

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : TECHNOLOGE

DEPARTEMENT: GENIE ELECTRIQUE



DOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

FILIERE : GENIE ELECTRIQUE

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique

Par:

DJAALAB Lazhar

Intitulé

**Etude et optimisation d'une chaine de  
conversion éolienne de petite taille avec  
stockage, à base d'un Générateur synchrone à  
aimants permanents**

Soutenu le 26-06-2019 devant le jury composé de:

**BOUKHALFA Abdelouahab**

**Université M'sila**

**Président**

**M.MAYAOUF Messaoud**

**Université M'sila**

**Rapporteur**

**BELHITECHE Elhadi**

**Université M'sila**

**Examineur**

**Année universitaire : 2018 /2019**

# الشكر والعرفان

كن عالما ... فان لم تستطع فكن متعلما، فان لم تستطع فاحب العلماء،

فان لم تستطع فلا تبغضهم.

بعد رحلة بحث وجهد واجتهاد تكللت بإنجاز هذا البحث، الحمد لله عز وجل على نعمه التي من بها علينا فهو العلي القدير، كما لا يسعني الا ان اشكر الأستاذ "مسعود معيوف" لما قدمه من جهد ونصح ومعرفة طيلة انجاز هذا البحث.

كما اتقدم بجزيل الشكر و الامتنان إلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد.

كما لا يفوتني أن أتقدم بالشكر و التقدير إلى السادة أعضاء اللجنة على قبولهم مناقشة هذه المذكرة.

# اهداء

بسم الله الرحمن الرحيم: (وَقُلِ اعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ) سورة التوبة

الهي لا يطيب الليل الا بشكرك...ولا يطيب النهار الا بطاعتك...ولا تطيب اللحظات الا بذكرك...ولا تطيب الاخرة الا بعفوك.

الى من كلله الله بالهيبه والوقار...الى من علمني العطاء بدون انتظار...اليك والدي العزيز

الى من كان دعاؤها سر ناجحي... وحنانها بلسم جراحي الى اغلى الحبايب...اليك امي العزيزة

الى من اظهروا لي ما هو اجمل من الحياة الى اخواتي جميعهم وعلى راسهم اخي ورفيق دربي رضوان احبيك بتحية خاصة اخي العزيز

تحية خاصة الى زوجتي الكريمة وفلذة كبدي ايوب عبد المولى حفظه الله.

الى الاخوة التي لم تلدهم امي الى من عرفت كيف اجدهم وعلموني ان لا اضيعهم... اليك اخي خالد. هشام.

تحية خاصة كذلك الى كل من يعرف لزهر جعلاب والى من يجمع بين سعادتني وحزني الى من لم اعرفهم ولم يعرفوني الى من اتمنى ان اذكرهم اذا ذكروني الى من اتمنى ان تبقى صورهم في عيون...

لزهر جعلاب.

## SOMMAIRE

<b>Introduction Générale</b> .....	2
<b>Problématique</b> .....	2
<b>Structure du mémoire</b> .....	2
<b>Chapitre1</b>	
<b>Modélisation de la turbine éolienne à axe vertical</b>	
<b>I.1Introduction</b> .....	5
<b>I.2 Conversion de l'énergie éolienne</b> .....	5
<b>I.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique</b> .....	5
<b>I.2.2Loi de Betz</b> .....	6
<b>I.2.3 La vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio)</b> .....	7
<b>I.2.4 Coefficient de puissance (power coefficient)</b> .....	8
<b>I.2.5 Coefficient de couple</b> .....	9
<b>I.2.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes</b> .....	9
<b>I.2.7 Production d'énergie mécanique</b> .....	10
<b>I.3 Modélisation du système éolien</b> .....	11
<b>I.3.1Introduction</b> .....	11

# SOMMAIRE

---

<b>I.3.2Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine.....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.3 Modèle de la turbine.....</b>	<b>13</b>
<b>I.3.4 Modèle du multiplication.....</b>	<b>14</b>
<b>I.3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5 Système de contrôle de l'aéroturbine .....</b>	<b>17</b>
<b><i>I.6 Méthodes de recherche du point maximum de puissance .....</i></b>	<b>17</b>
<b>I.7 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse.....</b>	<b>18</b>
<b>I.8 Conception du correcteur de vitesse.....</b>	<b>19</b>
<b>I.8.1 Correcteur proportionnel intégral à avance de phase .....</b>	<b>19</b>
<b>I.8.2 : Correcteur proportionnel intégral avec anticipation.....</b>	<b>21</b>
<b>I.9 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse .....</b>	<b>22</b>
<b>I.10 Resultants de simulation.....</b>	<b>24</b>
<b>I.11 Résultats de simulation avec asservissement de vitesse.....</b>	<b>24</b>
<b>I.12 Conclusion.....</b>	<b>27</b>

