figure 2.17: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine avec MPPT avec asservissement de la vitesse.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 2.18: Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 2.19: Les courants statoriques.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 2.20: Les flux statoriques.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 2.21: Les courants rotoriques.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 2.22: Les flux rotoriques.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 2.23: Vitesse de rotation et couple électromagnétique.....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 2.24: Puissance active et réactive.....</b>	<b>43</b>

## CHAPITRE III : COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA

<b>Figure 3. 1 : Principe de la commande vectorielle.....</b>	<b>46</b>
<b>Figure 3.2 : Mode de fonctionnement de MADA.....</b>	<b>47</b>
<b>Figure 3.3 : Orientation de la tension et de flux statorique.....</b>	<b>48</b>
<b>Figure 3.4: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure. 3.5: Schéma bloc de la commande directe.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure 3.6: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure 3.7: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 3.8: Schéma bloc du correcteur PI.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure 3.9: Courbes obtenus par simulation de la commande de la GADA seule.....</b>	<b>59</b>
<b>(cas d'une régulation de puissances).....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 3.10: Courbes obtenus par simulation de la commande de la GADA seule.....</b>	<b>61</b>
<b>(cas d'une poursuite de puissances).....</b>	<b>61</b>
<b>Figure 3.11: Courbes obtenus par simulation du modèle de la GADA avec turbine.....</b>	<b>63</b>

## Résumé

Dans ce mémoire, nous nous sommes intéressés par la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Des modèles mathématiques de chaque partie de la chaîne sont développées et simulées sous Matlab/Simulink. En plus, la commande des puissances active et réactive de la GADA est effectuée afin d'assurer un fonctionnement optimal. Pour cette raison, nous avons utilisé la commande vectorielle indirecte basée sur l'orientation du flux statorique. Les résultats de simulation de la chaîne de conversion globale (turbine et GADA) ont montrés la validité des modèles proposés.

### Mots clés:

Chaîne de conversion éolienne, Turbine, GADA, Commande Vectorielle Indirecte, Orientation du flux statorique

## Abstract

In this thesis, we are interested in the modeling and the simulation of a wind power conversion chain based on a doubly fed induction generator (DFIG). Each part of the conversion chain is transferred into mathematical model and simulated under Matlab / Simulink. In addition, the active and reactive power control of the DFIG is carried out in order to ensure an optimum operation. For this reason, we have used indirect vector control based on the stator flux orientation. The simulation results of the global chain (turbine and DFIG) have shown the validity of the proposed models.

### Keywords

Wind power conversion chain, Turbine, DFIG, Indirect vector control, stator flux orientation.

## ملخص

في هذه الأطروحة ، نحن مهتمون بنمذجة ومحاكاة سلسلة تحويل طاقة الرياح بناء على مولد غير متزامن مزدوج التغذية (GADA). تم تطوير ومحاكاة النماذج الرياضية لكل جزء من السلسلة تحت Matlab / Simulink. بالإضافة إلى ذلك ، يتم تنفيذ التحكم في الاستطاعة الفعالة و الغير فعالة للـ GADA من أجل ضمان التشغيل الأمثل. لهذا السبب ، استخدمنا التحكم الشعاعي الغير مباشر في المتجه بنا على اتجاه تدفق الجزء الثابت. أظهرت نتائج المحاكاة لسلسلة التحويل العالمية ( التوربينات و GADA) صحة النماذج المقترحة.

### الكلمات المفتاحية:

سلسلة تحويل توربينات الرياح, توربين, مولد لاتزامني مزدوج التغذية, التحكم الشعاعي الغير مباشر, اتجاه تدفق الجزء الثابت.

---

# CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2. Définition de l'énergie éolienne.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3. Développement de l'énergie éolienne.....</b>	<b>5</b>
<b>I.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.1. Les avantages.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.2. Les inconvénients.....</b>	<b>6</b>
<b>I.5. Constitution d'une éolienne « classique ».....</b>	<b>7</b>
<b>I.6. Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....</b>	<b>8</b>
<b>I.7. Les différents types d'éoliennes.....</b>	<b>9</b>
<b>I.7.1. Selon la structure.....</b>	<b>9</b>
<b>I.7.2. Selon le mode de fonctionnement.....</b>	<b>12</b>
<b>I.8. Machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens.....</b>	<b>14</b>
<b>I.8.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil.....</b>	<b>14</b>
<b>I.8.2. Machine asynchrone à double alimentation (MADA).....</b>	<b>15</b>
<b>I.8.3. Machine synchrone.....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.4. Intérêt de la MADA.....</b>	<b>17</b>
<b>I.9. Conclusion.....</b>	<b>17</b>

---

## **CHAPITRE II :**

# **MODELISATION ET SIMULATION DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE**

<b>II.1. Introduction .....</b>	<b>20</b>
<b>II.2. Modélisation d'un système éolien.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.1. Modélisation de la vitesse du vent.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.2. Modélisation de la turbine .....</b>	<b>22</b>
<b>1. Modèle de la turbine .....</b>	<b>23</b>
<b>2. Modèle du multiplicateur .....</b>	<b>25</b>
<b>3. Modèle de l'arbre .....</b>	<b>26</b>
<b>4. Simulation de la turbine.....</b>	<b>26</b>
<b>5. Simulation pour une vitesse de vent constante .....</b>	<b>26</b>
<b>6. Simulation pour une vitesse de vent variable.....</b>	<b>29</b>
<b>7. Poursuite du point de maximum de puissance (Maxima Power Point Tracking MPPT) .....</b>	<b>31</b>
<b>a.MPPT d'une turbine tripale sans asservissement de vitesse .....</b>	<b>32</b>
<b>b.MPPT d'une turbine tripale avec asservissement de vitesse.....</b>	<b>34</b>
<b>II.2.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) ....</b>	<b>39</b>
<b>1. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère triphase .....</b>	<b>39</b>
<b>2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère biphase .....</b>	<b>40</b>
<b>3. Simulation.....</b>	<b>41</b>

---

<b>II.3. Conclusion .....</b>	<b>44</b>
-------------------------------	-----------

## **CHAPITRE III : COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA**

<b>III.1. INTRODUCTION.....</b>	<b>46</b>
<b>III.2. Principe de la commande vectorielle de la GADA.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3. Mode de fonctionnement de MADA.....</b>	<b>46</b>
<b>III.3.1. Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone .....</b>	<b>47</b>
<b>III.3.2. Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone.....</b>	<b>47</b>
<b>III.3.3. Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone.....</b>	<b>47</b>
<b>III.3.4. Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone.....</b>	<b>47</b>
<b>III.4. Modèle de la GADA pour le contrôle indépendant des puissances....</b>	<b>47</b>
<b>III.5. Types de commande vectorielle .....</b>	<b>48</b>
<b>III.5.1. Commande vectorielle directe .....</b>	<b>51</b>
<b>III.5.2. Commande indirecte des puissances active et réactive .....</b>	<b>51</b>
<b>III.6. Partie simulation.....</b>	<b>52</b>
<b>III.6.1. Commande de la GADA seule .....</b>	<b>57</b>
<b>a. Cas d'une régulation de puissances .....</b>	<b>57</b>
<b>III.6.2. Résultats de simulation de la chaine globale .....</b>	<b>62</b>
<b>III.7. Conclusion .....</b>	<b>64</b>

### Introduction générale :

La production de l'énergie électrique dans le monde génère diverses pollutions. Ainsi, les centrales thermiques (charbon, pétrole) sont responsables de rejets atmosphériques liés à la combustion d'énergies fossiles. A l'opposé, les centrales nucléaires, dont le développement s'intensifie suite à la crise du pétrole, n'ont pas d'influence néfaste sur la qualité de l'air. Par contre, elles produisent des déchets radioactifs qui engendrent d'importants problèmes de stockage, de traitement ou de transport. Aujourd'hui, la crainte de n'utiliser qu'une seule énergie avec tous ses risques, la prise de conscience des risques pour l'environnement, l'engouement pour les énergies dites renouvelables et l'ouverture du marché de la production d'énergie électrique sont autant de facteurs qui redonnent une place importante à ces énergies (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse, ...) dans la production de l'électricité [29].

La production d'électricité par l'énergie éolienne intéresse de plus en plus les pays afin de produire une énergie propre et durable, et l'état avancé des recherches dans le domaine éolien montre une volonté de développer des éoliennes toujours plus puissantes et capables de capter au mieux la puissance disponible dans le vent, beaucoup de recherches sont faites et se font en ce moment sur les stratégies des différentes chaînes de conversion utilisées pour la production d'électricité éolienne. Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cette dernière permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. Ces éoliennes sont aussi équipées d'hélices à angle de calage de pale variable pour s'adapter aux conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT (maximum power point tracking) [30].

L'objectif principal de notre travail consiste à la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, nous avons choisi que cette chaîne soit associée à une génératrice à double alimentation. La commande de cette dernière est réalisée en utilisant une commande vectorielle indirecte en puissance. A fin de finaliser notre étude, nous avons fait l'étude de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau électrique.

Dans le but d'atteindre notre objectif, notre mémoire est organisée en trois chapitres.

Dans **le premier chapitre**, nous avons présenté une introduction sur l'énergie éolienne avec sa définition, son développement et ses avantages et inconvénients, nous avons aussi détaillé la constitution d'une éolienne classiques et son principe de fonctionnement.

Nous avons vu à travers ce chapitre les différents types des éoliennes et les machines qui peuvent être associées à ses éoliennes dans une chaîne de conversion.

**Le second chapitre** est dédié à l'étude des éléments essentiels de la chaîne éolienne. Elle est constituée de la turbine et la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et l'élaboration d'une commande adéquate pour le captage du maximum de puissance possible sont développés dans ce chapitre, en plus de la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. Les résultats de simulation de chaque modèle proposé sont mentionnés dans la section correspondante.

**Le troisième chapitre** sera consacré à la commande vectorielle pour la régulation des puissances active et réactive statoriques de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par une vitesse fixe (vitesse mécanique constante) et variable (avec turbine). En premier lieu, nous présentons les résultats de commande de la GADA dont le stator est alimentée par une source triphasée et le rotor est connectée à un onduleur triphasé MLI, l'alimentation continue de l'onduleur est supposée constante. Dans un second lieu, nous présentons le système complet constitué de : la turbine et la génératrice asynchrone double alimentation et convertisseur. Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink seront présentés.

Enfin, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui englobe les travaux effectués et des perspectives de recherche pour les travaux futurs.

# **CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS**

## **I.1. Introduction:**

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.

Ce chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens. Nous avons commencé par une définition de l'énergie éolienne et mentionner ses différents avantages et inconvénients. En plus, nous avons donné la constitution d'une éolienne et ces différents types. A la fin du chapitre, nous avons introduit les différentes topologies d'une éolienne à base des différentes machines.

## **I.2. Définition de l'énergie éolienne:**

Une éolienne est un dispositif qui convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique via un générateur. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La quantité d'énergie éolienne potentielle dépend de la vitesse du vent, car plus la vitesse du vent est élevée, plus la quantité d'énergie produite est élevée. Cela dépend également d'un certain nombre de facteurs tels que l'altitude, l'emplacement, la température de l'air et les caractéristiques de la surface de la Terre. Les zones côtières, les plaines plates, les sommets des collines et les cols de montagne sont souvent les endroits où les vents sont les plus favorables [1].

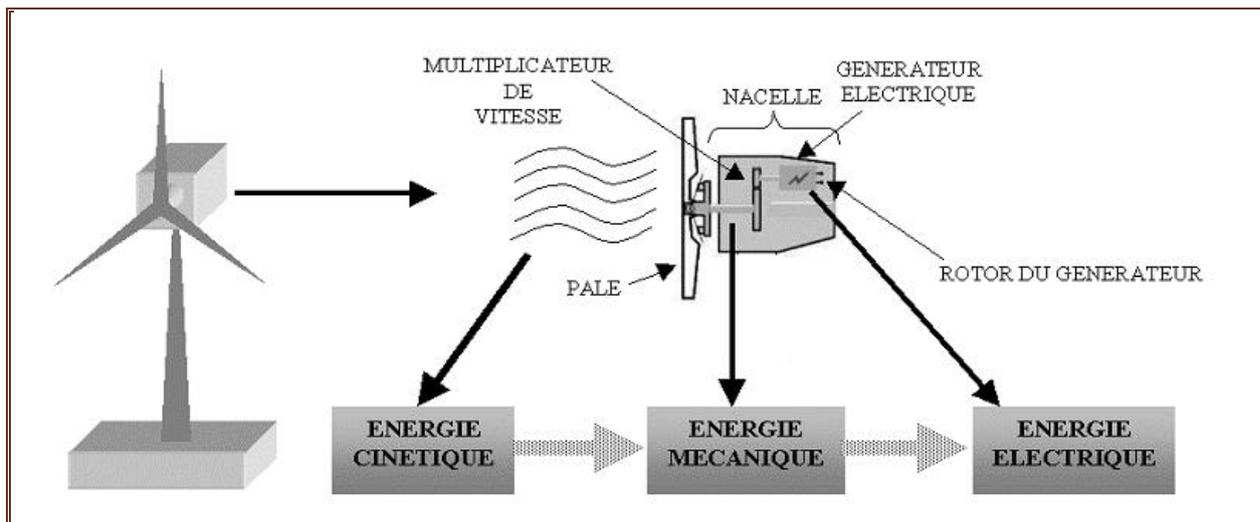


Figure (1.1): Conversion de l'énergie cinétique du vent

### I.3. Développement de l'énergie éolienne:

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne a considérablement augmenté dans le monde ces dernières années. Cela est dû à leurs avantages.

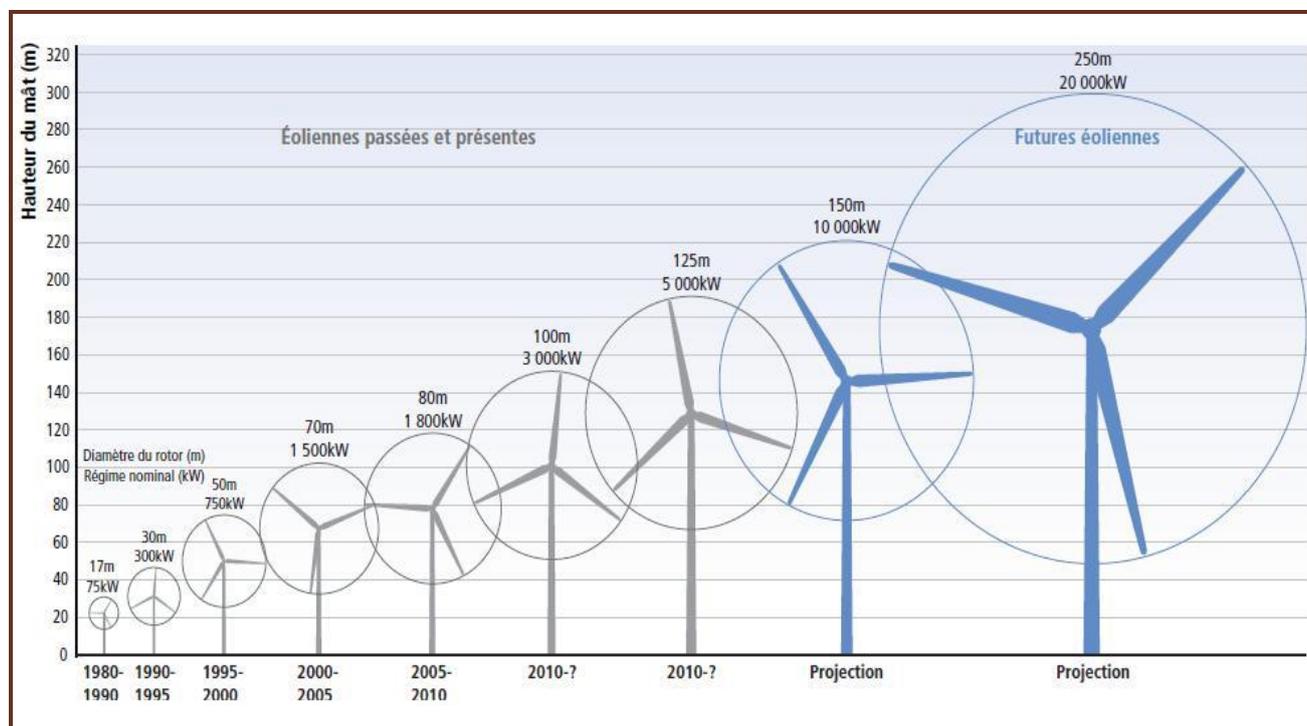


Figure (1.2) : Le développement de l'énergie éolienne

De 1980 à 1990, la quantité d'énergie produite est égale à 75 KW, et continue d'augmenter jusqu'à atteindre en 2010 la valeur de 5000 KW, puis augmente jusqu'à atteindre 20000 KW.

#### **I.4. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne:**

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

##### **I.4.1. Les avantages :**

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique et écologique [2], c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable [2].
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> [3], rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [4].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [5].

##### **I.4.2. Les inconvénients:**

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

- L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif [6]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [3].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [6], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [6].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.

- La source d'énergie éolienne étant stochastique [3], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien.

### I.5. Constitution d'une éolienne « classique »:

Une éolienne est généralement constituée des éléments principaux suivant :

- La tour ou le mât:** généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et pour bénéficier au maximum de l'énergie éolienne. Trois grands types de tour existent, à savoir : Tour mât haubané, Tour en treillis, Tour tubulaire [7].

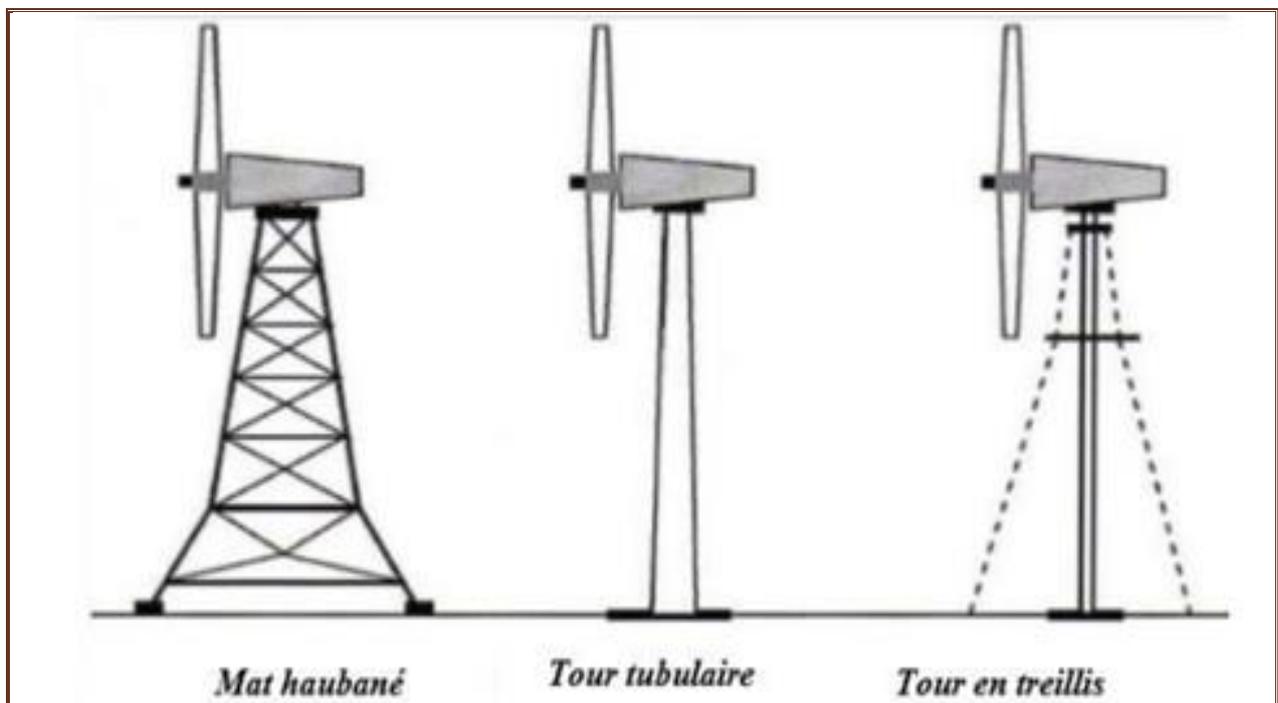


Figure (1.3): Déféréntes types de tour

- b. **La nacelle:** comprend tous les éléments mécaniques permettant le couplage de l'éolienne au générateur électrique: arbres lents et rapides, roulements, multiplicateur. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone [8].
- **Le multiplicateur:** il permet d'adapter la vitesse de l'éolienne à celle du générateur électrique [8].
- **Générateur:** Il s'agit d'un alternateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Il s'agit généralement soit d'une machine synchrone, soit d'une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné.[9]
- c. **Rotor:** Il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit, il est branché directement ou indirectement (via un multiplicateur de vitesse à engrenages) au système mécanique. Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.[10]

## I.6. Le principe de fonctionnement d'une éolienne:

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne. Ce couplage mécanique peut être soit direct si turbine et génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées. Le système de conversion éolien est également siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion.

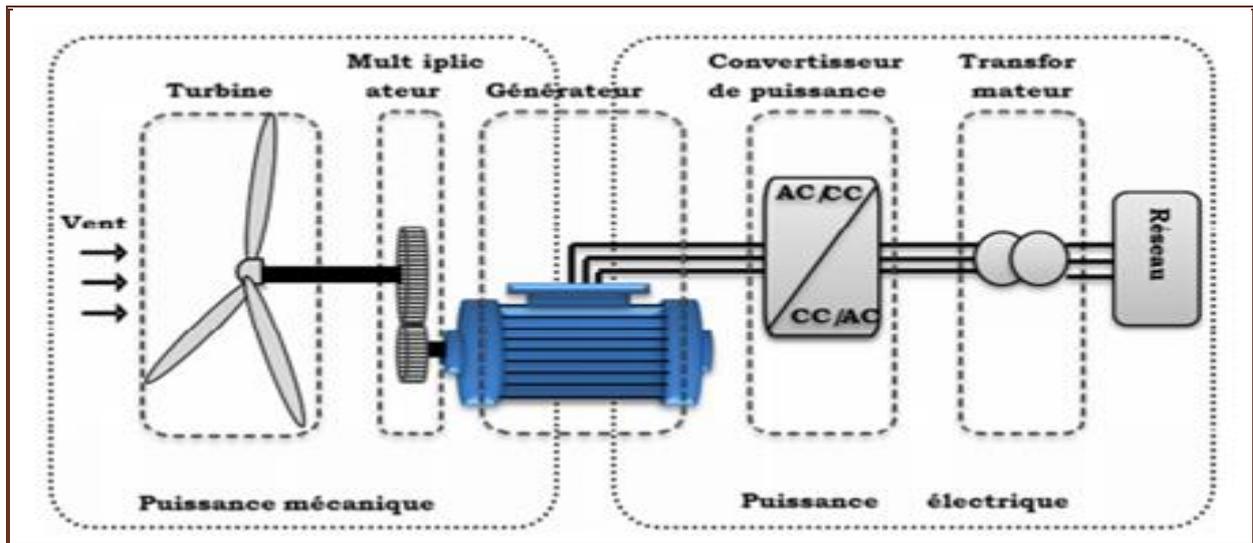


Figure (1.4): Le principe de fonctionnement d'une éolienne

## I.7. Les différents types d'éoliennes:

Les éoliennes peuvent être classées:

- Selon la structure: on distingue deux grands types d'éoliennes qui sont celles à axe vertical et celles à axe horizontal
- Selon le mode de fonctionnement: on trouve deux catégories qui sont les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

### I.7.1. Selon la structure:

#### a. Eoliennes à axe vertical [10]:

Les éoliennes à axe vertical ne nécessitent aucun système d'orientation par rapport à la direction du vent, mais sont, souvent très lourdes, soumises à de lourdes contraintes mécaniques de conception assez compliquée. Les longues lames sont entraînées par un arbre vertical massif.