# SOMMAIRE

---

## Chapitre II

### Modélisation de la machine synchrone a aimants permanents

II.1 Introduction.....	29
II.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	29
II.3 Modèle de la MSAP.....	29
II.3.1 Equations électriques.....	30
II.3.1 .1 Passage au repère de Park.....	30
II.3.2 Equations magnétiques.....	32
II.3.2.1 Expression du couple électromagnétique.....	33
II.3.3 Equations mécaniques.....	34
II.4 Simulation de la GSAP.....	34
II.4.1 GSAP à vide.....	34
II.4.1.1 Résultats de simulation.....	35
II.4.2 L'influence d'une charge séparée ( $R_{ch}, L_{ch}$ ) .....	35
II.4.2.1 Equations d'état.....	36
II.4.2.2 Résultats de simulation.....	37
II.4.3 L'influence d'une charge réelle sur une source parfaite.....	38

# SOMMAIRE

---

<b>II.4.3.1 Equations d'état.....</b>	<b>38</b>
<b>II.4.3.2 Résultats de simulation.....</b>	<b>39</b>
<b>II.5.Conclusion.....</b>	<b>40</b>
<b>ChapitreIII</b>	
<b>Etude et optimisation d'un chaîne de conversion éolienne débitant sur une batterie</b>	
<b>III.1 Introduction .....</b>	<b>42</b>
<b>III.2 Configurations de chaînes de conversion dédiées au petit éolien .....</b>	<b>42</b>
<b>III.2.1 Chaîne de conversion commandée en MPPT par capteur de tension du bus continu et de la batterie.....</b>	<b>43</b>
<b>III.2.2Chaîne de conversion éolienne passive avec transformateur.....</b>	<b>44</b>
<b>III.2.3 Petite éolienne tripale autonome débitant directement sur charge variable.....</b>	<b>44</b>
<b>III.3 Chaîne de conversion éolienne active avec commande MPPT par régulation du bus continu.....</b>	<b>45</b>
<b>III.3.1Architecture d'une chaîne éolienne « passive » ave multiplicateur de vitesse.....</b>	<b>46</b>
<b>III.4 Etude de la chaîne éolienne « passive».....</b>	<b>47</b>
<b>III.4.1 Introduction.....</b>	<b>47</b>
<b>III.4.2 Modélisation de la chaîne éolienne passive.....</b>	<b>48</b>
<b>III.4.2.1 Etude d'un redresseur monophasé à diode sur charge R L.....</b>	<b>48</b>
<b>III.4.2.2 Modèle du redresseur monophasé à diode.....</b>	<b>49</b>

# SOMMAIRE

---

<b>III.4.2.3 Modélisation et simulation d'un pont de diode sans prise en compte de l'empiétement.....</b>	<b>50</b>
<b>III.4.3 Etude analytique de l'ensemble GSAP-Pont de diodes-Bus continu.....</b>	<b>52</b>
<b>III.4.3.1 Modèle équivalent de la chaîne éolienne passive.....</b>	<b>52</b>
<b>III.4.3.2 Résultats de simulation.....</b>	<b>55</b>
<b>III.4.4 Conclusion.....</b>	<b>57</b>
<b>III.5 Etude de la chaîne éolienne « active».....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.1 Introduction.....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.2 Convertisseurs statiques commandés dans la chaîne éolienne active.....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.2.1 Principe de modélisation du convertisseur totalement commandé.....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.3 Modélisation de l'association aérogénérateur-pont de diodes-hacheur dévolteur.....</b>	<b>58</b>
<b>III.5.3.1 Modélisation du hacheur dévolteur simple.....</b>	<b>59</b>
<b>III.5.4 Compatibilité de la structure vis-à-vis de la tension batterie.....</b>	<b>61</b>
<b>III.5.5 Calcul du régulateur PI pour le hacheur dévolteur simple.....</b>	<b>62</b>
<b>III.5.6 Maximisation de la puissance avec contrôle en vitesse.....</b>	<b>63</b>
<b>III.5.7 Courbes caractéristiques de la turbine utilisé.....</b>	<b>65</b>
<b>III.6 Résultats de simulation.....</b>	<b>67</b>

# SOMMAIRE

---

<b>III.7 Conclusion.....</b>	<b>68</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>73</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>77</b>
<b>A-Schémas blocs de simulation.....</b>	<b>78</b>
<b>B-Paramètres de simulation.....</b>	<b>80</b>

## Liste des figure

---

Figure I-1 : colonne d'air animée d'une vitesse .....	5
FigureI-2: Tube de courant autour d'une éolienne.....	6
Figure I-3 : Turbine à axe vertical de typ Savonius.....	7
Figure I-4 : Vitesse du vent $V$ et vitesse tangentielle $\Omega_t R_t$ .....	8
Figure I-5 : Allures des coefficients $C_p$ et $C_m$ en fonction de la vitesse spécifique $\lambda$ et l'angle de calage .....	10
Figure I-6 : puissance théorique disponible de la turbine modélisée pour différentes vitesse de vent.....	11
Figure I-7: Représentation du système éolie.....	12
.Figure I-8 : Schéma simplifié de la turbine.....	13
Figure I-9 : Schéma du système éolie.....	14
Figure I-10 : caractéristiques: puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation... ..	15
Figure I-11 : Caractéristiques : vitesse de rotation, vitesse de vent.....	16
Figure I-12 : schéma bloc du correcteur PI à avance de phase.....	19
Figure I-13 : Schéma bloc du correcteur PI à avancé de phase.....	21
FigureI-14 : Schéma bloc du correcteur PI avec anticipation.....	22
Figure I-15 : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation.....	23
Figure I-16 Profil du vent.....	24

## Liste des figure

---

Figure 1-17 : Résultats de simulation avec stratégie de commande sans asservissement de vitesse.....	24
Figure I-18: Résultats de simulation avec régulateur PI à avance de phase.....	25
Figure I-19: Résultats de simulation avec régulateur PI avec anticipation.....	25
Figure I-20 : Puissances optimales avec les trois stratégies de contrôle.....	26
Figure II.1 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	30
Figure II.2 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.....	31
Figure II.3: circuit équivalent de MSAP –convention moteur.....	32
Figure II.4: Modèle de PARK pour la GSAP.....	33
Figure II.5: GSAP à vide.....	35
Figure II.6: GSAP en charge.....	38
Figure II.7: GSAP connectée à une source de tension par.....	39
Figure III-1 : Structure générale des chaînes éoliennes comparées.....	43
Figure III-2 : Chaîne de conversion commandée en MPPT par capteur de tension du bus continu et de la batterie... ..	43
Figure III-3 : Chaîne de conversion éolienne passive avec transformateur.....	44
Figure III-4 : Petite éolienne tripale autonome débitant directement sur charge variable.....	45
Figure III-5 : Chaîne de conversion éolienne active avec commande MPPT par régulation du bus continu .....	45

## Liste des figure

---

FigureIII-6 : Architecture d'une chaîne éolienne « passive » ave multiplicateur de vitesse.....	46
Figure III-7 : Architecture d'une chaîne éolienne passive.....	48
Figure III -8 : Redresseur monophasé à diode.....	49
Figure III -9 : Courbes de tensions et courant d'un redresseur monophasé à diode et charge inductive.....	50
Figure III-10 : Schéma d'un circuit parfait.....	51
Figure III-11 : Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale.....	51
Figure III-12 : Chaîne de conversion à association directe pont de diode –batteri	52
Figure III-13 : Schéma équivalent monophasé ramené du côté alternatif.....	53
Figure III-14 : Schéma vectoriel du circuit équivalent.....	53
Figure III-15 : Courbes de puissances de la chaîne passive pour une tension batterie 12v.....	56
Figure III-16 : Courbes de puissances de la chaîne passive pour une tension batterie.....	56
FigureIII-17 : Structure avec pont de diodes et hacheur dévolteur simple.....	59
Figure III-18 : Schéma de la boucle de régulation.....	60
Figure III-19 : Schéma de synthèse de régulateur.....	60
Figure III-20 : Courant de batterie en fonction de la vitesse de rotation.....	65
Figure III-21 : Principe de convergence vers le point optimale.....	65

## Liste des figure

---

.Figure III-22 : Caractéristiques $Pe_{ol} = f(\Omega)$ pour différentes vitesses de vent...	66
FigureIII-23:Profildu vent.....	67
Figure III -24:Puissances.....	67
Figure III-25 : Coefficient de puissance.....	67