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

- ❖ **Le rotor de Savonius:** dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.
- ❖ **Le rotor de Darrieus:** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de

directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

<b>Eoliennes à axe vertical</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.	Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner qu'elle que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor	La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.	Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

Tableau (1.1): Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

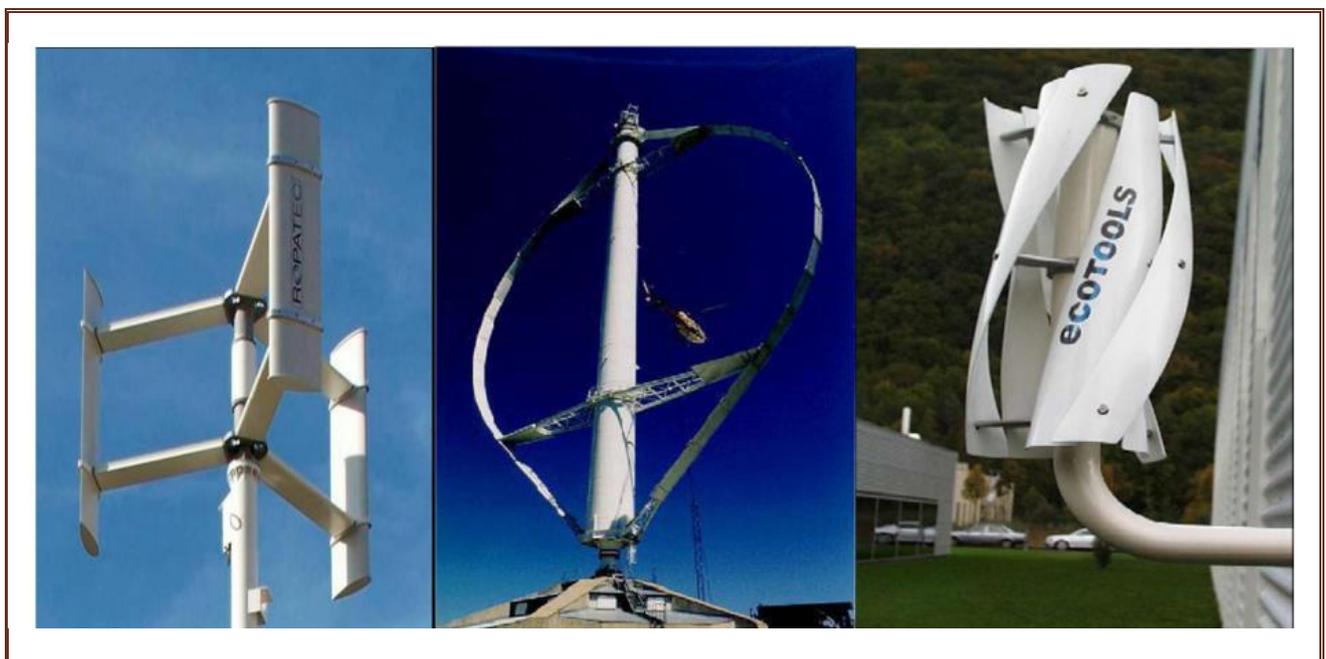


Figure (1.5): Les types d'éoliennes à axe vertical

#### b. Eoliennes à axe horizontal [11] :

Les éoliennes à axe horizontal sont de conception plus simple et ont un rendement élevé. Elles sont dès lors plus répandues. Leurs caractéristiques communes sont d'être montées au sommet d'un pylône et d'être équipées d'un système d'orientation dans le vent. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction du vent.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal:

- ❖ **Amont:** le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.
- ❖ **Aval:** le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances.

Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

<b>Eoliennes à axe horizontal</b>	
<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical	Coût de construction très élevé
Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol	L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident

Tableau (1.2): Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal



Figure (1.6): Les types d'éoliennes à axe horizontal

### I.7.2. Selon le mode de fonctionnement:

#### *a. Éolienne à vitesse fixe:*

Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue à peu près constante au moyen d'un système mécanique d'orientation des lames permettant au générateur (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connecté directement à la charge ( réseau) sans appareil électronique de puissance. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire pour magnétiser la machine à cage asynchrone.

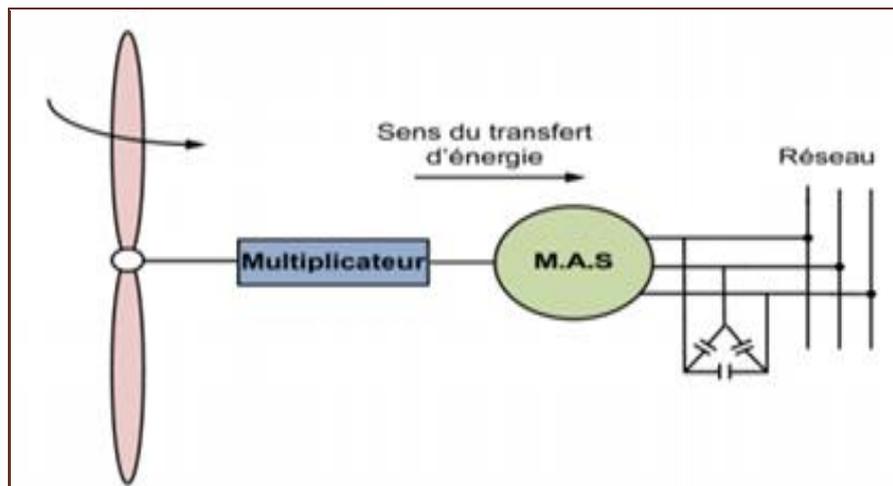


Figure (1.7): Eoliens à vitesse fixe basé sur la machine asynchrone à cage

*b. Éolienne à vitesse variable:*

Sont souvent moins chers car le système d'orientation des lames est simplifié. L'éolienne dans cette configuration entraîne un générateur asynchrone / synchrone connecté au réseau via un convertisseur de puissance situé sur le circuit du stator. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et fréquences en sortie du générateur ne sont plus imposées par le réseau, permettant de réguler la vitesse de la turbine. La commande de l'onduleur maintient la tension du bus CC constante.

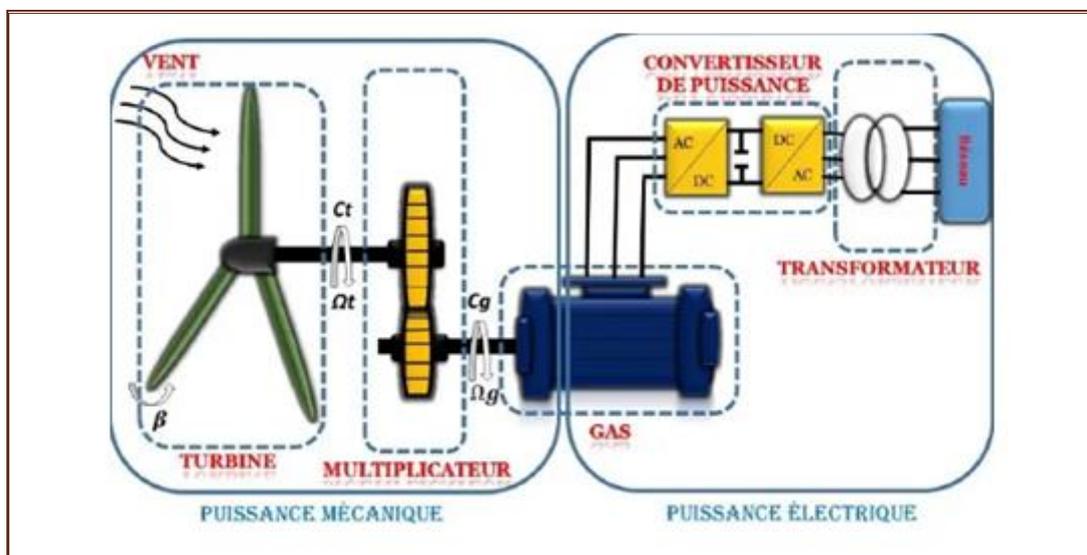


Figure (1.8): Eoliens à vitesse variable basé sur la machine asynchrone à cage

◆ *Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et variable:*

Vitesse fixe	Vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simplicité du système électrique</li> <li>- Plus grande fiabilité</li> <li>- Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne</li> <li>- Moins cher</li> <li>- Fonctionnement à vitesse variable (<math>\pm 30\%</math> de la vitesse nominale)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation du rendement énergétique</li> <li>- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance</li> <li>- Réduction des efforts subis par le train de puissance</li> <li>- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité</li> </ul>

Tableau (1.3): Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et variable

◆ **Topologies de génératrice éolienne à vitesse variable :**

Les trois types de topologies indéniables pour les éoliennes à vitesse variable sont: la machine asynchrone (MAS) avec deux convertisseurs est ensuite dimensionnée pour la pleine puissance avec un multiplicateur de vitesse (voir figure (1.7)), la machine asynchrone à double alimentation (MADA) (voir Figure (1.9)) et la machine synchrone (MS) avec et sans réducteur de vitesse illustré sur la figure (1.10). Une topologie consiste à connecter la MAS à cage d'écureuil au réseau via des convertisseurs statiques, un multiplicateur est associé à la machine.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elle possède un système électrique simple</li> <li>- Elle possède une très grande fiabilité</li> <li>- Elle est moins chère</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La puissance extraite est non optimisée</li> <li>- La magnétisation de la machine est imposée par le réseau</li> <li>- Il n'y a pas de contrôle de l'énergie réactive</li> </ul>

Tableau (1.4): Avantages et inconvénients de génératrice éolienne à vitesse variable

## I.8. Machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens:

### I.8.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil:

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau. Les machines électriques asynchrones à cage sont les plus simples à fabriquer [12].

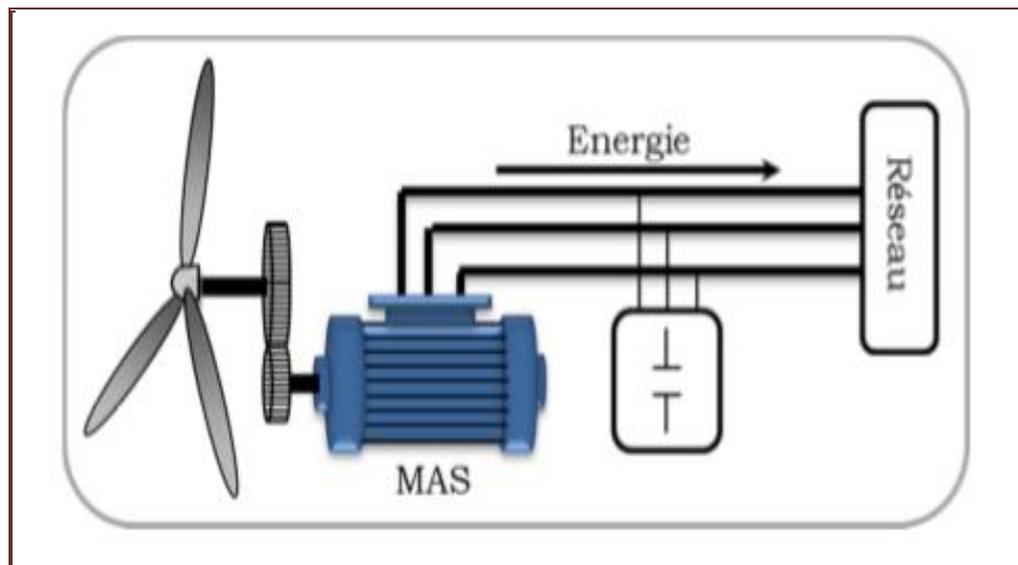


Figure (1.9): Machine asynchrone avec liaison directe au réseau

◆ Les avantages et les inconvénients:

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances.</li> <li>- Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien.</li> <li>- Elle possède une très grande fiabilité et robustesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La puissance extraite est non optimisée.</li> <li>- La magnétisation de la machine est imposée par le réseau.</li> <li>- Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.</li> </ul>

Tableau (1.5): Avantages et inconvénients d'une éolienne à base d'une MAS

### I.8.2. Machine asynchrone à double alimentation (MADA):

La MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Pour les éoliennes utilisant la MADA, le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté au réseau à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté MADA et convertisseur coté réseau) [11].

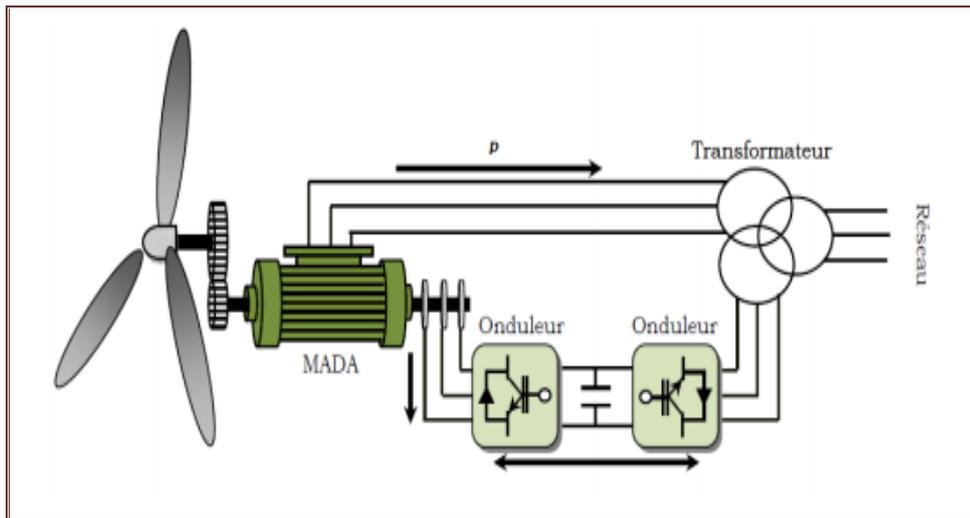


Figure (1.10): Machine Asynchrone à Double Alimentation

◆ Les avantages et les Inconvénients :

Les avantages	Les inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens</li> <li>- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale</li> <li>- Fonctionnement à vitesse variable</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Maintenance du multiplicateur</li> <li>- Commande complexe</li> <li>- Faible robustesse</li> </ul>

Tableau (1.6): Avantages et inconvénients d'une éolienne à base d'une MADA

**I.8.3. Machine synchrone:**

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Leur proportion est en augmentation constante (un peu plus de 5 % en 2001). La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'entraînement direct, c'est-à-dire lorsque la liaison mécanique entre la turbine éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que cette génératrice soit nécessairement raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Ou bien la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome [13]:

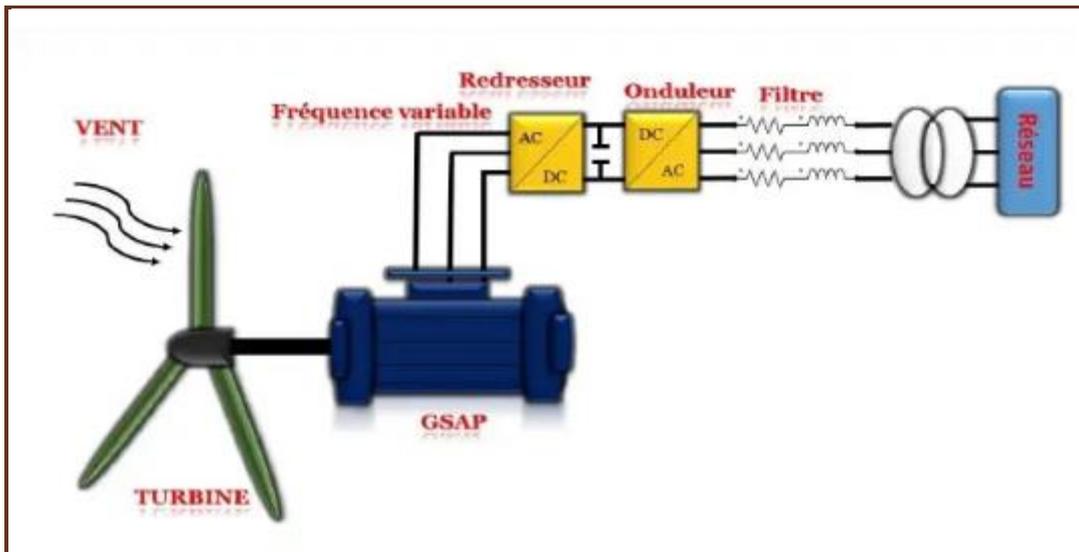


Figure (1.11): Eolienne à base d’une génératrice synchrone

♦ Les avantages et les Inconvénients :

Les avantages	Les Inconvénients
- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens - Contrôle de l’éolienne à travers le convertisseur connecté à ce réseau - Elle est utilisée en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique)	- Grand diamètre de machine - Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice - L’absence de possibilité de réglage du flux d’excitation

Tableau (1.7): Avantages et inconvénients d'une éolienne à base d'une MS

**I.8.4. Intérêt de la MADA[14] :**

- ❖ Permet fonctionnement à vitesse variable, cette l'intérêt de la vitesse variable éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le plus de puissance possible pour chaque vitesse de vent
- ❖ Puissance extraite optimisée
- ❖ Électronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale
- ❖ Machine standard
- ❖ Connexion de la machine plus facile à gérer
- ❖ Une magnétisation de la machine en cas de défaut sur le réseau

**I.9. Conclusion:**

Dans ce chapitre, nous avons présenté une introduction sur l'éolienne avec sa définition et développement, nous avons aussi détaillé le principe de fonctionnement et les modes d'installation possible d'éolienne soit à axe horizontal ou vertical.

Nous avons vu à travers ce chapitre les technologies des systèmes éoliens à vitesse variable et fixe, et leurs avantages et inconvénients.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de chaque partie d'une chaîne de conversion éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA). Chaque modèle est validé par ses résultats de simulation en utilisant le logiciel Matlab/Simulink.

## **CHAPITRE II :**

# **MODELISATION ET SIMULATION DES ELEMENTS DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE**

## II.1. Introduction :

Tout système physique peut être considéré comme un ensemble de sous-systèmes. Ainsi, pour simplifier l'étude de l'ensemble, chacune de ses parties est discutée séparément. Ensuite, une synthèse de toutes ces parties constituant le système global est à déduire. La modélisation de tout système est essentielle pour l'étude et le contrôle de son fonctionnement [14].

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation du système éolien, constitué d'une turbine et de son convertisseur mécanique et de la machine asynchrone à double alimentation. Chaque partie sera validée par sa simulation sous le logiciel Matlab/Simulink.

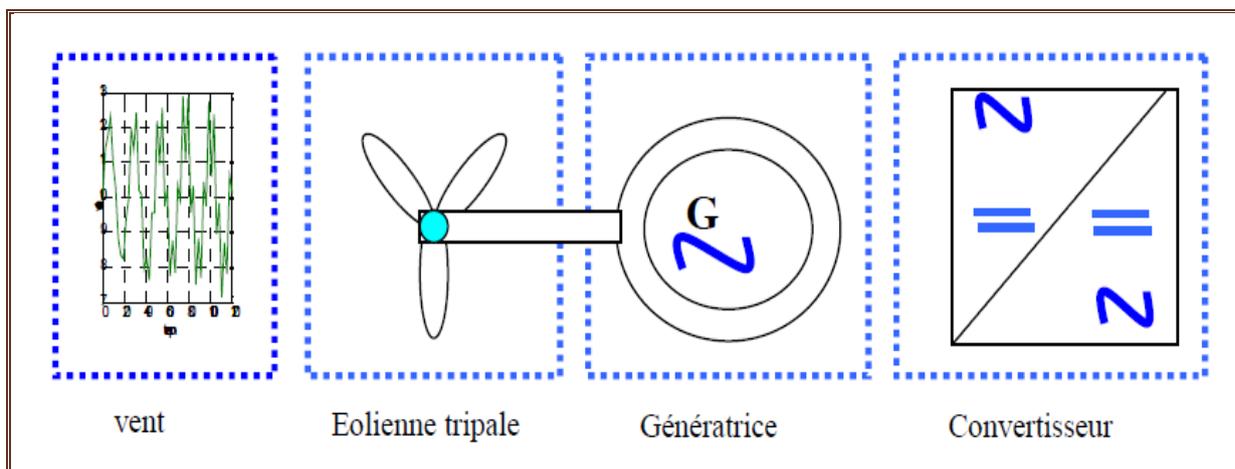


Figure 2.1: Architecture globale d'une éolienne

## II.2. Modélisation d'un système éolien :

### II.2.1. Modélisation de la vitesse du vent :

Le vent est le vecteur d'énergie d'entrée d'une chaîne de conversion éolien, son énergie cinétique est la principale source d'énergie. Cette énergie cinétique est transformée en énergie mécanique par la turbine, puis en énergie électrique par le générateur [11].

L'évolution de la vitesse du vent en fonction du temps est modélisée par une fonction analytique ou représenté par une grandeur aléatoire définie par ses paramètres statistiques à partir des données de mesure pour un site donné. La vitesse du vent peut être modélisée par une fonction scalaire qui évolue en fonction du temps [15]:

$$v_v(t) = f(t) \quad (2.1)$$

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme (2.2):

$$v_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (2.2)$$

$A$ : La valeur moyenne de la vitesse du vent

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

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

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

Le modèle de la vitesse du vent utilisé dans notre étude est représenté par l'équation (2.3):

$$v_v(t) = 12 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t) \quad (2.3)$$

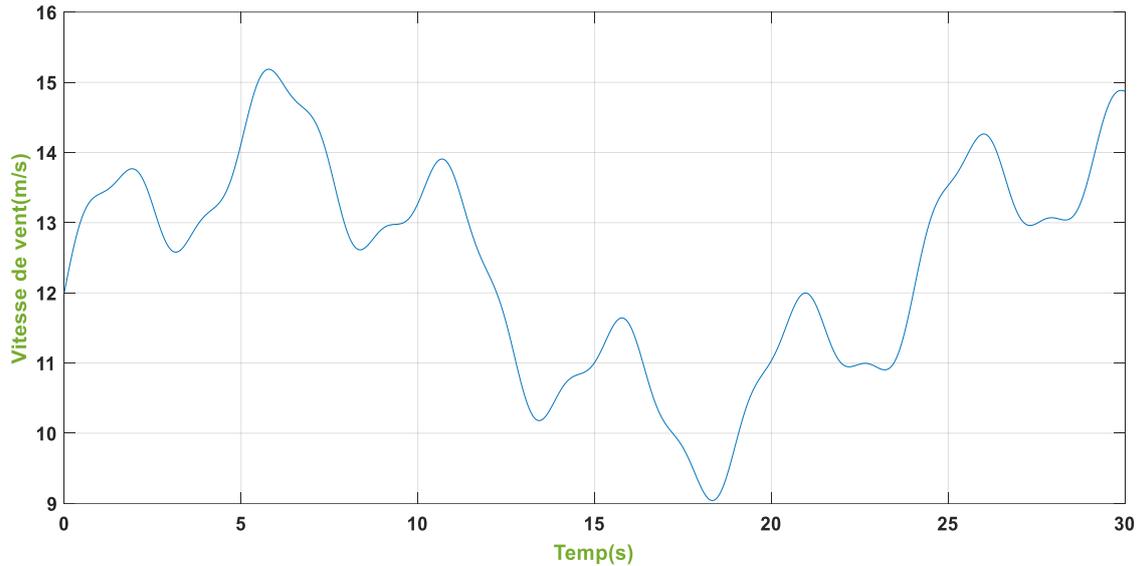
### Simulation du profil de vitesse du vent :

Le schéma bloc pour la simulation du profil de vitesse du vent est le suivant:



Figure 2.2 : Bloc de simulation du profil de vitesse du vent

La figure (2.3) présente l'allure du vent trouvé par simulation.



**Figure 2.3 : Profil de la vitesse du vent**

La figure (2.3) montre la variation de la vitesse du vent en un temps de (30s) entre deux valeurs ( $V = 15\text{m/s}$ ) comme valeur maximale et ( $V = 9\text{ m/s}$ ) d'une façon qui reflète un vrai vent.

### II.2.2. Modélisation de la turbine :

Le système éolien a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Dans cette partie, nous allons présenter le modèle de simulation de la turbine. Le modèle étudié est constitué des trois parties suivantes:

- la turbine éolienne se compose de 3 pales orientables;
- le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- l'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur.