MSAP	Machine synchrone a aimants permanents
MS	Machine synchrone
GSAP	Generatrice synchrone a aimants permanents
(d ,q)	Tndice du repere de Park lié au rotor
$R_s$	Resistance statorique
$L_d$	Inductance statorique directe
$L_q$	Inductance satirique quadratique
$(V_{sd} V_{sq})$	Composantes de la tension au stator dans le repere de Park
$(I_{sd} \cdot I_{sq})$	Composantes du courant statorique
$C_{em}$	Couple électromagnétique
P	Nombre de paire de pôles
$\omega_s$	Pulsation electrique statorique
$V_1 V_2$	Vitesses du vent respectivement en amont et en aval de l'éolienne
P	Masse volumique de l'air (en Kg /m <sup>3</sup> )
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
M	Masse d'air traversant le rotor éolien en une(l) seconde

$P_m$	Puissance extraite par le rotor éolien
$P_{mt}$	Puissance théorique maximale extractible d'un vent
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne
$\lambda(\text{ou}TSR)$	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio
$V$	Vitesse instantanée du vent (en m/s).
$E_c$	Energie cinétique en joules.
$R$	le rayon de la turbine.
$H$	hauteur de la turbine
$R_t$	Rayon de la surface balayée en m
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine éolienne en rad/s
$C_{ass}$	Régulateur de vitesse
$\Omega_{ref}$	Vitesse de référence
$V_{estimé}$	la valeur estimée de la vitesse du vent
$[v_a \quad v_b \quad v_c]^t$	Vecteur tension de phases statoriques
$[i_a \quad i_b \quad i_c]^t$	Vecteur courant de phases statoriques.
$[\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^t$	Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

$W_e$	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.
$\vartheta_{geo}$	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).
$C_m$	Le couple moteur appliqué sur la génératrice
$\Omega f$	Le couple de frottement
$J$	moment d'inertie total de la machine.
$f$	coefficient de frottement visqueux
$N$	Représente le nombre de cellules élémentaires d'une tension nominale égale à 12V.
$A$	Rapport cyclique de l'interrupteur K
$f_{dec}$	Fréquence de découpage.
$C_{ass}$	régulateur de vitesse
$\Omega_{ref}$	vitesse de reference

# **INTRODUCTION GENERALE**

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

### 1. PROBLEMATIQUE

La grande partie du parc éolien actuel est constitué de systèmes raccordés au réseau public, ce qui rend les méthodes conventionnelles de fourniture d'énergie électrique comme l'extension du réseau et l'utilisation de générateurs diesel trop coûteuses et difficiles à implémenter. Les technologies renouvelables demeurent capables de générer l'électricité sur place, grâce aux architectures spécifiques de petites éoliennes destinées spécialement aux sites isolés comme l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents dépourvu de système d'excitation.

L'association d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents, à attaque direct avec des batteries d'accumulation, est une structure qui a été adopté par des constructeurs, et qui reste techniquement limitée et présente plusieurs inconvénients; comme par exemple, la réduction de la durée de vie des batteries par manque des régulateurs de charge, et la turbine ne peut pas être optimisée dans tous les conditions météorologiques. Il est nécessaire donc de concevoir des autres configurations ayant pour objectifs, l'exploitation du système éolien avec, optimisation énergétique, préservation des batteries, et minimisation des coûts.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de thèse est mémoire d'une architecture de production d'énergie éolienne de petite taille dédiée pour charger des batteries dans les sites isolés, avec une stratégie de contrôle et optimisation du convertisseur utilisé dans cette chaîne. Cette simple structure est composée d'un hacheur abaisseur de tension débitant sur une charge de type batterie, est associé à l'aérogénérateur à travers un pont de diodes.

### 2. STRUCTURE DU MEMOIRE

Le premier chapitre est dédié à l'étude de la modélisation de la turbine éolienne, après une étude du principe de la conversion aérodynamique. En vue de comprendre l'utilité de la régulation dans l'optimisation de la puissance fournie, trois modes de régulation ont été étudiés et comparés, dont la première est conçu sans asservissement de vitesse, tandis que les autres sont conçu avec asservissement de vitesse.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents. Un modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents a été établi et appliqué pour différents modes de fonctionnement.