La figure ci-dessous représente les différentes parties de la turbine :

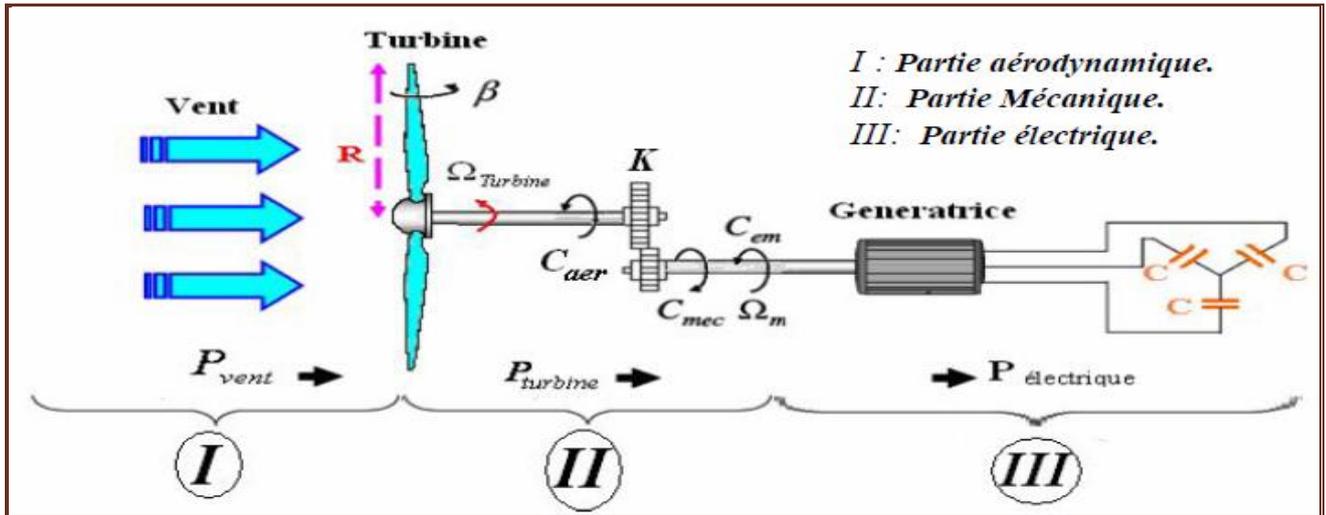


Figure 2.4: Différent partie de la turbine

### 1. Modèle de la turbine :

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine. La puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi [16]:

$$P_m = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (2.4)$$

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (2.5)$$

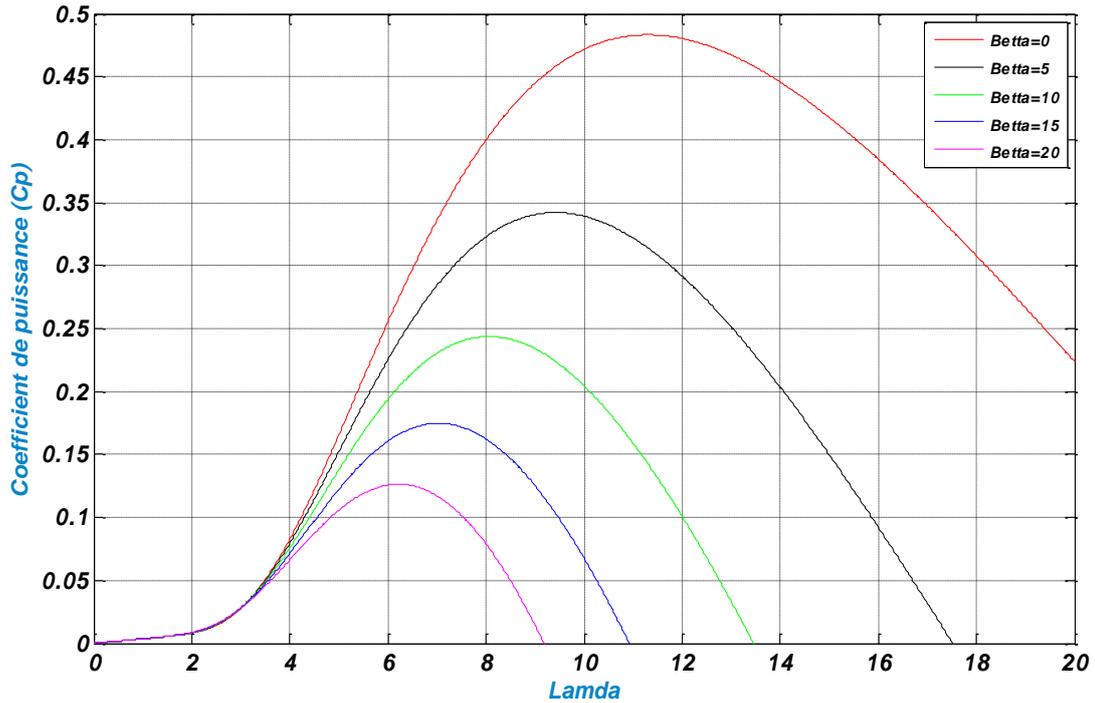
Avec:  $\lambda = \frac{\Omega_t \times R}{v}$

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation avant multiplicateur

$R$ : Rayon de l'aérogénérateur,

$\rho$  : Densité de l'air ((approximativement  $1.225 \text{ kg.m}^3$  à la pression atmosphérique à  $15^\circ\text{C}$ ).

Le coefficient de puissance  $C_p$ , représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (2.5) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio (ou du rapport) de vitesse  $\lambda$ , et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .



**Figure 2.5: Coefficient de puissance pour différents angles de calages**

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de **1.5 MW**, l'expression du coefficient de puissance est modélisée par l'approximation polynomiale suivante [16]:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(-\frac{C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (2.6)$$

Avec:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.7)$$

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

Donc :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left[ \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \right] \quad (2.8)$$

La figure (2.5) montre que le coefficient de puissance prend la forme d'une cloche, mais le plus haut sommet correspond à une valeur maximale  $C_{pmax} = 0.4412$  pour une valeur  $\lambda_{opt} = 7.05$  et un angle de calage des pales  $\beta = 0$ . Ce coefficient de puissance maximal correspondant au maximum de puissance mécanique récupérée.

Nous remarquons aussi que l'augmentation de  $\beta$  permet de dégrader le coefficient  $C_p$ , en provoquant la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $G$ , la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{mes} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \left( \lambda \frac{\Omega_{mec}}{G \cdot v} \right) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v^3 \quad (2.9)$$

$\Omega_{mec}$  : vitesse de rotation après multiplicateur.

Connaissant la vitesse la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par:

$$C_{aer} = \frac{P_{mec}}{\Omega_{mec}} = \frac{1}{2 \Omega_{mec}} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot \rho \cdot \frac{C_p}{\lambda} R^3 \cdot v^2 \quad (2.10)$$

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (2.11)$$

Où,  $J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique ( $C_{em}$ ) produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux ( $C_{vis}$ ), et le couple ( $C_r$ ).

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (2.12)$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient des frottements visqueux  $f$ .

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (2.13)$$

## 2. Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [17]:

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{aer} \quad (2.14)$$

$G$ : Rapport de multiplication.

$C_{mec}$ : Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur ainsi:

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (2.15)$$

Où :

$\Omega_{mec}$ : Vitesse mécanique du générateur (rad/s).

**3. Modèle de l'arbre:**

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$J = \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_t - f \cdot \Omega_{mec} \tag{2.16}$$

$J$ : Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) (Kg.m<sup>2</sup>).

$f$ : Coefficient de frottement visqueux.

$C_{aer} + C_{em} + C_{mec}$ : Couple totale de l'éolienne (N.m).

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

En fonctionnement générateur le couple  $C_{em}$  a un signe négatif.

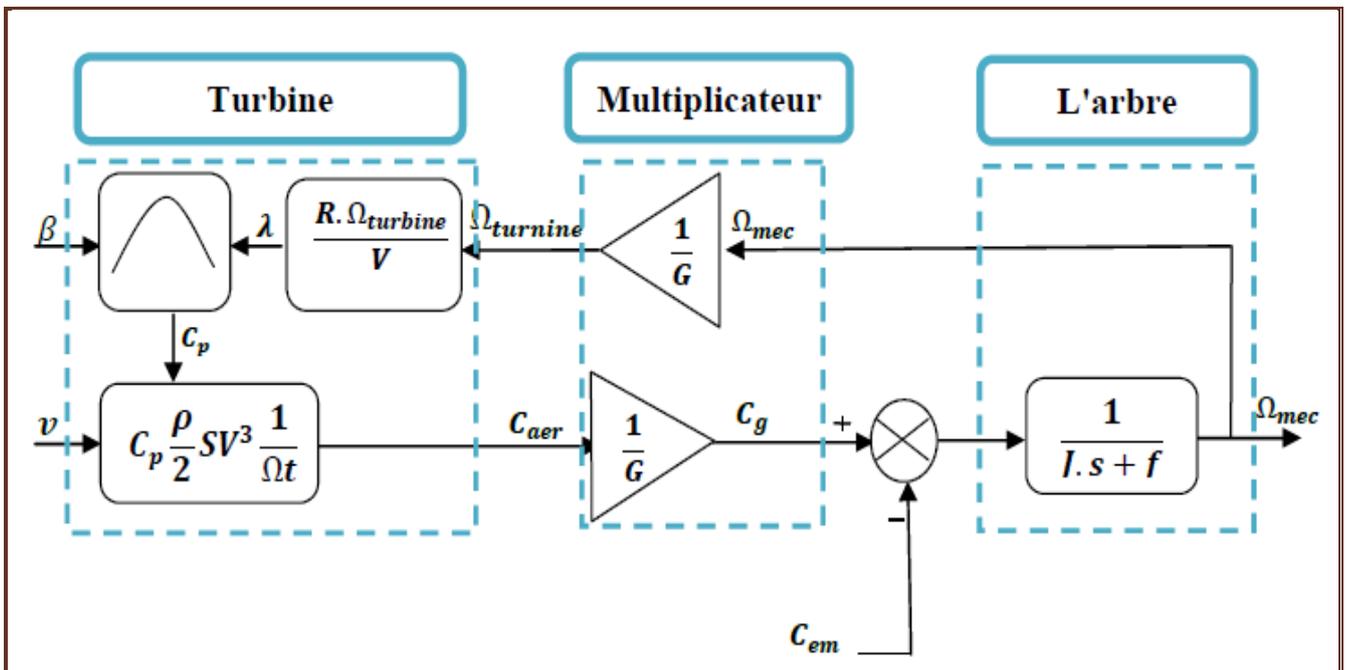


Figure 2.6 : Modèle de la turbine éolienne

**4. Simulation de la turbine:**

Après la modélisation de chaque partie de la turbine et le développement des équations mathématiques régissant leurs fonctionnements. Une simulation est réalisée pour valider les modèles proposés.

**1. Simulation pour une vitesse de vent constante:**

La figure (2.7) montre le schéma bloc général de la turbine sous Matlab/Simulink.

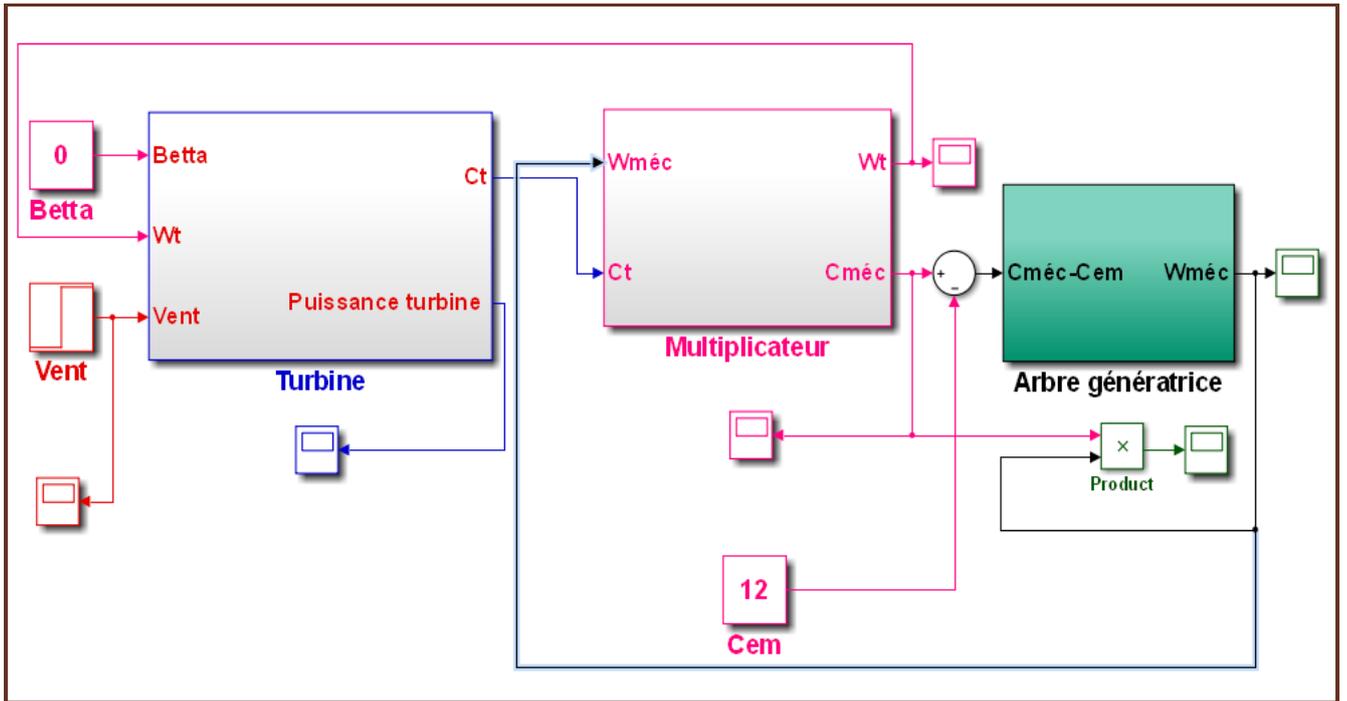


Figure 2.7: schéma bloc général de la turbine sous Matlab/Simulink

La figure (2.8) montre le profil de la vitesse constante du vent. La vitesse du vent est considérée constante égale à 7m/s jusqu'à l'instant  $t = 7s$  et à partir de cet instant, une vitesse de 10m/s est appliquée jusqu'à l'instant final 30m/s.

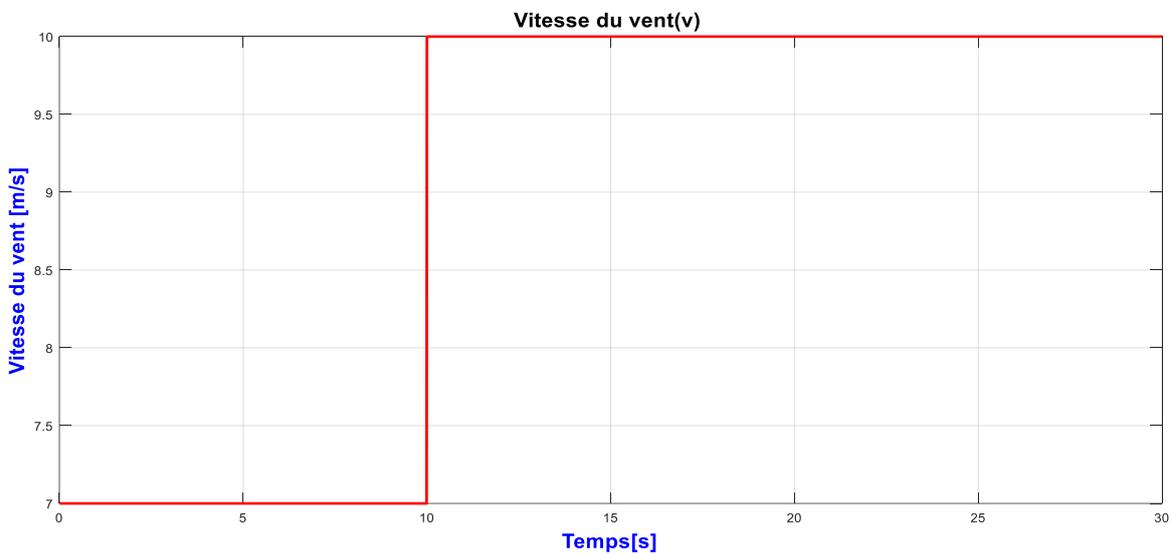
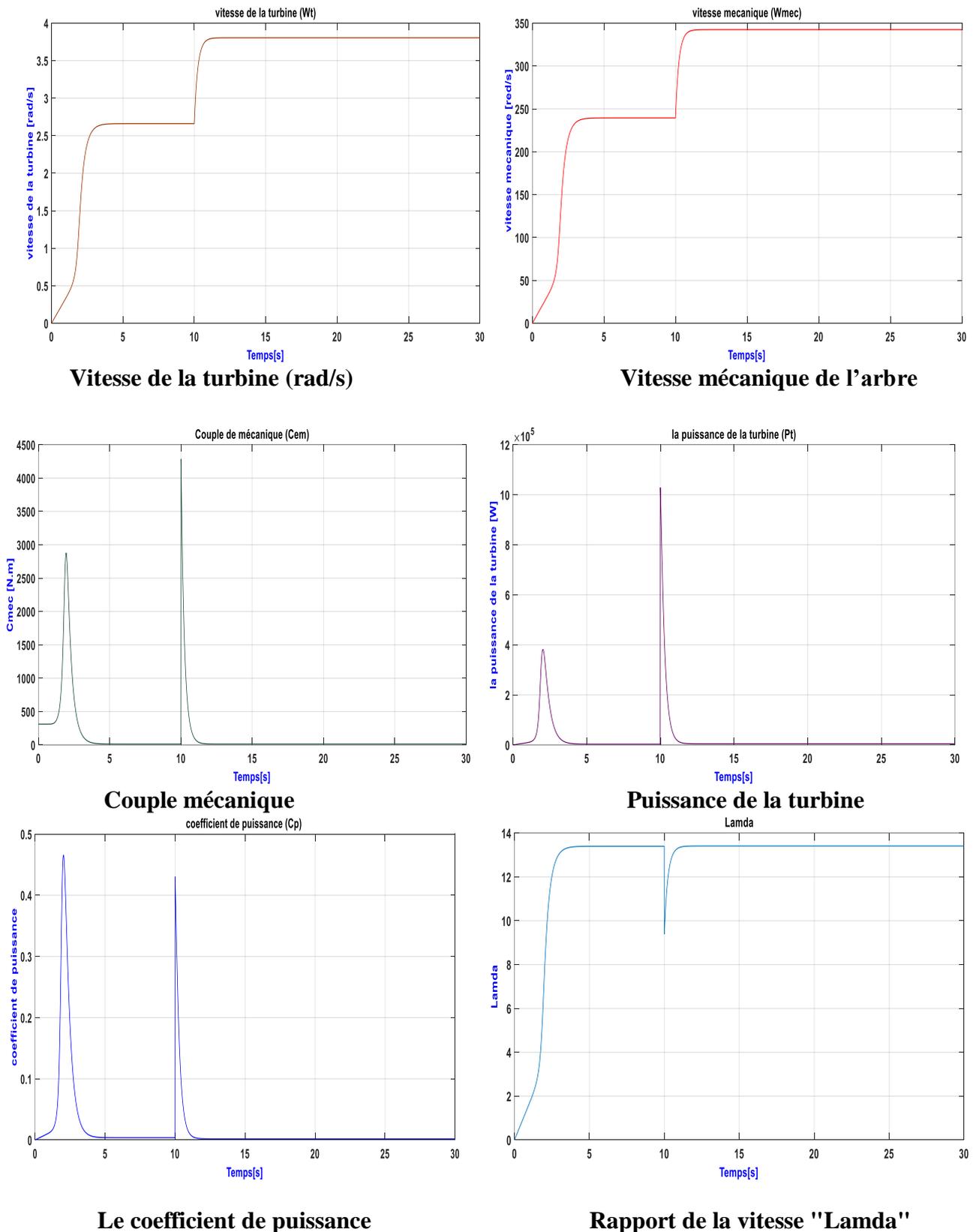


Figure 2.8: Profil de la Vitesse constante du vent

La simulation de la turbine en utilisant ce profil pour la vitesse du vent, permet d'obtenir les résultats illustrés sur les figures ci-dessous.



Le coefficient de puissance

Rapport de la vitesse "Lamda"

**Figure 2.9: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine (vitesse du vent constante)**

Les résultats obtenus montrent qu'une variation de la vitesse de vent (augmentation de la vitesse) provoque l'augmentation de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse mécanique en

maintenant le rapport du multiplicateur de vitesse fixe. En plus, la petite variation de la vitesse conduit à une grande augmentation de puissance.

Les résultats de simulation montrent bien l'adaptation des puissances produites avec les variations de la vitesse du vent.

## 2. Simulation pour une vitesse de vent variable:

La figure (2.10) montre la variation de la vitesse du vent autour de sa valeur moyenne de 12 m/s. La simulation de la turbine en utilisant ce profil pour la vitesse de vent, permet d'obtenir les résultats illustrés sur la figure (2.11).

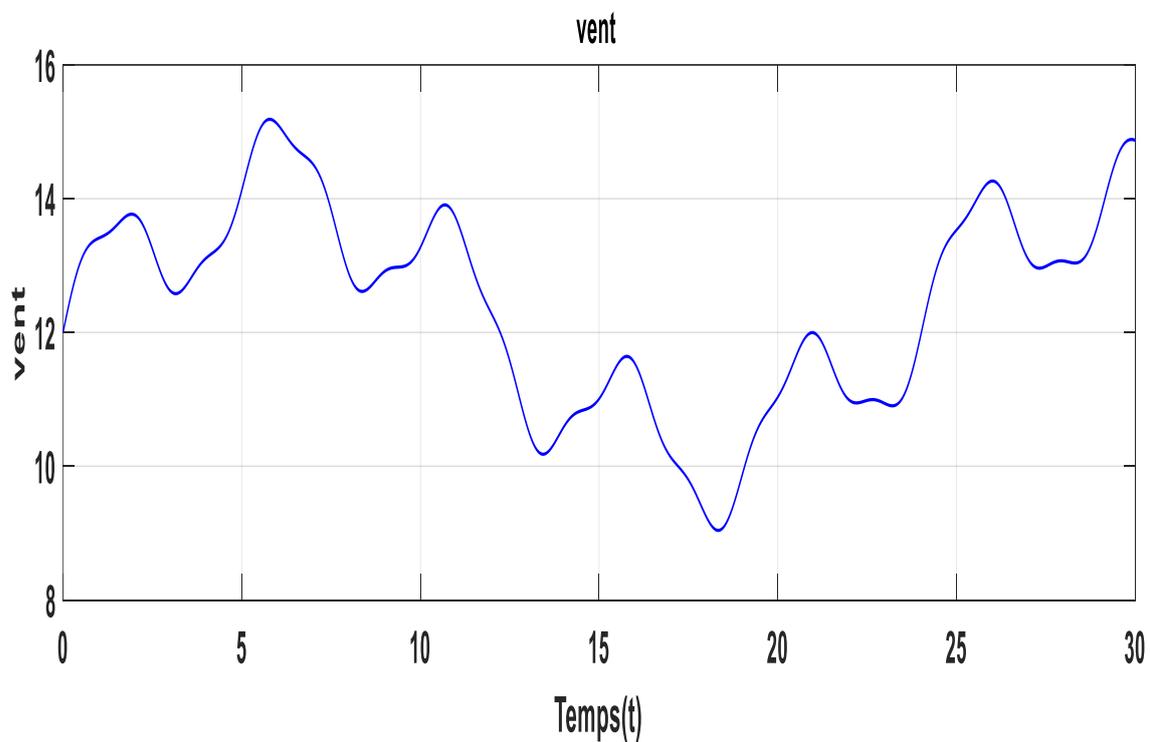
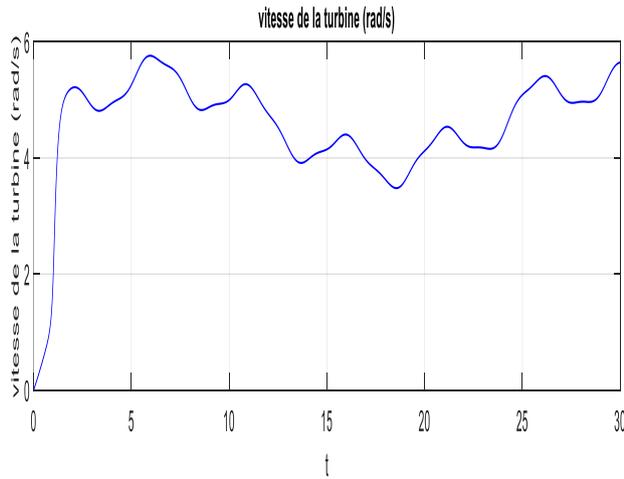
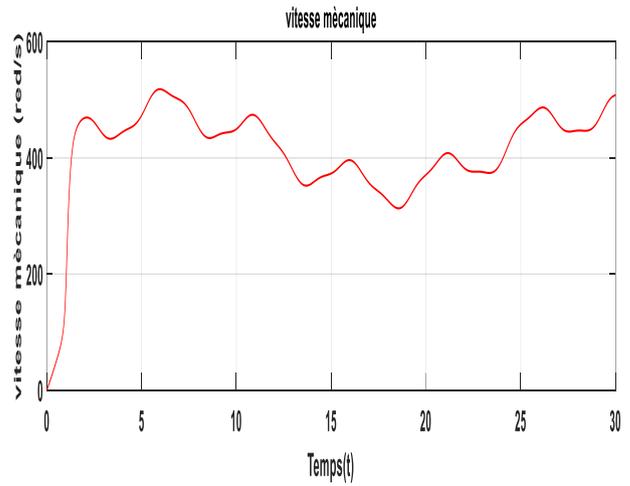


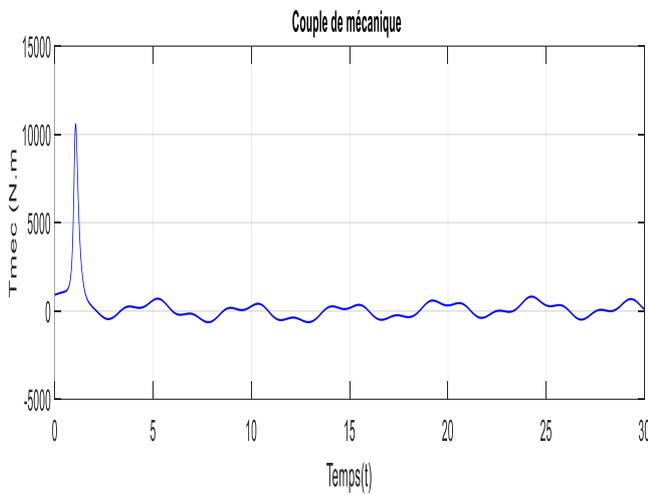
Figure 2.10 : Profil de la Vitesse constante du vent



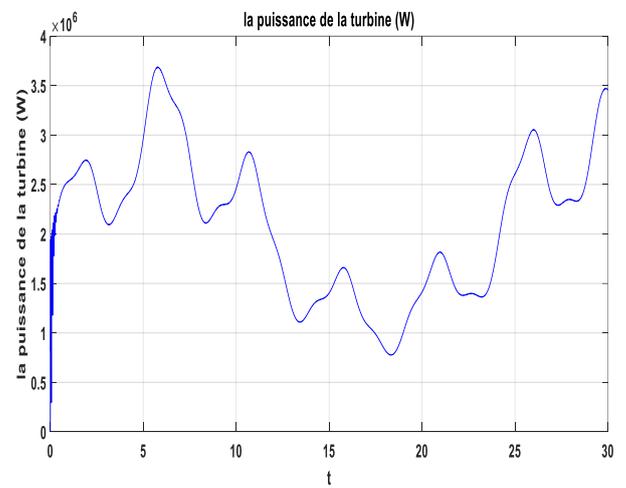
**La vitesse de la turbine**



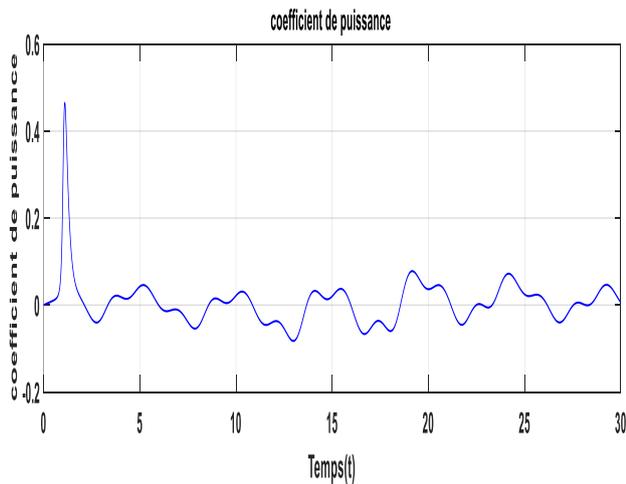
**Vitesse mécanique de l'arbre**



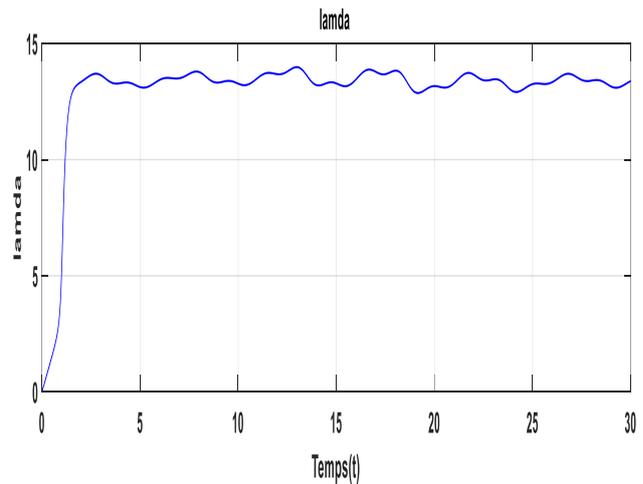
**Couple mécanique**



**La puissance de la turbine**



**Coefficient de puissance**



**Rapport de la vitesse "Lamda"**

**Figure 2.11: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine**

Les courbes illustrées par les figures (2.11), montrent que:

- la fluctuation de la vitesse du vent est injectée dans la vitesse mécanique de l'arbre, la vitesse de la turbine et la puissance mécanique produite.

- les allures de la vitesse de rotation de la turbine et la vitesse mécanique prennent une forme croissante pendant le démarrage puis elles se stabilisent mais avec des oscillations causées par la variation de la vitesse de vent.

- La puissance de la turbine varie selon les variations de la vitesse du vent. En plus, la petite variation de la vitesse conduit à une moyenne augmentation de puissance

- Le coefficient de puissance ne se stabilise pas à sa valeur maximale puisque la simulation de la turbine est réalisée sans la stratégie de poursuite de maximum de puissance (MPPT).

### 5. Poursuite du point de maximum de puissance (Maxima Power Point Tracking MPPT) :

Dans cette partie, nous présenterons une stratégie pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne (Figure. 2.12). On distingue deux familles de structures de commande [TIR 10] :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique ;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

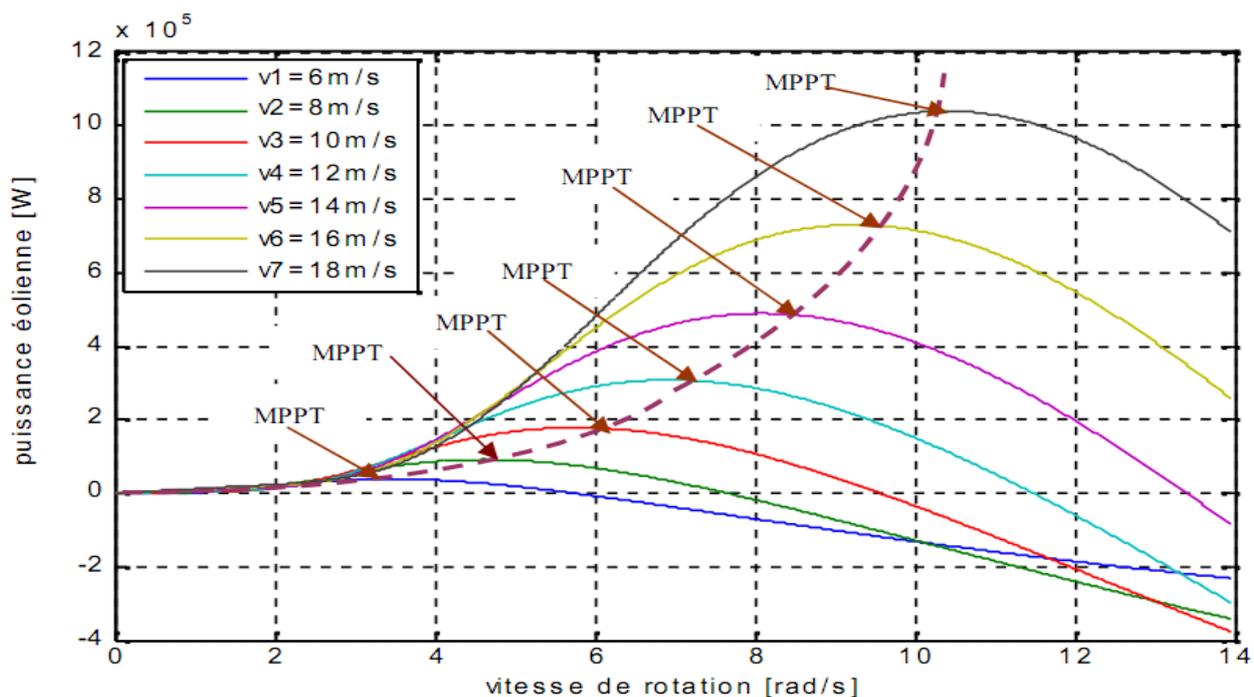


Figure 2.12: Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse de vent

**a. MPPT d'une turbine tripale sans asservissement de vitesse:**

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons [18] :

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.
- Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse.

Cette stratégie de commande se base sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, ce qui implique que le couple d'accélération de la turbine peut être considéré comme nul.

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{Vis} \quad (2.17)$$

Donc: 
$$C_{em} = C_{Vis} \text{ avec: } C_g = 0 \quad (2.18)$$

A partir de la mesure de la vitesse mécanique et la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent, on obtient:

$$C_{aer} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimée}} v^3_{estimée} \quad (2.19)$$

Avec:

$$v_{estimée} = \frac{\Omega_{turbine\_estimée} \cdot R}{\lambda} \quad (2.20)$$

L'expression du couple de référence qui est proportionnel au carré de la vitesse de la génératrice, est donnée par cette équation:

$$C_{em\_ref} = \frac{\rho \pi R^5}{2G^3} \cdot \frac{C_p}{\lambda^3 C_{pmax}} \Omega_{mec}^2 \quad (2.21)$$

La figure (2.13) montre le schéma bloc de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique sous Matlab/Simulink. Le profil de vent utilisé est à vitesse variable.

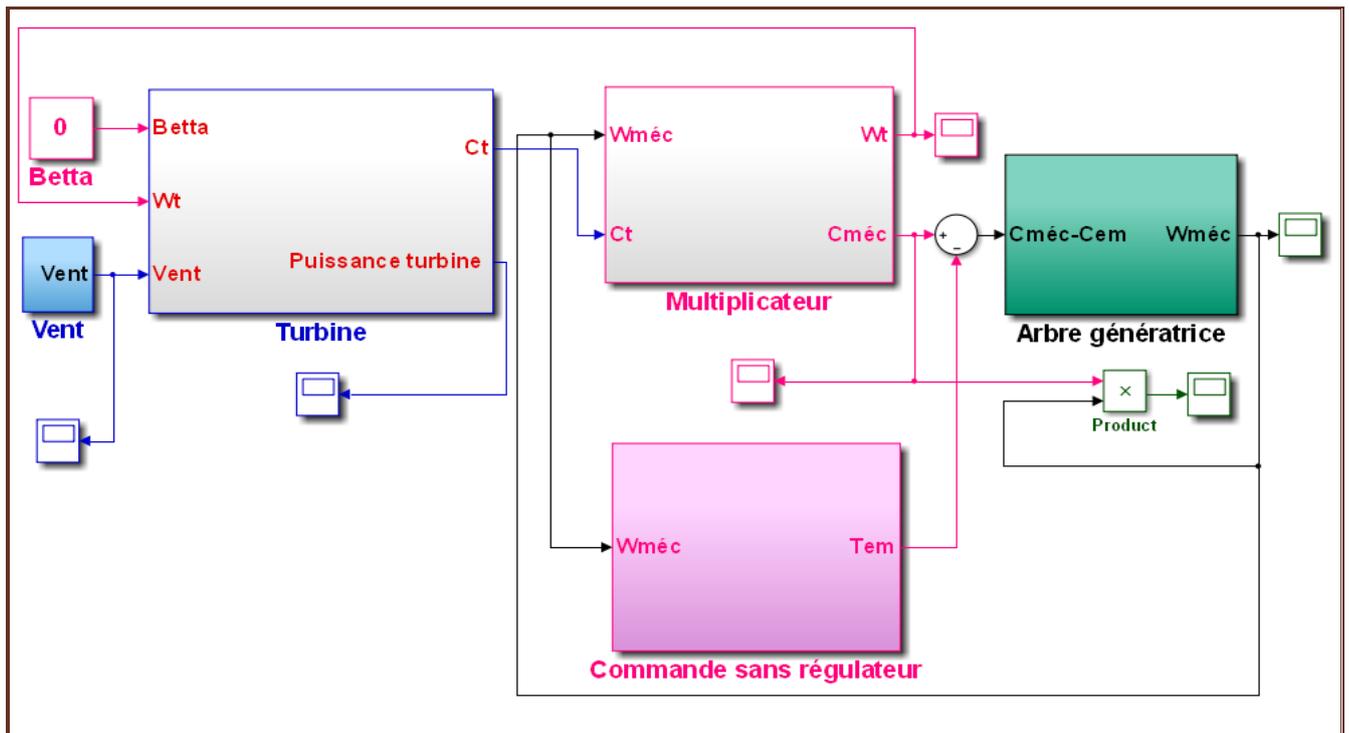
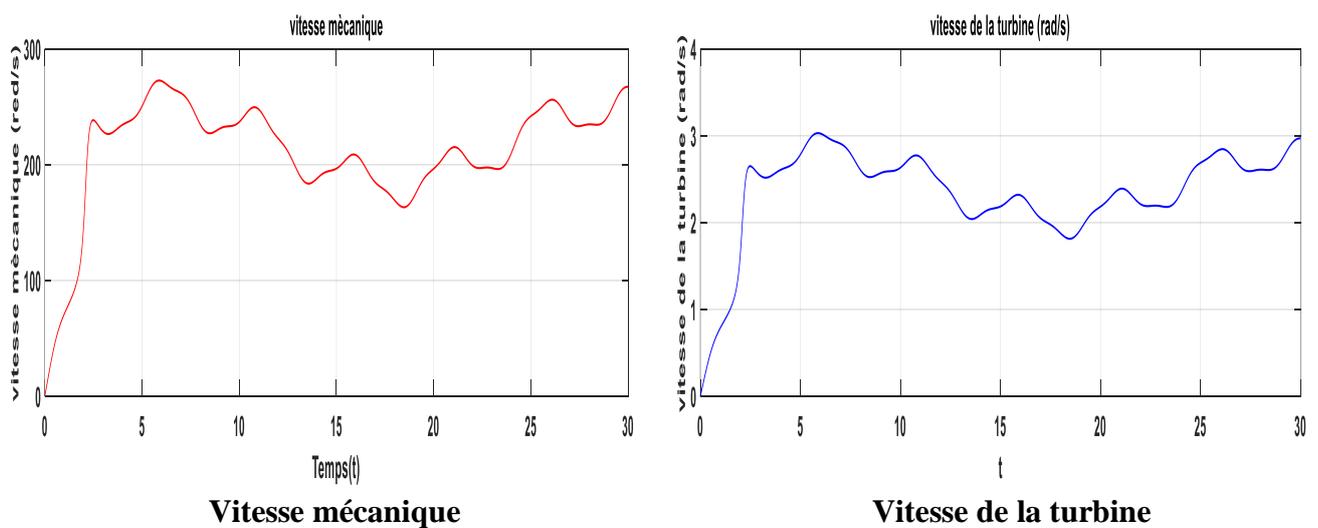
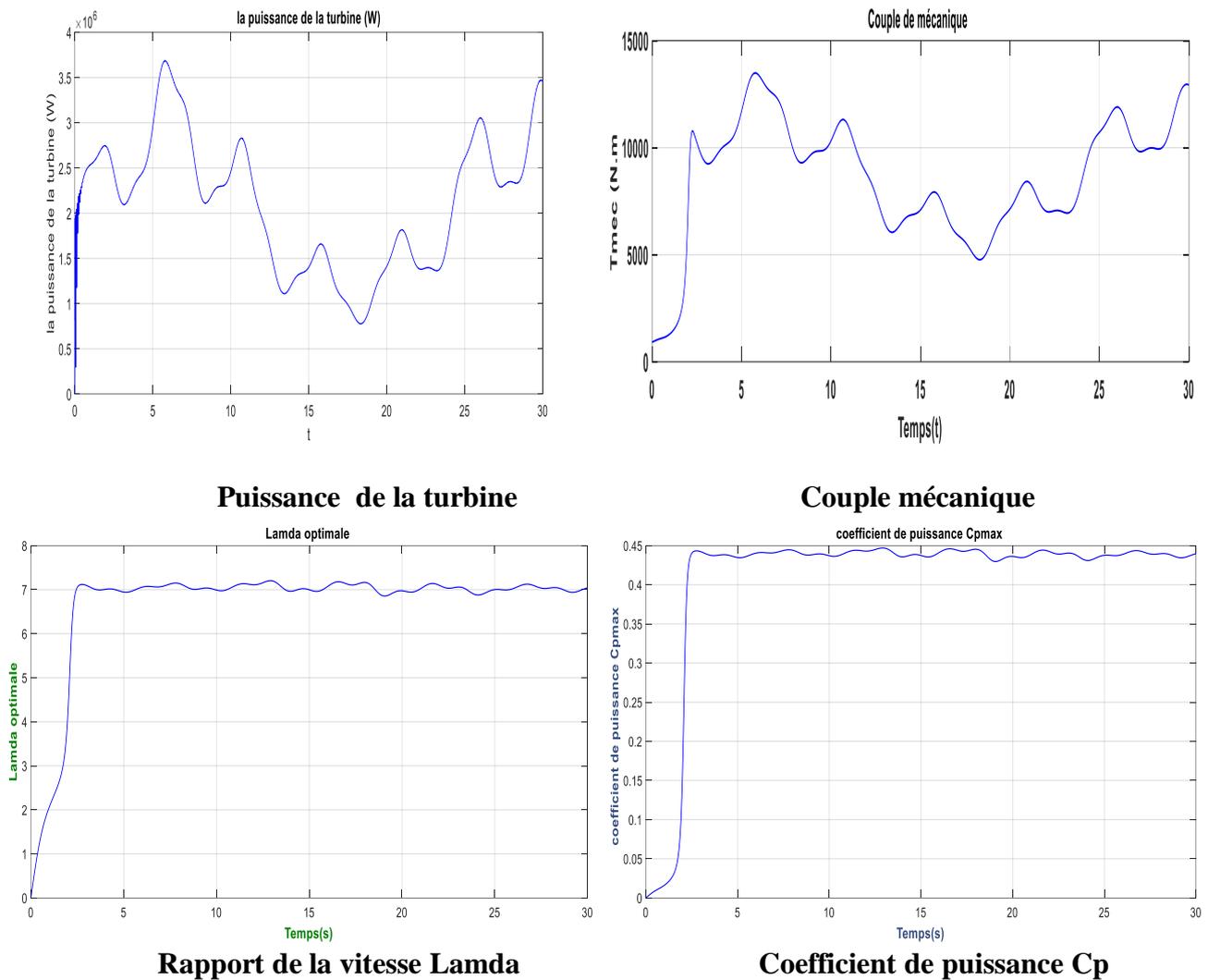


Figure 2.13: Schéma bloc de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse

- **Simulation:**

La simulation de la turbine avec MPPT sans asservissement de vitesse permet d'obtenir les résultats illustrés sur la figure (2.14).





**Figure 2.14: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine avec MPPT sans asservissement de la vitesse**

### b. MPPT d'une turbine tripale avec asservissement de vitesse:

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance. Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence [18].

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée.

La figure (2.15) montre le schéma bloc de la turbine avec MPPT par asservissement de la vitesse mécanique en utilisant un régulateur PI.

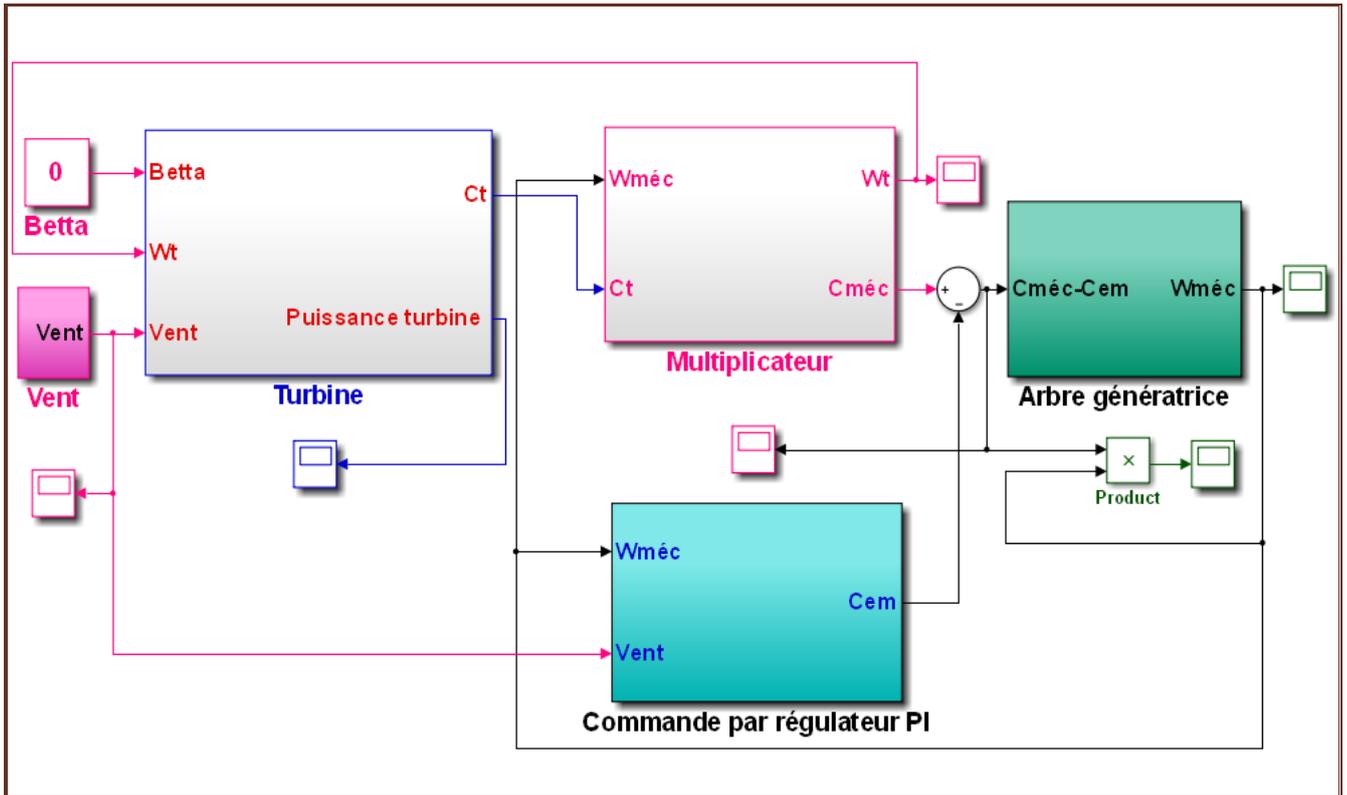


Figure 2.15: Schéma bloc de la turbine avec MPPT par asservissement de la vitesse

• Synthèse du régulateur PI pour la commande MPPT:

La régulation de la vitesse mécanique est effectuée par un régulateur PI classique, comme le montre le schéma bloc de la figure (2.16).

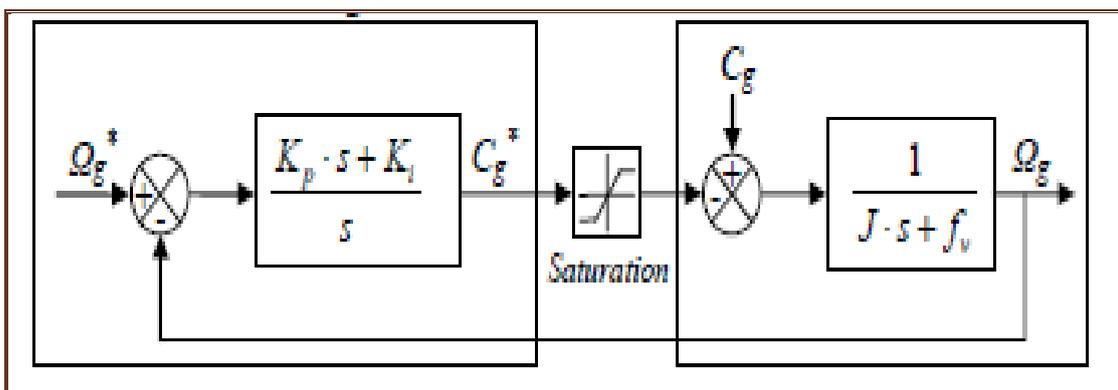


Figure 2.16: Schéma bloc de régulation de la vitesse mécanique.

La fonction de transfert en BF sous forme mathématique :

$$F(s) = \frac{K_p + \frac{K_i}{s}}{J.s^2 + (f_v + K_p)s + K_i} \quad (2.22)$$

C'est une fonction de transfert de deuxième ordre dont l'équation caractéristique est de la forme:

$$\frac{1}{\omega_n^2} s^2 + \left(2 \frac{\xi}{\omega_n}\right) s + 1.$$

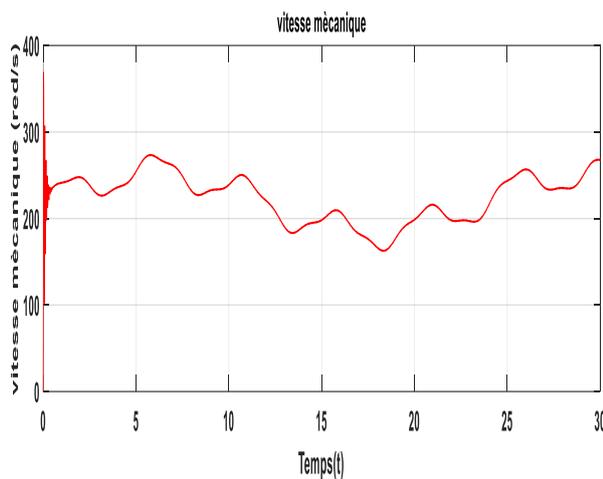
Par identification, on trouve:

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \\ \xi = \frac{f_v + K_p}{J.2\omega_n} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} K_i = J. \omega_n^2 \\ K_p = 2. \xi. J. \omega_n - f_v \end{cases} \quad (2.23)$$

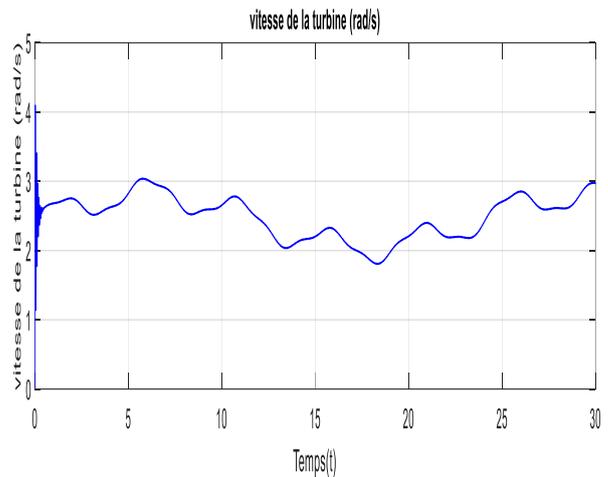
Nous avons choisi pour la simulation :  $\begin{cases} \omega_n = 100 \\ \xi = 1 \end{cases}$

- **Simulation:**

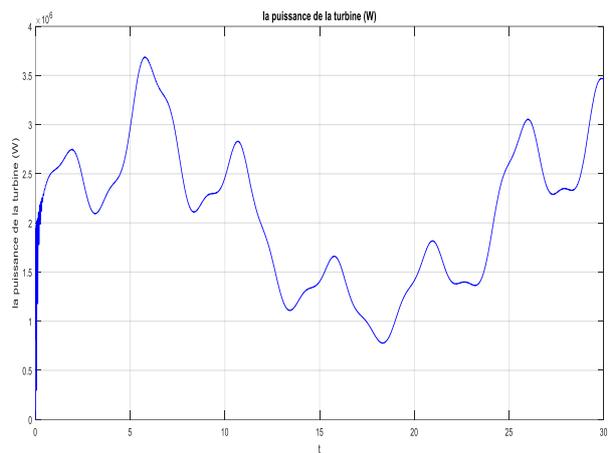
La simulation de la turbine avec MPPT et avec asservissement de vitesse permet d'obtenir les résultats illustrés sur la figure (2.17).



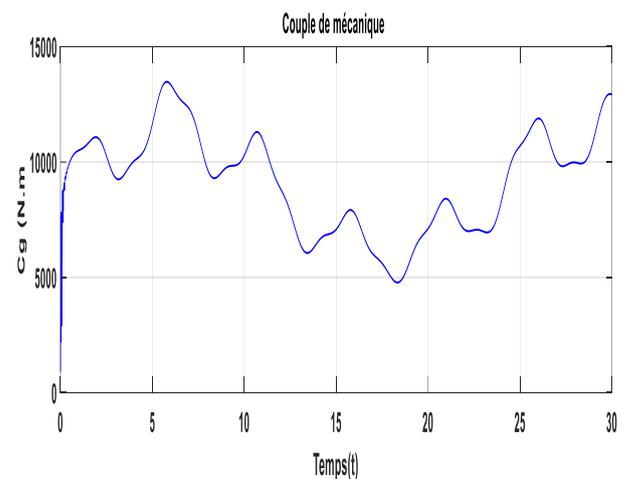
**Vitesse mécanique**



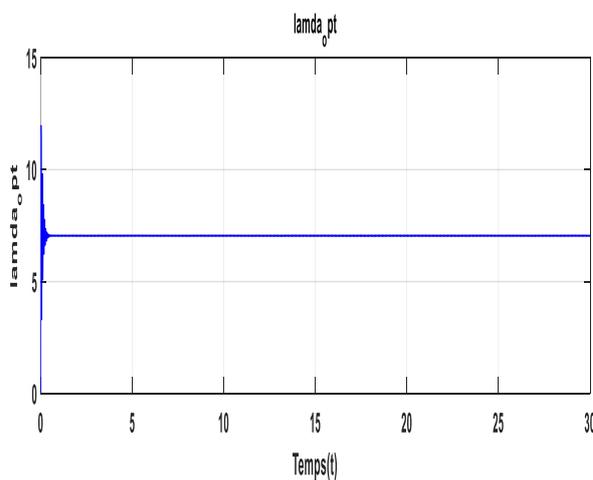
**Vitesse de la turbine**



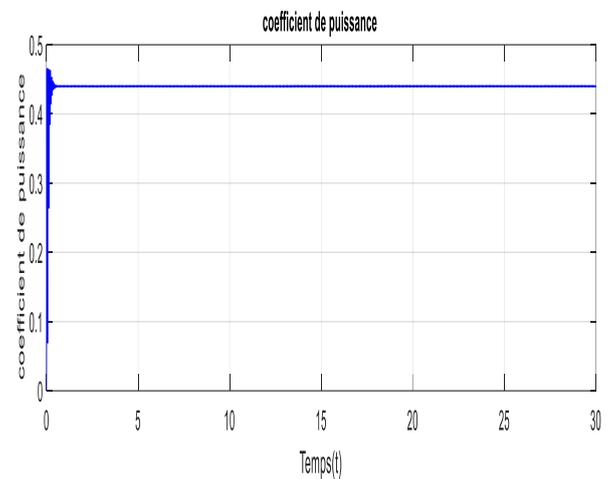
**la puissance de la turbine**



**Le couple mécanique**



**Le rapport de vitesse Lamda**



**Coefficient de puissance Cp**

**Figure 2.17: Courbes obtenus par simulation du modèle de la turbine avec MPPT avec asservissement de la vitesse**

Les résultats obtenus par application des deux stratégies de commande MPPT et qui sont représentés par les courbes de la figure (2.16) (sans asservissement de vitesse) et les courbes de la figure (2.17) (avec asservissement de vitesse) montrent que:

- les courbes de vitesse, couple et puissance varient selon la variation du vent, ils représentent des valeurs maximales pour un vent fort et des valeurs minimales pour un vent faible. Mais le temps de réponse est minimal dans le cas d'une commande avec asservissement de vitesse.

- le coefficient de la puissance et le ratio ou le rapport de vitesse oscillent autour de leurs valeurs maximales dans le cas d'une commande sans asservissement de vitesse tandis qu'ils se

stabilisent directement aux valeurs maximales 0.44 et 7.05 respectivement, dans le cas d'une commande avec asservissement de vitesse.

- Il est à noter que pendant la durée de 30 s le système éolien passe par les deux modes de fonctionnement hypo et hyper synchrone.

- Les résultats montrent que commande MPPT avec asservissement a amélioré la qualité des signaux en réduisant les oscillations qui leur sont injectées.

- la commande avec asservissement de vitesse est plus performante à cause de l'asservissement de coefficient de puissance à sa valeur maximale, donc une transmission de puissance maximale vers le générateur.

La simulation nous a permis de prouver la fiabilité et les performances de la commande avec asservissement de vitesse à cause de sa simplicité et sa rapidité à maximiser la puissance.

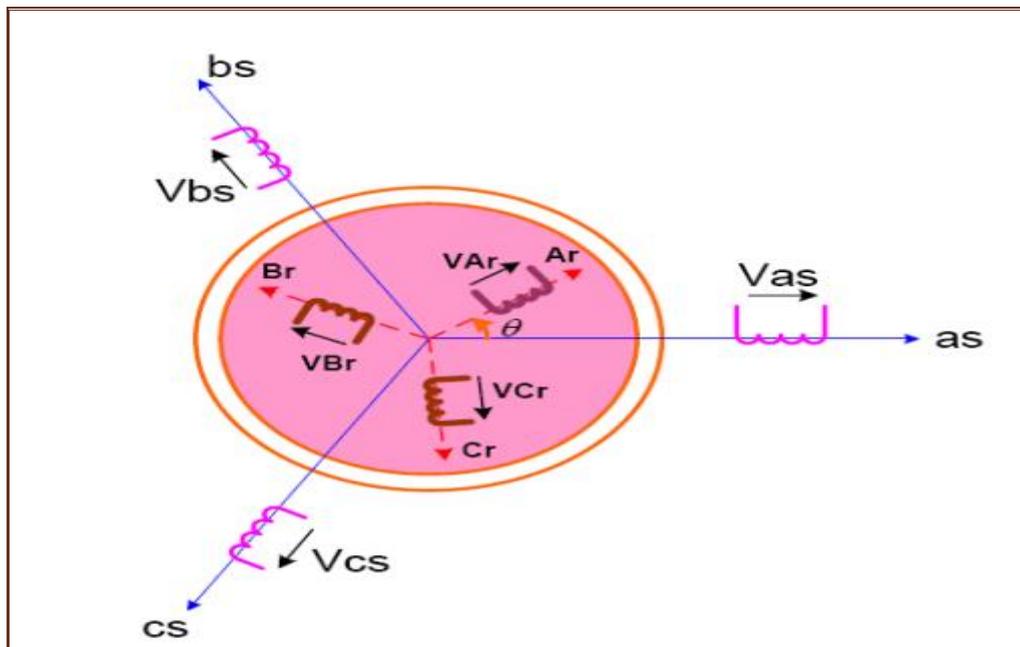
**II.2.3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation (MADA):**

Dans cette partie, nous allons s'intéresser par la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé et biphasé en introduisant les différentes équations régissant le fonctionnement de cette machine.

Dans le but de commander un système électrique donné, il est nécessaire de donner son modèle mathématique en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle plus simple que possible.

**1. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère triphasé:**

La machine asynchrone à double alimentation peut être schématisée par la figure (2.18) dans le repère triphasé.



**Figure 2.18: Représentation de la Machine asynchrone à double alimentation**

$A_s, B_s, C_s$ : phases du stator

$a_r, b_r, c_r$ : phases du rotor

**Equations électriques de la machine:**

Les équations de tensions sont donnés par:

Au stator:

$$\begin{bmatrix} V_{SA} \\ V_{SB} \\ V_{SC} \end{bmatrix} = R_S \begin{bmatrix} I_{SA} \\ I_{SB} \\ I_{SC} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{SA} \\ \Phi_{SB} \\ \Phi_{SC} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = R_r \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$[V_S]$  et  $[V_r]$ : les tensions statoriques et rotoriques de la machine

$[I_S]$  et  $[I_r]$ : les courants statoriques et rotoriques de la machine

$[\Phi_S]$  et  $[\Phi_r]$ : les flux statoriques et rotoriques de la machine

$[R_S]$  et  $[R_r]$ : les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine

Les équations des flux sont représentés par les équations suivantes:

$$[\Phi_S] = [L_S][i_S] + [M][i_r] \quad (2.26)$$

$$[\Phi_r] = [L_r][i_r] + [M][i_S] \quad (2.27)$$

$[L_S]$  et  $[L_r]$ : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine

$[M]$ : Inductance mutuelle cyclique stator-rotor

## 2. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) dans le repère biphasé:

L'application de la transformation de Park aux équations électriques de la MADA, et dans le référentiel lié au champ tournant nous permet d'aboutir au système d'équations électriques suivantes:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_S \cdot I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_S \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_S \cdot I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_S \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_S - \omega_r) \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_S - \omega_r) \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.28)$$

Avec:

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_S \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \\ \phi_{sq} = L_S \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \end{cases} \quad (2.29)$$

A partir de ces équations, on peut donner le modèle d'état de la MADA comme suit:

$$\begin{cases} X = A.X + B.U \\ Y = C.X + D.U \end{cases}$$

Avec :  $X$  : vecteur d'état

$U$  : vecteur d'entrée

$y$  : vecteur de sortie

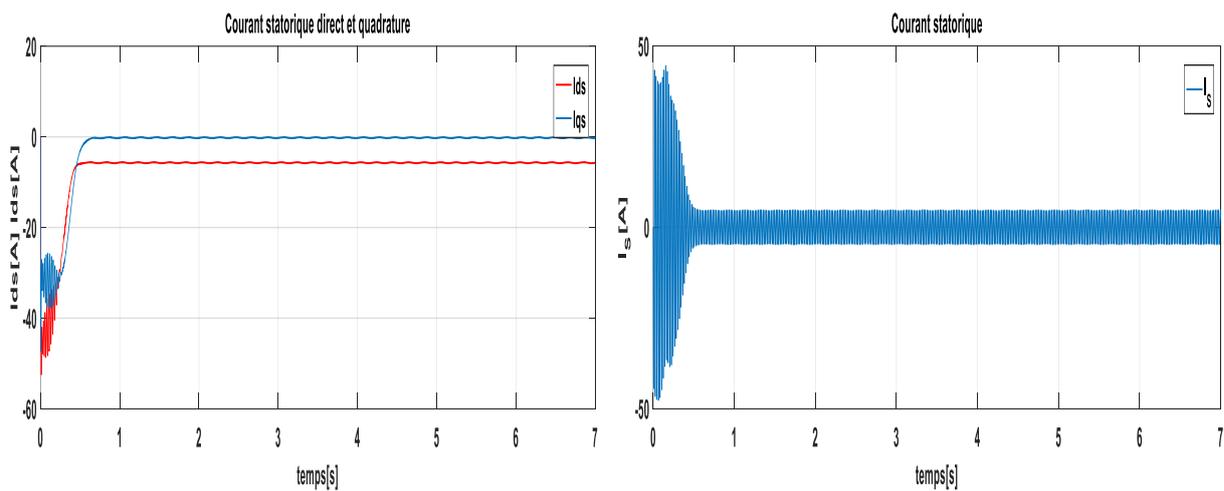
$$\begin{cases} \frac{d}{dt} I_{sd} = -\lambda I_{sd} + \omega_s I_{sq} + \frac{K}{T_r} \phi_{rd} + \omega_r K \phi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} + K V_{rd} \\ \frac{d}{dt} I_{sq} = -\lambda I_{sq} - \omega_s I_{sd} + \frac{K}{T_r} \phi_{rq} - \omega_r K \phi_{rd} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} + K V_{rq} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rd} = \frac{M}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \phi_{rd} + \omega_{si} \phi_{rq} + V_{rd} \\ \frac{d}{dt} \phi_{rq} = \frac{M}{T_r} I_{sq} - \frac{1}{T_r} \phi_{rq} - \omega_{si} \phi_{rd} + V_{rq} \end{cases} \quad (2.30)$$

Avec:

$$\begin{aligned} K &= \frac{M}{\sigma \times L_s \times L_r} ; & \lambda &= \frac{1}{\sigma \times T_r} ; \\ T_r &= \frac{L_r}{R_r} ; & \sigma &= 1 - \frac{M}{L_r \times L_s} ; \end{aligned}$$

### 3. Simulation:

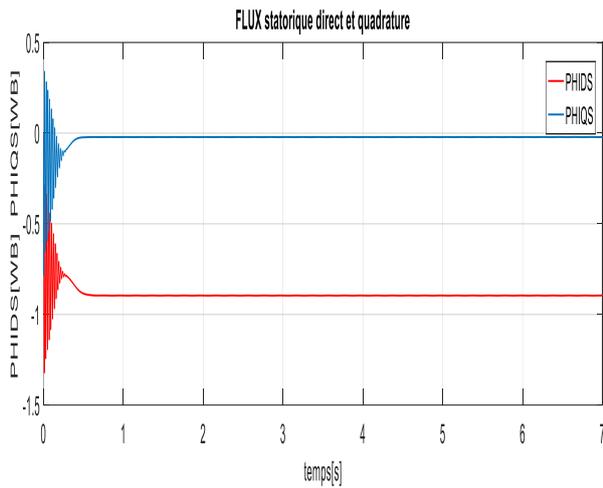
La simulation de la MADA seul avec les paramètres mentionnés dans l'annexe, permet d'obtenir les résultats suivants:



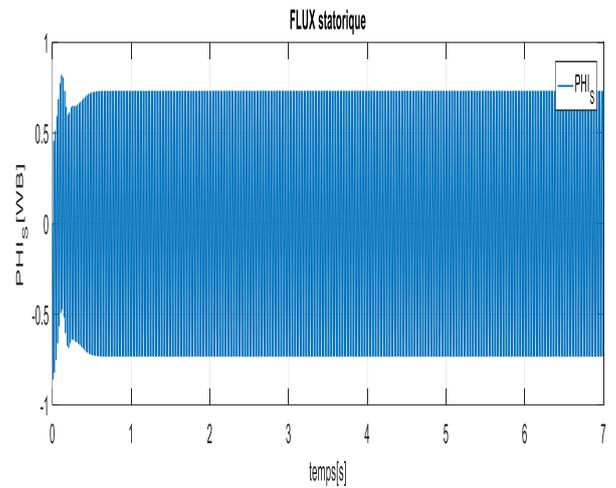
(a) Les courants statoriques direct et quadrature

(b) Courant statorique dans le repère triphasé

Figure 2.19: Les courants statoriques

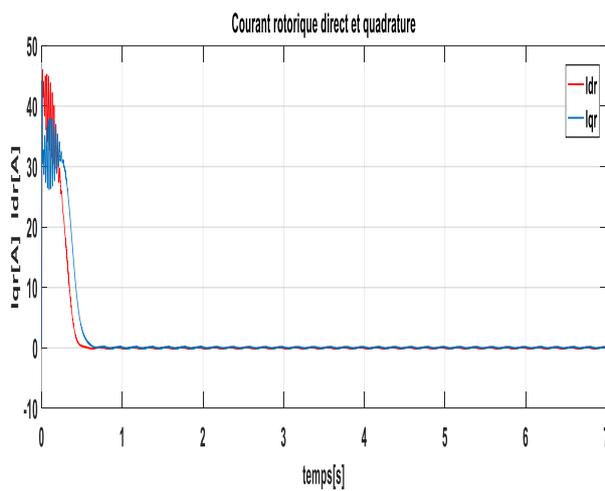


(a) Les flux statoriques direct et quadrature

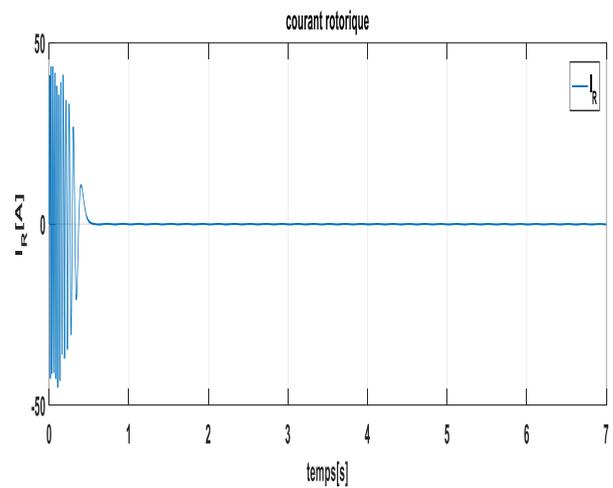


(b) Flux statorique dans le repère triphasé

Figure 2.20: Les flux statoriques

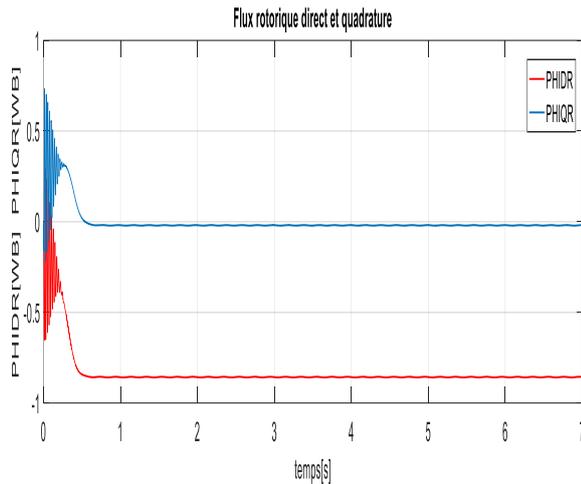


(a) Les courants rotoriques direct et quadrature

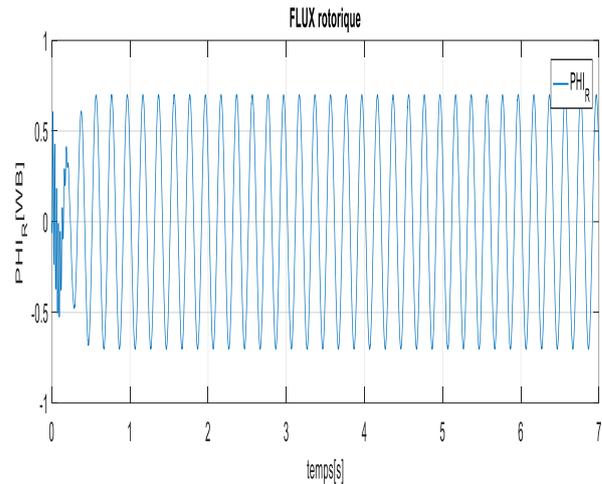


(b) Courant rotorique dans le repère triphasé

Figure 2.21: Les courants rotoriques



(a) Les flux rotoriques direct et quadrature



(b) Flux rotorique dans le repère triphasé

Figure 2.22: Les flux rotoriques

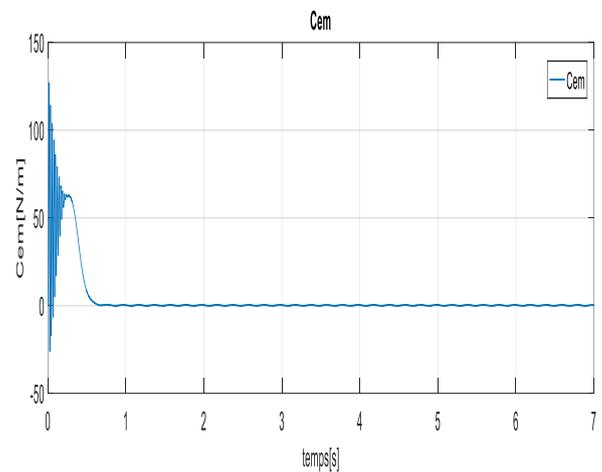
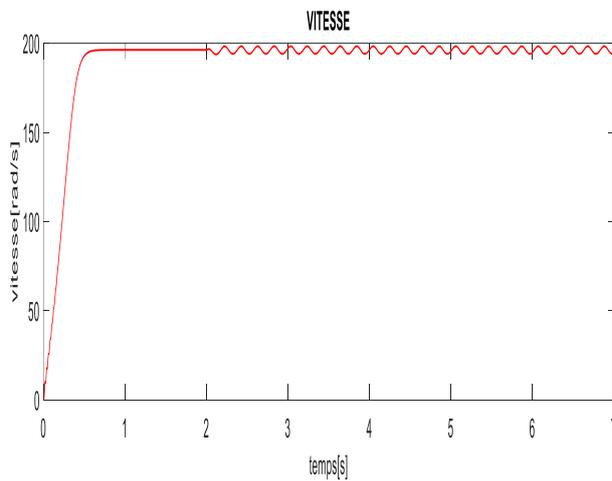


Figure 2.23: Vitesse de rotation et couple électromagnétique

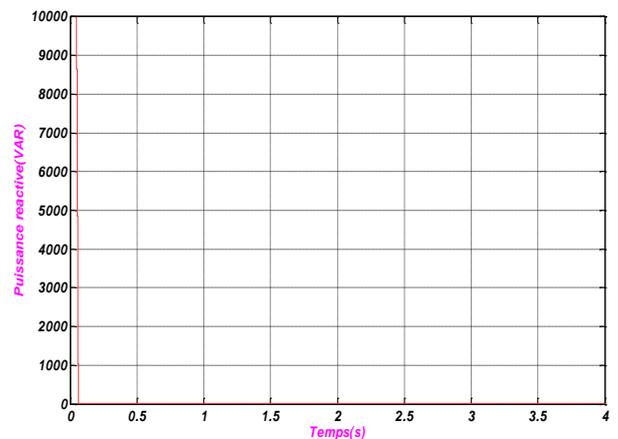
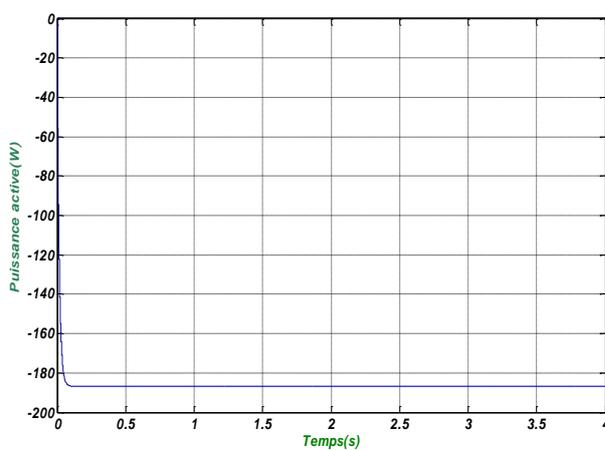


Figure 2.24: Puissance active et réactive

D'après les figures ci-dessus, on remarque que:

- Le courant statorique commence avec une grande valeur en régime transitoire mais après un certains temps de démarrage (d'environ 0.5 sec), son amplitude atteint sa valeur nominale.
- Après une pulsation très importante à l'instant de démarrage, le courant rotorique presque nul (très faible glissement).
- Le flux statorique et rotorique prend la forme sinusoïdale d'amplitude constante.
- Après un temps d'environ 0.5s, la vitesse de rotation s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme.
- La courbe du couple électromagnétique se stabilise à une valeur proche du zéro (sans charge) après une pulsation très important à l'instant de démarrage.
- La puissance active prend une valeur négative en régime permanent tandis que la valeur de la puissance réactive est presque nulle.

### II.3. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la GADA. Chaque modèle est validé par une simulation sous l'environnement Matlab/Simulink.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié par la suite la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi, dont la complexité a été réduite. La simulation de ce modèle est réalisé en introduisant l'allure des différentes grandeurs électriques et mécaniques.

Le dernier chapitre sera consacré à la commande vectorielle de la GADA seule et de la simulation de la chaîne de conversion éolienne à base de cette machine.

**CHAPITRE III :**  
**COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA**

### III.1. INTRODUCTION:

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable comme pour le cas de la génératrice asynchrone à double alimentation [17]. Dans cette optique, nous avons proposé une loi de commande pour la GADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [30].

### III.2. Principe de la commande vectorielle de la GADA :

L'objectif principal de la commande vectorielle des machines à courant alternatif est d'améliorer leur comportement statique et dynamique, grâce à une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu. Il s'agira donc de retrouver la quadrature entre le courant et le flux, naturellement découplés pour une machine à courant continu (courant producteur de flux et le courant producteur de couple). Dans notre cas le découplage se fait entre la puissance active et réactive du stator [31].

Il existe trois types d'orientation du flux :

- Orientation du flux rotorique avec les conditions  $\phi_{dr} = \phi$ ,  $\phi_{qr} = 0$  ;
- Orientation du flux statorique avec les conditions  $\phi_{ds} = \phi$ ,  $\phi_{qs} = 0$  ;
- Orientation du flux d'entrefer avec les conditions  $\phi_{dg} = \phi$ ,  $\phi_{qg} = 0$ .

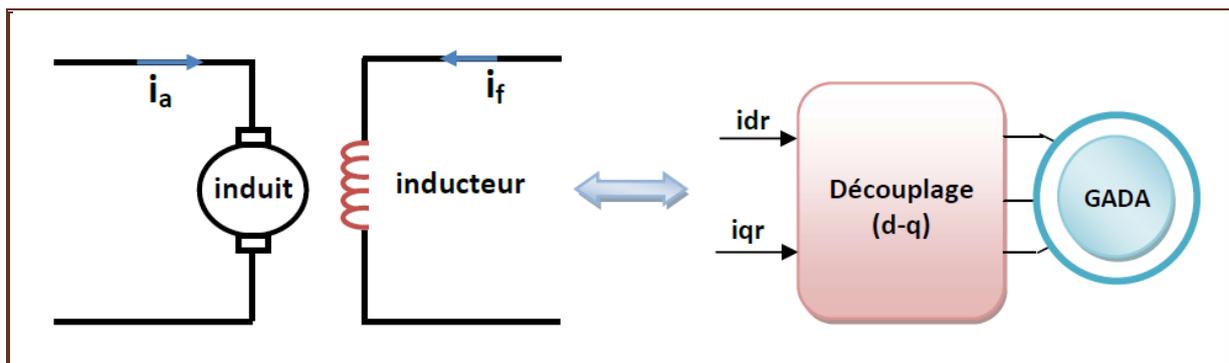


Figure 3. 1 : Principe de la commande vectorielle

### III.3. Modèle de la GADA pour le contrôle indépendant des puissances:

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité, nous allons nous intéresser à un contrôle indépendant des puissances active et réactive en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions et des courants rotoriques générées par un onduleur, aux puissances active et

réactive saturées [32]. L'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (3.2).

Nous utilisons la modélisation biphasée de la machine. On oriente le repère (d, q) afin que l'axe **d** soit aligné sur le flux statorique  $\Phi$ .

$$\Phi_{ds} = \Phi_s; \Phi_{qs} = 0$$

Alors, le modèle de la machine sera plus simple comme il est présenté dans les équations (3.5):

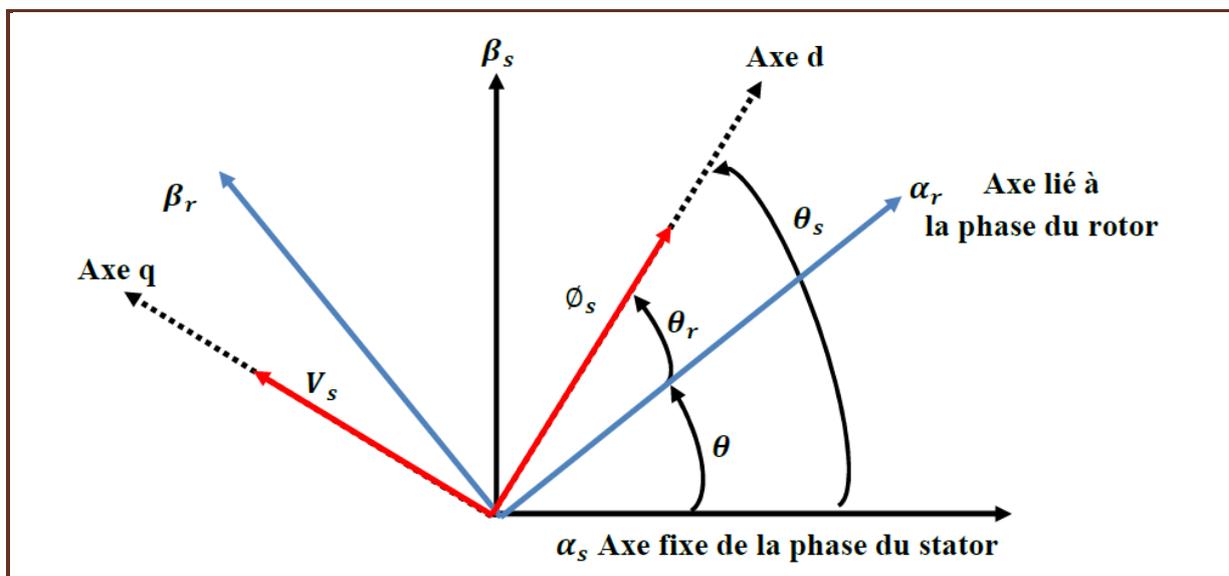


Figure 3.2 : Orientation de la tension et de flux statorique

De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [33] :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \\ \Phi_{ds} = V_s \end{cases} \quad (3.1)$$

- Les flux rotoriques :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = \Phi_s = L_s I_{ds} + M_{sr} I_{dr} \\ \Phi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M_{sr} I_{qr} \end{cases} \quad (3.2)$$

- **Relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques :**

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M_{sr}}{L_s} I_{dr} + \frac{\phi_{ds}}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \end{cases} \quad (3.3)$$

- **Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques :**

Dans un repère biphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} + V_{ds} I_{qs}) \end{cases} \quad (3.4)$$

L'adaptation de ces équations au système d'axe choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{ds} = 0$ ) donne :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s I_{qs} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s I_{ds} \end{cases} \quad (3.5)$$

En remplaçant  $i_{ds}$  et  $i_{qs}$  par leurs expressions données à l'équation (3.4), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3}{2} V_s \frac{M_{sr}}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = -\frac{3}{2} \left( \frac{\phi_s}{L_s} V_s - \frac{M_{sr}}{L_s} V_s I_{qr} \right) \end{cases} \quad (3.6)$$

- **Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques :**

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M_{sr} \cdot I_{ds} \\ \phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M_{sr} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M_{sr} \cdot I_{dr} \\ \phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M_{sr} \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (3.8)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \emptyset dr = \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right) I_{dr} + \frac{M_{sr}}{wsLs} \\ \emptyset dr = \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (3.9)$$

A partir de ces équations, les expressions des tensions deviennent :

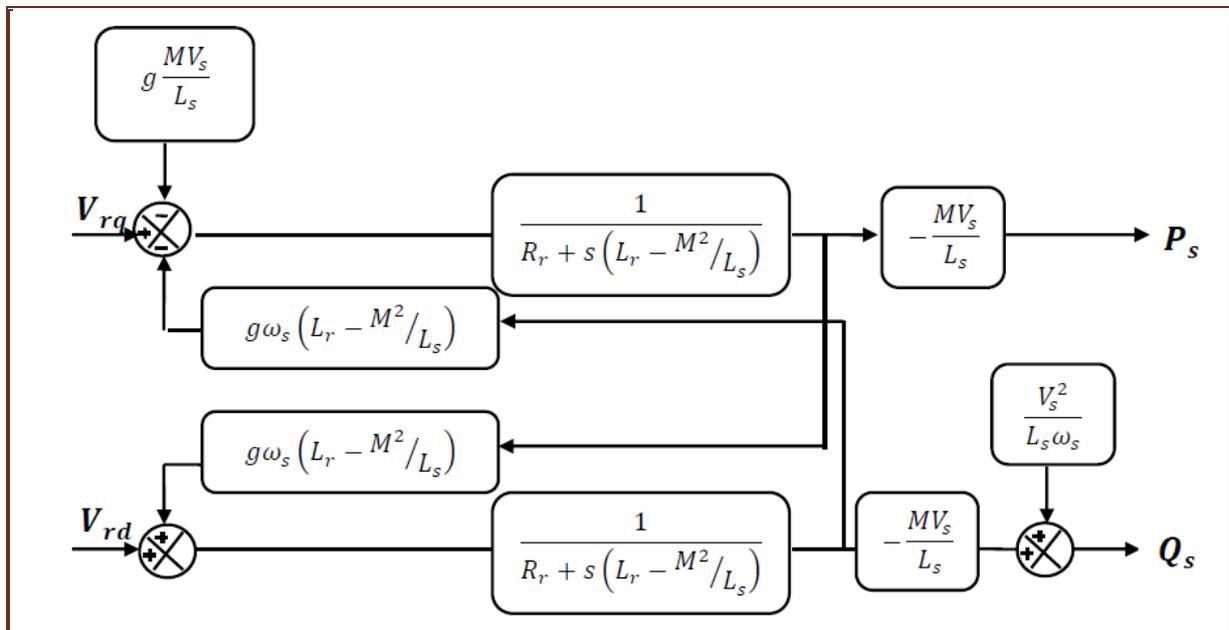
$$\begin{cases} V_{dr} = Rr I_{dr} + \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - gws \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = Rr I_{dr} + \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} - gws \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right) I_{dr} + gws \frac{M_{sr} V_s}{wsLs} \end{cases} \quad (3.10)$$

-  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  sont les composantes biphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus [34].

-  $\left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right)$  : est le terme de couplage entre les deux axes;

-  $gws \left( Lr - \frac{M_{sr}^2}{Ls} \right)$  : représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

Les équations (3. 3), (3.4) et (3. 5) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler (**Figure. (1.3)**).



**Figure 3.3: Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances.**

Ce schéma fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances actives et réactive statoriques. Il montre également que nous pouvons mettre en place une commande vectorielle étant donné qu'à l'influence des

couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront : la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal.

### III.4. Types de commande vectorielle :

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrones à double alimentation dans les applications dans l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse. Pour cela, nous devons connaître, avec exactitude, le vecteur flux statorique (amplitude et phase).

Deux méthodes ont été développées soit :

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

#### III.4.1. Commande vectorielle directe :

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet hall placés sous les dents du stator. Ces capteurs donnent des valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global. Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure. Soit :

- Le problème de filtrage du signal mesuré ;
- La mesure varie en fonction de la température ;
- Le coût de production est élevé. (Capteurs, conditionneurs, filtre,...) ;
- Cette commande n'est donc pas optimale.

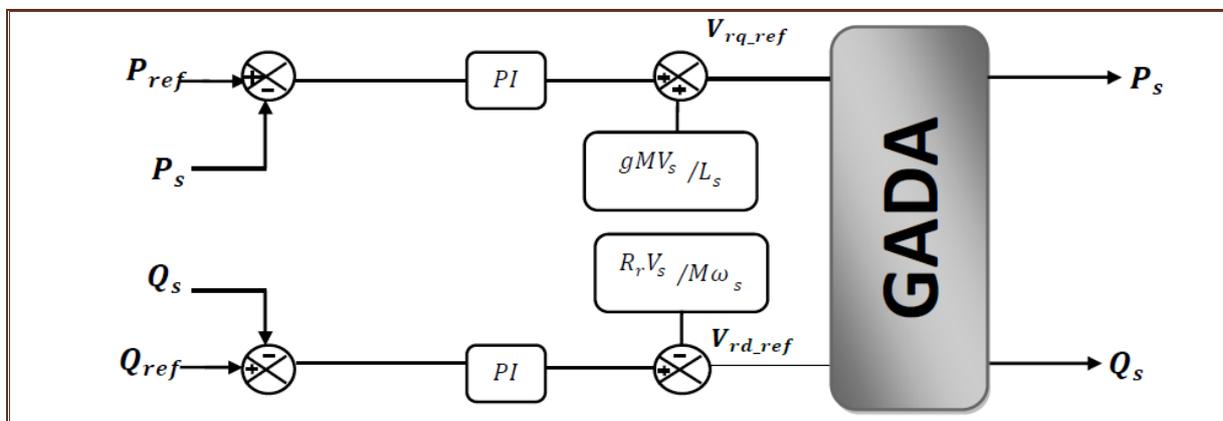


Figure. 3.4: Schéma bloc de la commande directe.

### III.4.2. Commande indirecte des puissances active et réactive :

Les courants rotoriques  $I_{qr}$  et  $I_{dr}$  sont respectivement les images de la puissance active statorique  $P_s$  et la puissance réactive statorique  $Q_s$ , doivent poursuivre leurs courants de références.

#### 1. synthèse de régulateur :

La méthode d'approche de simulation simple pour analyser la stabilité et les performances dynamiques du système consiste à introduire un contrôleur PI en boucle fermée [35].

Le régulateur classique permet de contrôler la précision et la vitesse des systèmes d'asservissement, ils sont très appréciés dans l'industrie. Ce correcteur est une combinaison des deux actions proportionnel et intégral [36].

#### a. Commande en boucle ouverte :

La régulation en boucle ouverte repose essentiellement sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir les courants rotoriques assez indirectement en n'utilisant pas les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe d et q [37].

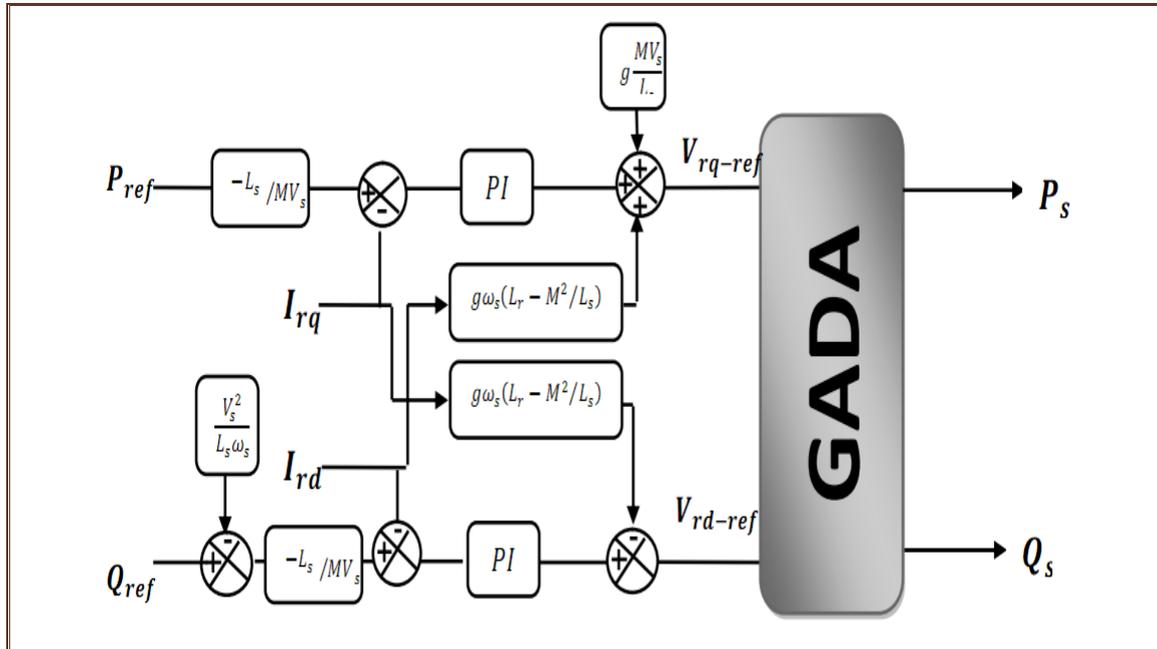


Figure 3.5: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte.

### b. Commande en boucle fermée :

Dans cette méthode, le découplage se fait en sortie des régulateurs en courant rotorique avec un retour du système. Ceci permet le réglage de la puissance, on peut distinguer, un contrôle en cascade de la puissance et du courant rotorique pour chaque axe, puisqu'il permet de contrôler séparément les courants  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  et les puissances  $Q_s$  et  $P_s$  en boucle fermée [38].

A partir des expressions des puissances active et réactive statoriques du système, les références sont dérivées des courants rotoriques directs et de la quadrature suivante:

$$\begin{cases} I_{qr\_ref} = \left(-\frac{L_s}{V_s^2 M}\right) P_{s\_ref} \\ I_{dr\_ref} = \left(-\frac{L_s}{M L_s}\right) \left(Q_{s\_ref} - \frac{V_s^2}{L_s \omega_s}\right) \end{cases} \quad (3.12)$$

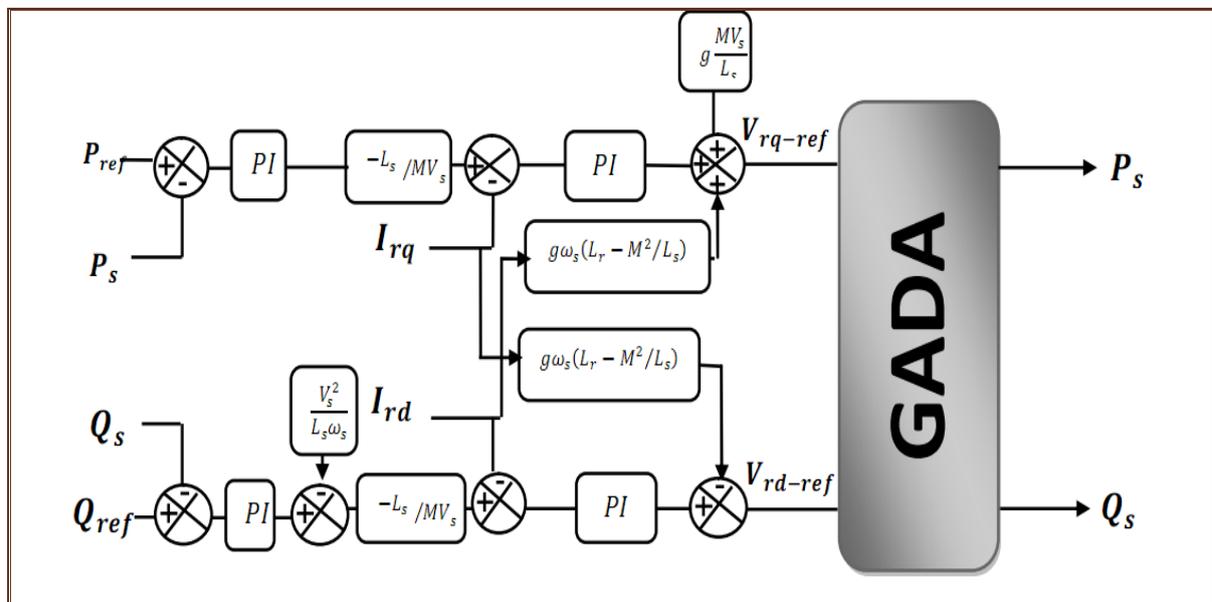


Figure 3.6: Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée.

### c. Calcul des paramètres des régulateurs PI :

Dans notre cas la fonction de transfert correspond aux régulateurs de courant et de puissance:

$$C(P) = Kp + \frac{Ki}{P}$$

Avec :  $Kp$ : le gain proportionnel du régulateur

$K_i$  : le gain intégrateur du régulateur

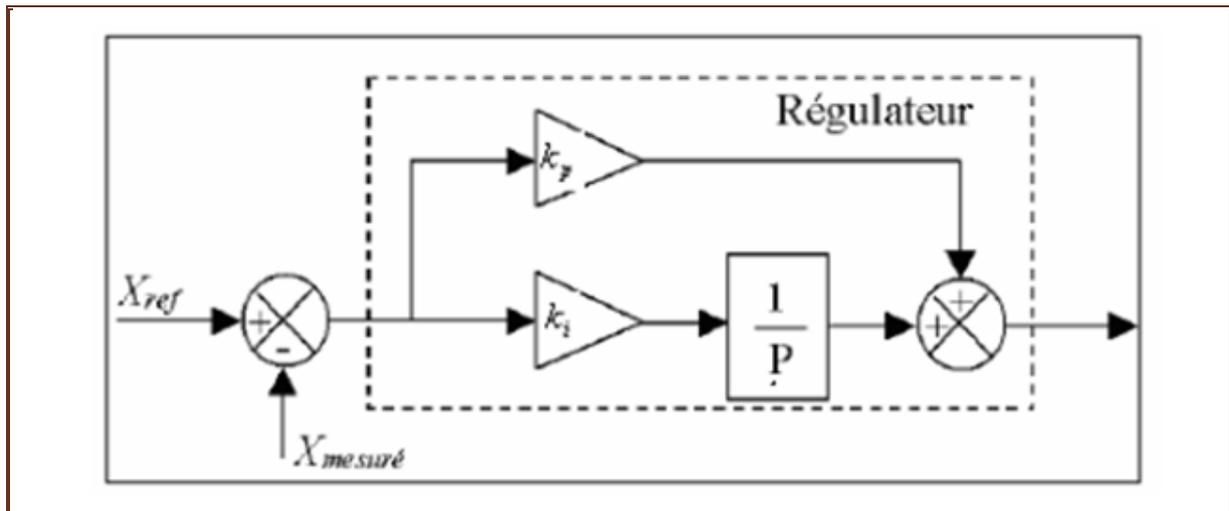


Figure 3.7: Schéma bloc du correcteur PI.

**Régulateur de puissance :**

La fonction de transfert du processus donnée par:

$$G(P) = \frac{MV_s}{LsRr + Ls \left( Lr - \left( \frac{M^2}{Ls} \right) P \right)}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$K(p) = \left[ Kp + \frac{Ki}{P} \right] \left[ \frac{MV_s}{LsRr + Ls \left( Lr - \left( \frac{M^2}{Ls} \right) P \right)} \right]$$

Après simplification, on obtient:

$$K(P) = \left[ \frac{PKp + Ki}{P} \right] \left[ \frac{MV_s / \left( Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right) \right)}{\frac{Rr}{\left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)} + P} \right]$$

Donc:

$$K(P) = \left[ \frac{P + \frac{Ki}{Kp}}{\frac{P}{Kp}} \right] \left[ \frac{\frac{MV_s}{Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)}}{\frac{Rr}{\left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)} + P} \right] \quad (3.13)$$

Pour éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, on utilise la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, donc :

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{Rr}{Lr - \left(\frac{M^2}{Ls}\right)}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$H(P) = \frac{MV_s / (Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right))}{\frac{MV_s}{Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)} + \frac{P}{Kp}} = \frac{1}{1 + \frac{Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right) P}{M V_s Kp}} = \frac{1}{1 + \tau P} \quad (3.14)$$

Par comparaison, on trouve: 
$$\tau = \frac{Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)}{Kp M V_s} \quad (3.15)$$

Donc:

$$\begin{cases} Kp = \frac{1}{\tau} \frac{Ls \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)}{V_s} \\ Ki = \frac{1}{\tau} \frac{Rr Ls}{V_s M} = \frac{Rr M}{Lr - \left( \frac{M^2}{Ls} \right)} Kp \end{cases} \quad (3.16)$$

### Régulateur de courant :

La fonction de transfert du processus donnée par:

$$D(P) = \frac{1}{Rr + \left( Lr - \left( \frac{M^2}{Ls} \right) \right) P} \quad (3.17)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$G(P) = \left( Kp + \frac{Ki}{P} \right) \left( \frac{1}{Rr + \left( Lr - \left( \frac{M^2}{Ls} \right) \right) P} \right)$$

$$G(P) = \left( Kp + \frac{Ki}{P} \right) \left( \frac{\frac{1}{\left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right)}}{\frac{Rr}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} + P} \right)$$

Exprimons les pôles et les zéros de cette fonction de transfert :

$$G(P) = \frac{Kp}{P} \left( P + \frac{Ki}{Kp} \right) \left( \frac{\frac{1}{\left( \frac{1}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} \right)}}{\frac{Rr}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} + P} \right) \quad (3.18)$$

Pour éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, on utilise la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur, en supposant :

$$\frac{Ki}{Kp} = \frac{Rr}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} \quad (3.19)$$

A partir de l'équation (3.19), on trouve :

$$Ki = \frac{Rr}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} Kp \quad (3.20)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$H(P) = \frac{\frac{1}{Lr - \frac{M^2}{Ls}}}{\frac{P}{Kp} + \frac{1}{Lr - \frac{M^2}{Ls}}} = \frac{\frac{1}{Lr - \frac{M^2}{Ls}}}{\left( \frac{1}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} \right) \left( 1 + \frac{P}{Kp \left( \frac{1}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} \right)} \right)} = \frac{1}{1 + \tau P} \quad (3.21)$$

Avec :

$$\tau = \frac{Lr - \frac{M^2}{Ls}}{Kp} \quad (3.22)$$

Les paramètres du régulateur kp et ki sont donnés par :

$$\begin{cases} Kp = \frac{1}{\tau} \left( Lr - \frac{M^2}{Ls} \right) \\ Ki = Kp \left( \frac{Rr}{Lr - \frac{M^2}{Ls}} \right) \end{cases} \quad (3.23)$$

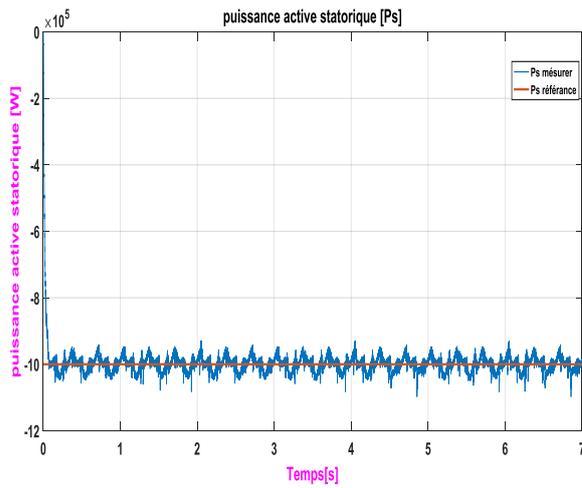
$\tau$  : désigne la constante de temps du système fixée à 0.0001s

### III.5. Partie simulation :

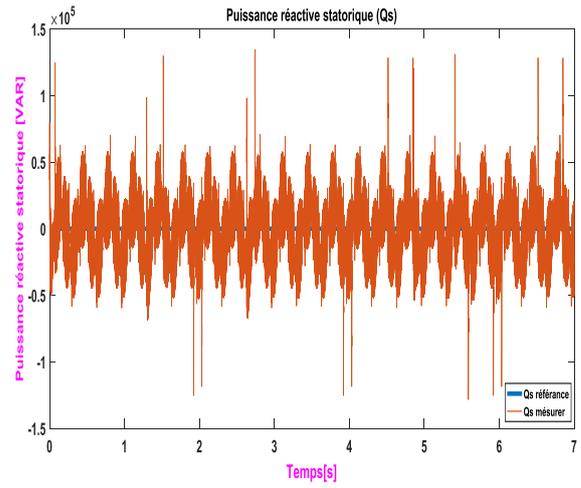
#### III.5.1. Commande de la GADA seule :

##### a. Cas d'une régulation de puissances :

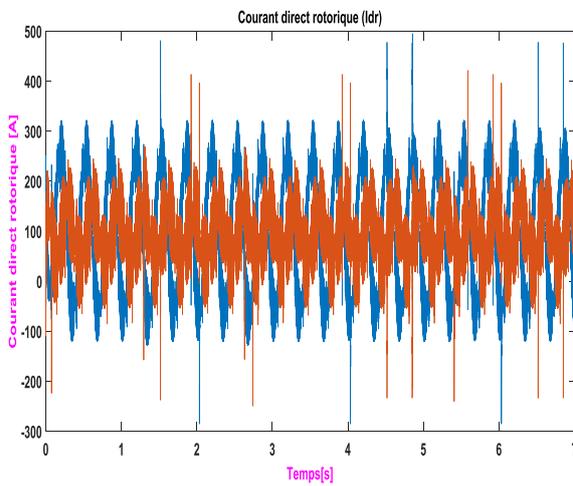
Les résultats de simulation présenter sur les figures ci-dessous, nous permet de présenter les performances de la conduite de la GADA alimentée par un onduleur à deux niveaux commandée par la stratégie MLI. La génératrice est commandée par application d'une puissance active de référence  $P_s = -10 \times 10^5$  W à l'instant  $t = 0$ s et une puissance réactive  $Q_s$  nulle.



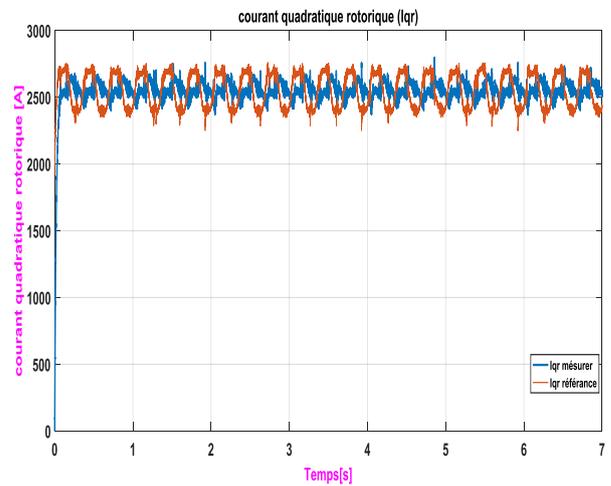
**Puisaanec active**



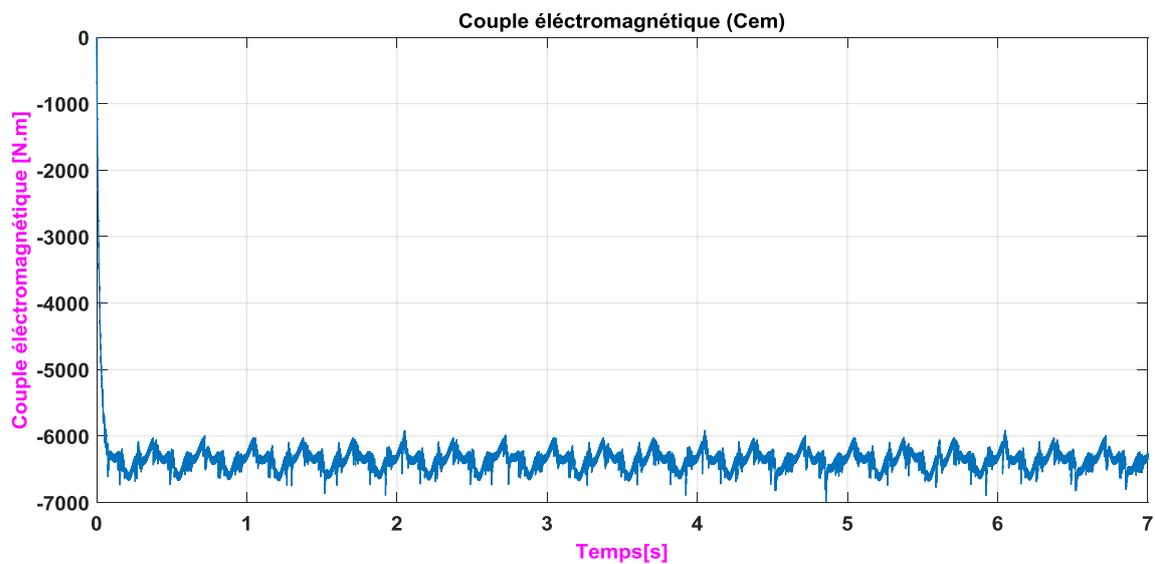
**Puisaanec réactive**



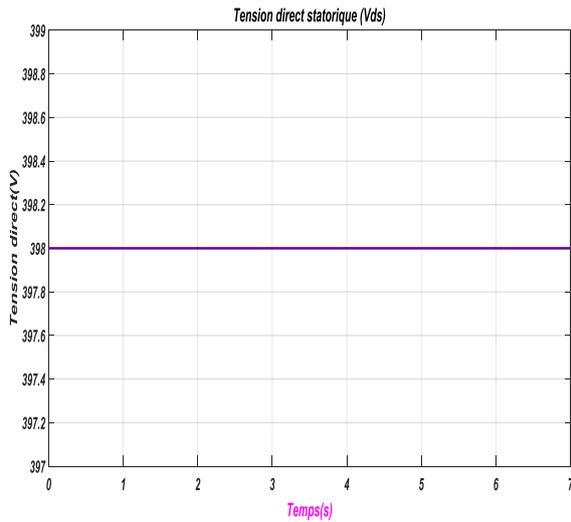
**Courant rotorique direct**



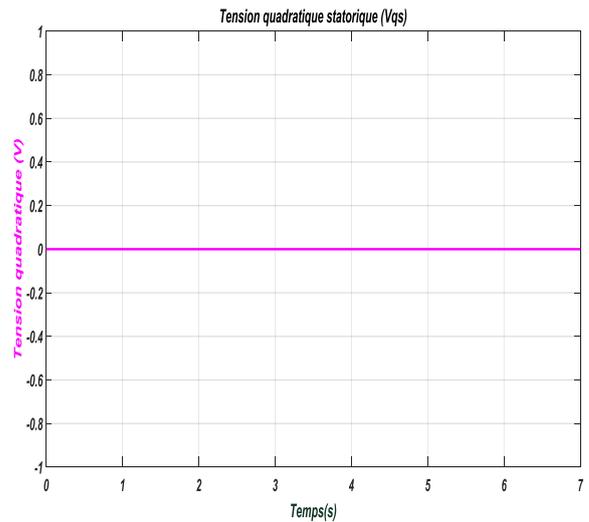
**Courant rotorique quadrature**



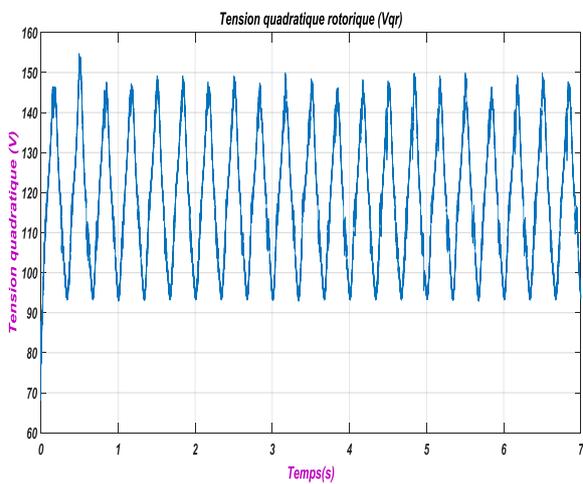
**Couple électromagnétique**



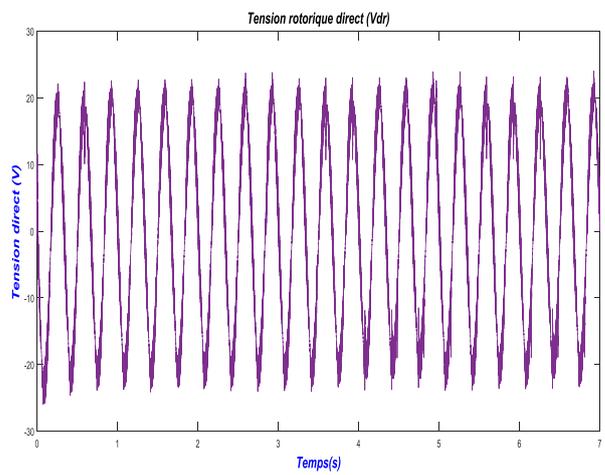
Tension statorique direct



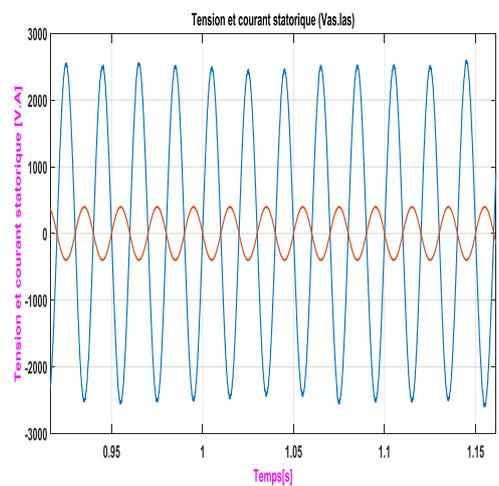
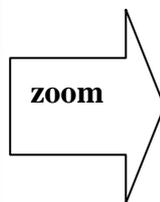
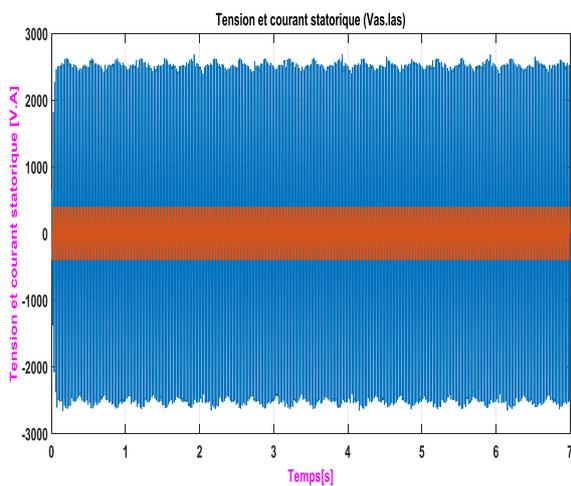
Tension statorique quadrature



Tension rotorique direct



Tension rotorique quadrature



Tension et courant statorique de la phase "a" ( $V_{as}$ ,  $I_{as}$ )

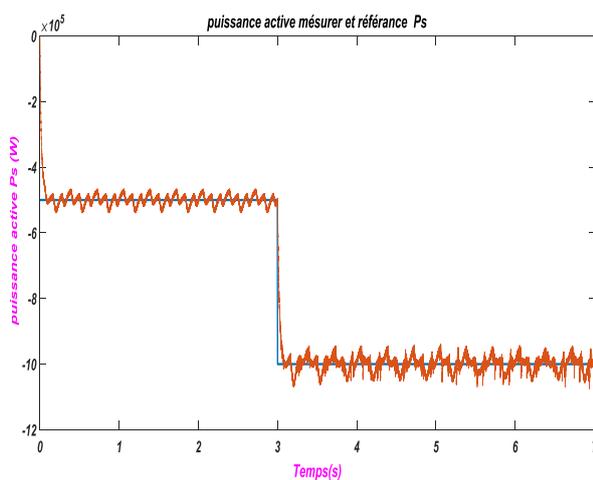
Figure 3.9: Courbes obtenus par simulation de la commande de la GADA seule (cas d'une régulation de puissances)

Les résultats obtenus montrent que:

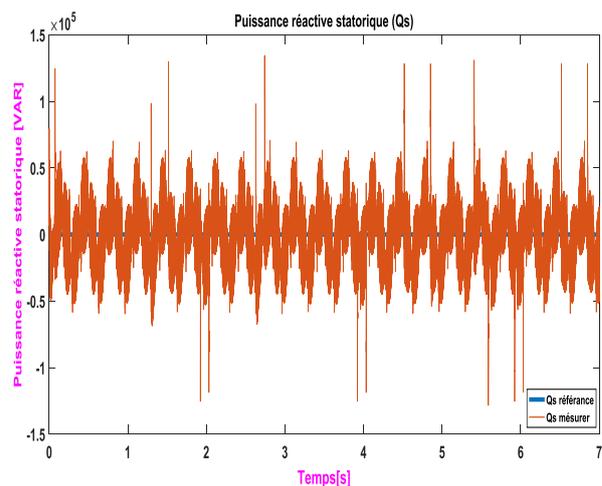
- Les puissances active et réactive délivrées par la GADA, suivent les références correspondantes. Ceci est dû au bon contrôle des composantes directe et quadrature des courants rotoriques.
- La composante quadrature du courant statorique est nulle, ce qui prouve le principe de découplage imposé par la commande vectorielle indirecte.
- Les courants obtenus au stator sont de formes sinusoïdales.
- Le couple électromagnétique prend une valeur négative en régime permanent.
- La puissance active côté stator est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par le GADA.
- La puissance réactive est nulle ( $Q = 0$ ), correspond à un facteur de puissance unitaire.

### b. Cas d'une poursuite de puissances

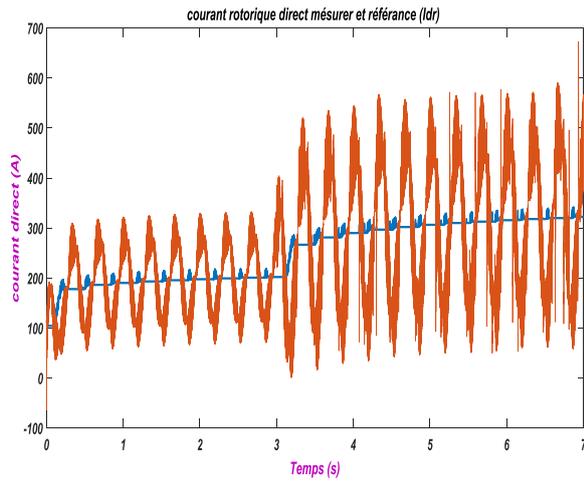
Les résultats de simulation présentés sur les figures ci-dessous, nous permettent de présenter les performances de la commande indirecte de la GADA. La génératrice est commandée par application d'une puissance active de référence variable:  $P_s = -5 \times 10^5 \text{ W}$  entre les instants 0s et 3s, ensuite  $P_s = -10 \times 10^5 \text{ W}$  entre les instants 3s et 7s et une puissance réactive  $Q_s$  nulle.



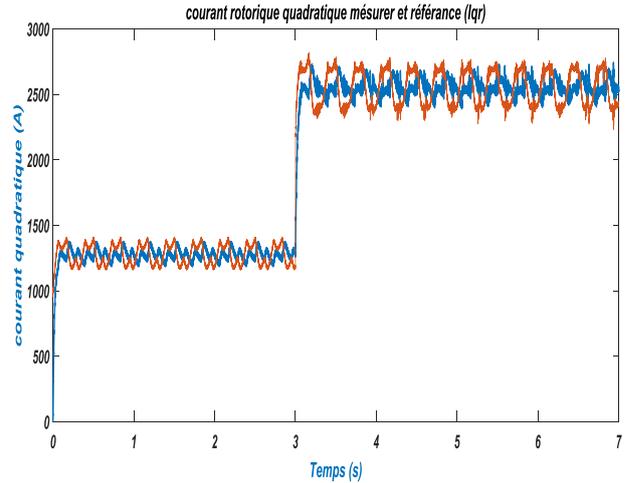
**Puissance active statorique**



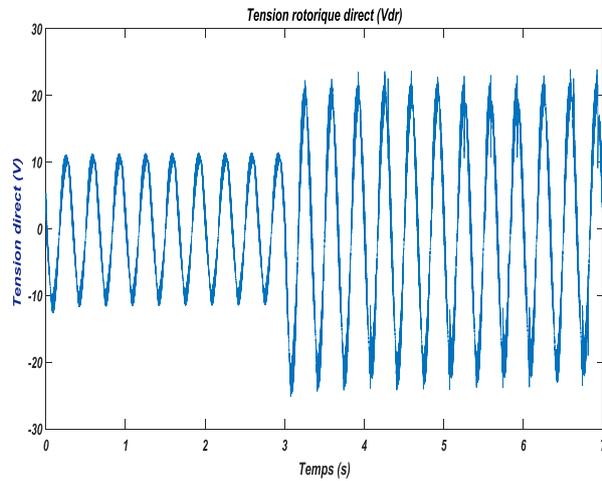
**Puissance réactive statorique**



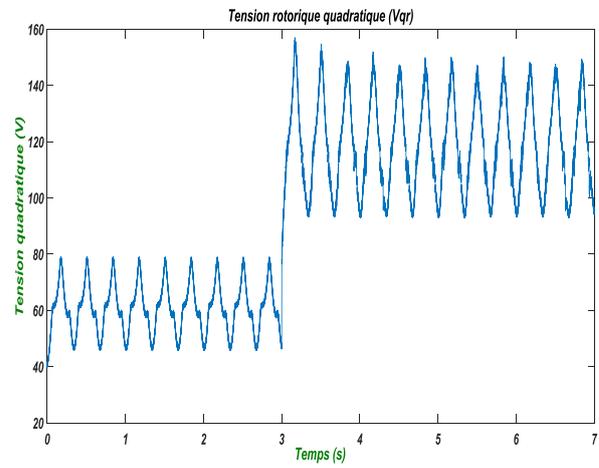
**Courant rotorique quadrature**



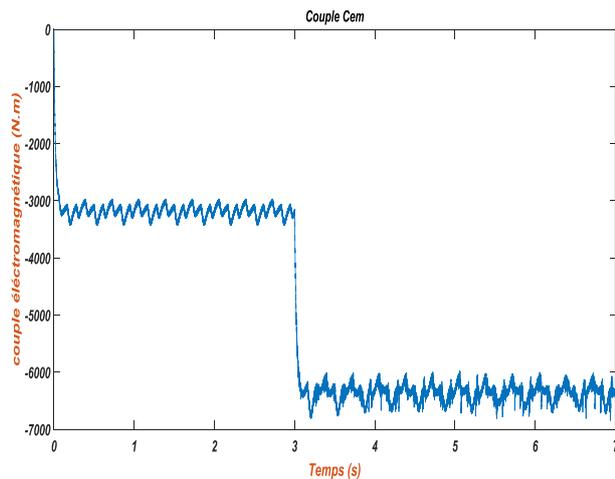
**Courant rotorique direct**



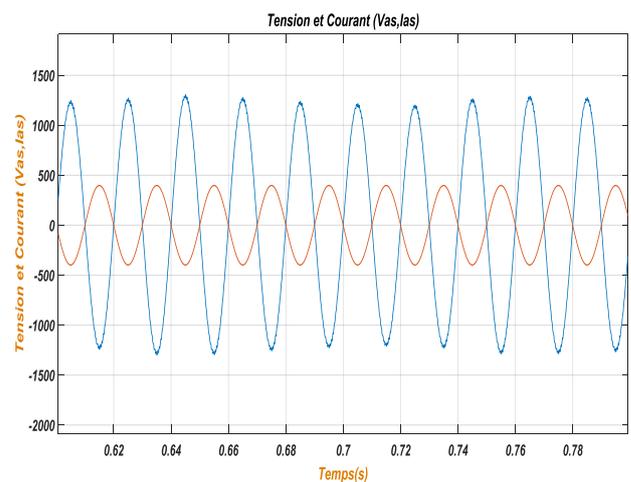
**Tension rotorique direct**



**Tension rotorique quadrature**



**Couple électromagnétique**



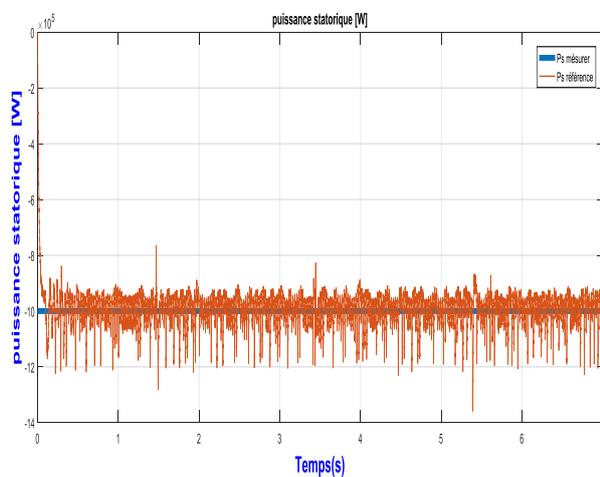
**Tension et courant statoriques Vas, Ias**

**Figure 3.10: Courbes obtenus par simulation de la commande de la GADA seule (cas d'une poursuite de puissances)**

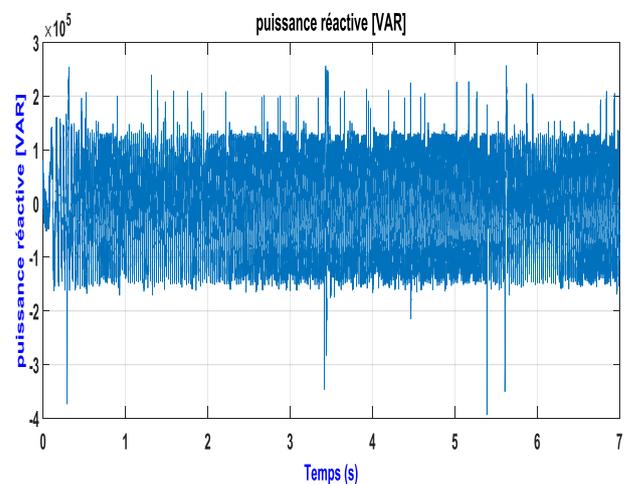
Les résultats obtenus montrent que les références des composantes du courant rotorique sont bien suivis par le générateur. Aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive, on remarque une meilleure poursuite des consignes pour les puissances avec le régulateur classique PI.

### III.5.2. Résultats de simulation de la chaîne globale :

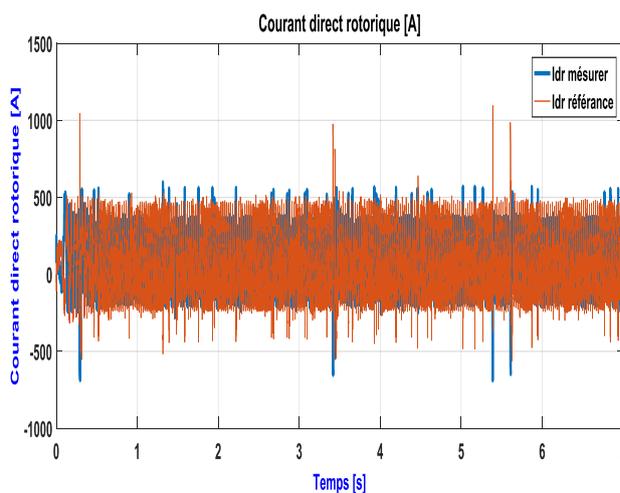
Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulation de la chaîne de conversion globale, c'est-à-dire; la turbine avec la GADA qui est connectée directement au réseau.



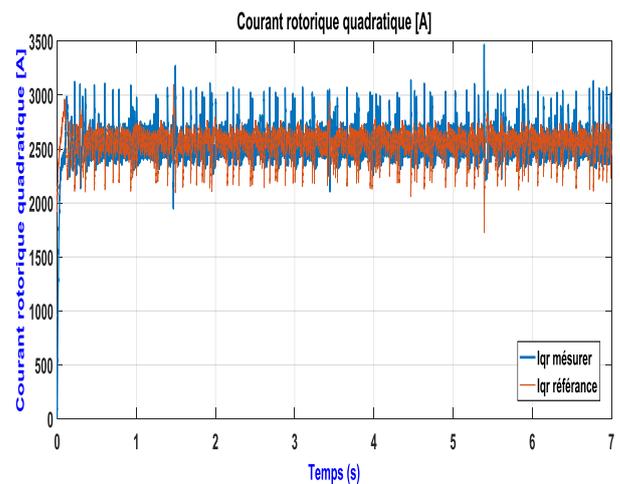
**Puissance active statorique  $P_s$**



**Puissance réactive statorique  $Q_s$**



**Courant rotorique direct**



**Courant rotorique quadrature**

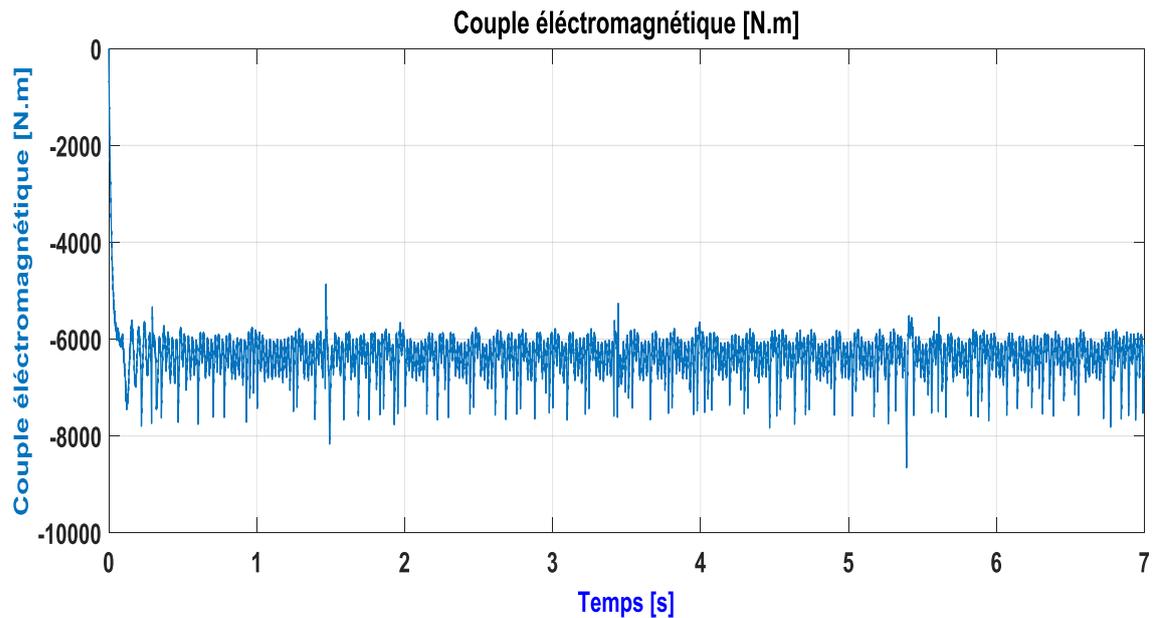
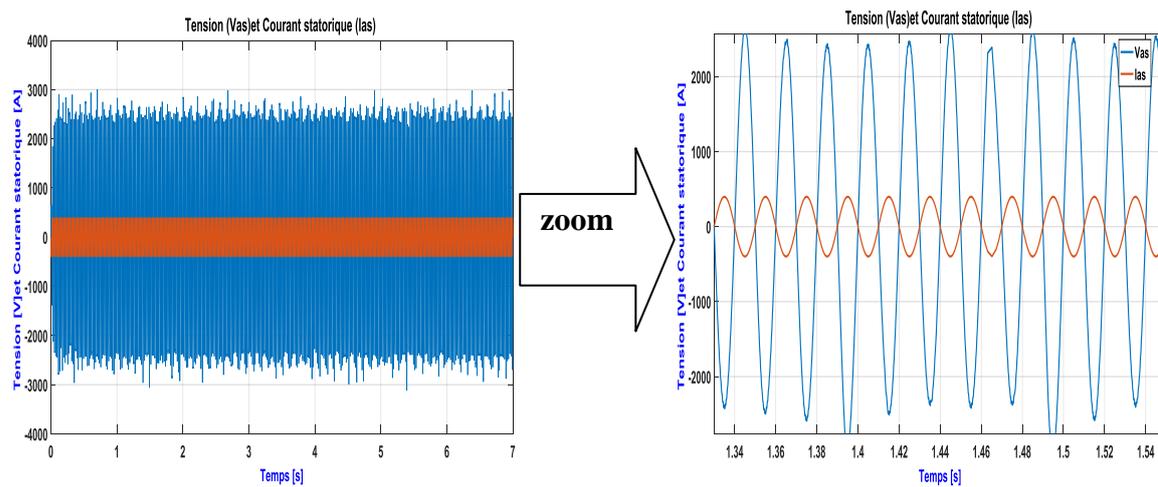
Couple électromagnétique  $C_{em}$ Tension et courant statorique  $V_{as}$ ,  $I_{as}$ 

Figure 3.11: Courbes obtenus par simulation du modèle de la GADA avec turbine.

Les résultats obtenus montrent que:

- les variations de la vitesse du vent engendrent l'injection des perturbations dans les allures de la puissance active statorique, le couple électromagnétique, la tension rotorique et le courant rotorique.

- Des puissances active et réactive permettent de réguler les puissances active et réactive fournies au réseau selon des consignes de référence bien définies, la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active.
- Les tensions et les courants statoriques sont en opposition de phases, ce qui prouve que la puissance réactive est nulle et le facteur de puissance unitaire.

### **III.6. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle indirecte pour la régulation des puissances active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation. Les résultats trouvés ont prouvé l'efficacité de cette méthode même lorsque la génératrice est utilisée dans une chaîne de conversion.

## **CONCLUSION GENERALE**

L'objectif principal de ce travail est d'étudier et de réaliser par la simulation numérique une commande de la génératrice asynchrones double alimentation dans une chaîne de conversion éolienne. Pour cela, nous avons fait la modélisation et la simulation des différentes parties de la chaîne de conversion. Pour capter le maximum de puissance dans une turbine éolienne, un algorithme de commande MPPT est utilisé. La commande des puissances active et réactive de la GADA est effectuée par utilisation de la commande vectorielle indirecte par orientation du flux statorique.

Pour atteindre notre objectif, nous avons introduit dans le premier chapitre des généralités sur les éoliennes et ses différents types. Nous avons vu aussi à travers ce chapitre les technologies des systèmes éoliens à vitesse variable et fixe, et leurs avantages et inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, nous avons établi le modèle mathématique des éléments principaux constituant la chaîne de conversion électromécanique dans l'éolienne. Nous sommes intéressés par l'étude de la partie mécanique de l'éolienne et à sa commande. Nous avons développé une technique de maximisation de la puissance extraite. Les résultats de simulation de ces algorithmes (MPPT) ont montré l'efficacité du contrôle pour la poursuite du point de fonctionnement optimal. Ensuite, le modèle mathématique de la GADA est présenté dans les deux repères (triphase et biphasé) avec les résultats de simulation trouvés.

La génératrice asynchrone été destinée pour la production d'énergie dans le domaine éolien, il est donc très utile de raisonner en terme de puissance. Pour cela, la commande vectorielle élaborée dans le troisième chapitre est une commande vectorielle indirecte à flux statorique orienté qui permet le contrôle de la puissance active et réactive. Les résultats obtenus montrent le bon suivi des consignes pour les deux puissances statoriques "active et réactive" par les puissances réelles débitées par le stator de la machine et prouvent l'efficacité de la commande appliquée.

Nous avons terminés notre travail par une simulation de la chaîne de conversion globale avec la GADA connectée directement au réseau.

## Référence :

[01]:**A.Guediri (2017)**, " *Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension*", *Mémoire de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.*

[02]**T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau et C. Buthion (2006)**, « *Eoliennes en milieu urbain - État de l'art* », pp. 1-129.

[03]**S El Aimani(2007)**,« *Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », *Thèse de Doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).*

[04]**R. Michaux, P. Letellier (1997)**, « *Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique* », *revue de l'électricité et de l'électronique*, N° 3, mars, pp. 37-42.

[05]**B.Multon, G. Robin, M.Ruellan, H.Ben Ahmed (2004)**, « *3<sup>ème</sup> situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables* », *revue 3Ei No 36* , pp. 1-14.

[06]**H. Ben Ahmed**, « *Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés* », *séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.*

[07] **K. Bahia (2011)**, " *Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation*", *Mémoire de Magister, UniversitéAboubekrBelkaid Tlemcen.*

[08]**D.Fatou (2018)**, " *Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents*", *Mémoire de MASTER, UniversitéBadji-Mokhtar d'Annaba.*

[09]**L.Fateh (2016)**,, " *Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent*", *Mémoire de DOCTORAT, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA .*

[10]**B.Djamel (2001)**, « *Commande directe en couple d'une machine asynchrone-structures d'observation- application aux systèmes multi machines- multi convertisseurs* », *thèse doctorat, école nationale d'ingénieurs de Tunis.*

[11]**B. D Mohammed BenyahiaTariq (2015)**, " *Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents.*", *Mémoire de MASTER, Université Dr . Tahar Moulay de Saïda Faculté de la Technologie.*

[12] **B.Florent (2011)**, "Emulation d'une chaîne éolienne de conversion d'énergie". Mémoire de Master. Université Henri Poincaré, Nancy I Faculté des Sciences et Technologies. Soutenu le 14/09/2011.

[13] **CH.Naim (2018)**, " Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne ", Mémoire de Doctorat, Académique, Université des Frères Mentouri de Constantine, 07 / 11 / 2018.

[14] **A. Abdenour (2007)**, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

[15] **Y. Djeriri (2009)**, 'Commande Vectorielle d'une MADA intégrée à un Système Eolien', Mémoire de Magistère, Université de Sidi Bel Abbès, Algérie, Décembre 2009.

[16] **F. Fendouli, K. Nabti, K. Abed et H. Benalli(2011)**, 'Modélisation, Simulation et Contrôle d'une Turbine Eolienne à Vitesse Variable Basée sur la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 14, N°1, pp. 109 – 120.

[17] **F. Poitiers (2003)**, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes : -Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau". 19/12/ 2003.

[18] **A. BOulahia(2009)**, "Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", mémoire de magister, université de Constantine. 28/04/ 2009.

[19] **A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum et A. Hammoumi(2010)**, "Commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien", Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682.

[20] **M. Mohammed ,B. Saïd Ali(2014)**, " Etude et Simulation d'un aérogénérateur connecté au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret", Mémoire de Master, Université AboubekrBelkaid Tlemcen.

[21] **A.Boyette(2006)**, « contrôle et commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne», thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré.

[22] **M.Messaoud (2008)**, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants Permanents », Mémoire de Magister, Université de Batna.

[23] **A. Tamaarat (2015)**, «Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA», Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra.

[24] **F. Poitiers (2003)**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, Nantes, France.

**[25]A.Bouhadda(2011)**, "*Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne*", *Mémoire de Magister, université Mouloud Maameri , Tizi-ouzou.07/07/2011.*

**[26]F.Z. TRIA (2013)**, "*Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques*", *mémoire de magister, Université d'El- oued 2013.*

**[27]Naouel HAMDI (2008)**, "*Modélisation et commande des génératrices éoliennes*", *Mémoire de DOCTORAT, Université MENTOURI de CONSTANTINE 2008.*

**[28]B.A. ASMA (2016)**, "*Etude de la commande d'un système éolien base sur une GADA*", *Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar – Batna Soutenu le : 24/04/2016.*

**[29] M. K. IDJDARENE (2010)**, "*Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes*", *Thèse de doctorat d'université de Lille 1 (France). 23/05/2010.*

**[30] : M.A HASSAD (2012)**, "*Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques*", *Mémoire de Magister, université Sétif 1 (Algérie).*

## ANNEXE A

## A.1 Paramètres de la turbine éolienne :

Paramètre	Valeur numérique
Nombre de pales	3
Rayon de l'éolienne R	R=35.25
Densité de l'air $\rho$	$\rho=1.225$
Gain du multiplicateur de vitesse G	G=90
Moment d'inertie total	J=10
Coefficient de frottement visqueux	f=0.003
Réducteur de vitesse	K=1800
Coefficient de puissance de l'éolienne	c1=0.5 c2=116 c3=0.4 c4=5 c5=21 c6=0.0068
Vitesse spécifique optimale ( $\lambda_{opt}$ )	LambdaOpt=7.05
Coefficient de puissance maximale(Cp_Max)	CpMax=0.4412
Kp	$2 \times 10^7$
Ki	$10^5$

## A.2 Paramètres de la GADA :

Paramètre	Valeur numérique
Type de génératrice	Machine asynchrone à double alimentation
Puissance nominale Pn	1.5 MW
Tension nominale statorique Vs	398 V
Fréquence nominale statorique f	50 Hz
Resistance statorique Rs	0.012 $\Omega$
Resistance rotorique Rr	0.021 $\Omega$
Inductance statorique Ls	0.0137 H
Inductance rotorique Lr	0.0136 H
Inductance mutuelle M	0.0135 H
Nombre de paires de pôles P	2
Coefficient de frottement f	0.0024 N.m.s

## ANNEXE B

## B.1 Paramètres des régulateurs :

/ Grandeur	Puissance [W]		Courant [A]	
	Puissance (Ps)	Puissance (Qs)	Courant (Idr)	Courant (Iqr)
<b>Kp</b>	<b>0.7575</b>	<b>0.7575</b>	<b>0.0297</b>	<b>0.0297</b>
<b>Ki</b>	<b>53.5455</b>	<b>53.5455</b>	<b>2.1</b>	<b>2.1</b>

✚ Régulateur de puissance :

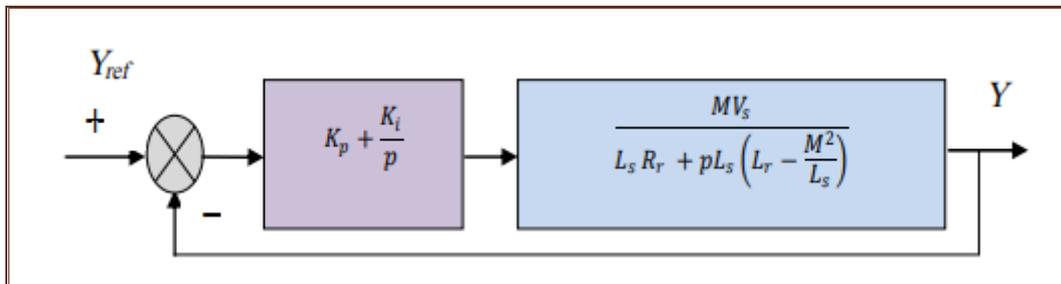


Figure B.1: Système de puissance régulé par un PI

✚ Régulateur de courant :

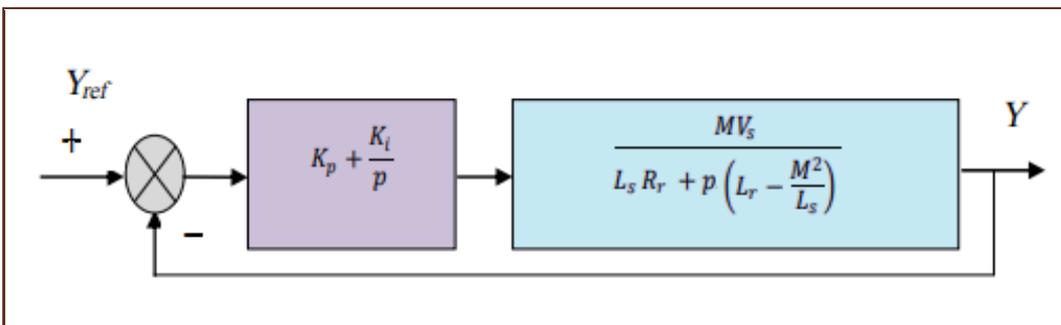


Figure B.2: Système de courant régulé par un PI