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

---

Le dernier chapitre est consacré à la structure commandée choisie dans ce mémoire. Dans cette structure, on a utilisé comme convertisseur intermédiaire entre le pont de diodes et la batterie, un hacheur abaisseur de tension. En vue de comprendre la nécessité d'introduire ce convertisseur commandé, des études analytiques ont été faites sur la chaîne éolienne passive, et active, pour tirer les avantages et inconvénients de chacune d'elles, et donner ainsi à ce travail plus de crédibilité.

# **CHAPITRE I**

## **Modélisation de la turbine éolienne à axe vertical**

## I.1 Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Ce chapitre est consacré à l'étude aérodynamique et la modélisation de la turbine éolienne.

Dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, Trois modèles de simulations de la turbine à axe verticale sont développés au cours de ce chapitre, dont le première est conçu sans asservissement de vitesse, tandis que les deux autres, sont conçus avec deux différent régulateurs de vitesse.

## I.2 Conversion de l'énergie éolienne

### I.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne, puis en énergie électrique via un aérogénérateur. L'énergie  $dE_c$  d'une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse  $V$  (voir Figure I-1) peut s'écrire de la forme:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dl V^2 \quad (I-1)$$

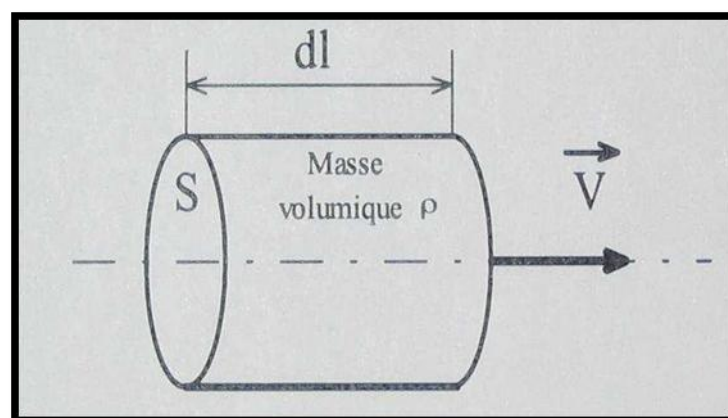


Figure I-1 : colonne d'air animée d'une vitesse  $v$

La puissance  $P_m$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant  $dl=vdt$ , on déduit l'expression de  $P_m$  :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 V^3 \quad (\text{I-2})$$

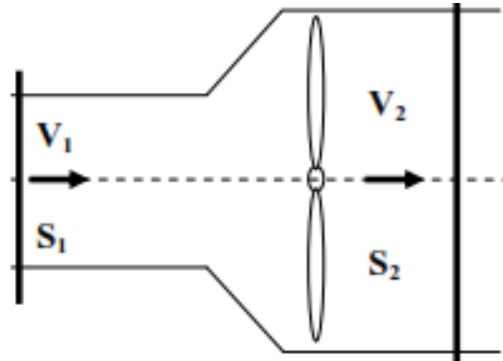
$\rho$  : Masse volumique de l'air (en  $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

$V$  : Vitesse instantanée du vent (en m/s).

$E_c$  : Energie cinétique en joules.

### 2.2.2 Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de  $16/27$  (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent [1]. Considérons le système éolien représenté sur la (figure I-2) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.



**Figure I-2:** Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [2]

$$m_0 = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{I-3})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval :

$$P_m = \frac{m_0(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (I-4)$$

En remplaçant  $m_0$  dans l'expression (I-2), la puissance devient :

$$P_m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (I-5)$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface  $S$  est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant  $V_2 = 0$  dans l'expression (I-4) :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (I-6)$$

En appliquant la loi Betz sur la turbine éolienne à axe verticale, qui représente notre cas de simulation; la seule différence remarquée est le calcul de la surface balayée :

$$S = 2R.H \quad (I-7)$$

R: le rayon de la turbine.

H: la hauteur de la turbine

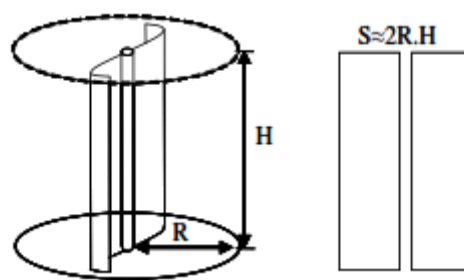


Figure I-3 : Turbine à axe vertical de type Savonius

### I.2.3 La vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio)

Le coefficient de la vitesse réduite est un facteur spécifique des aérogénérateurs. Il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales  $\Omega_t R_t$ , sur la vitesse instantanée du vent  $V$  (voir Figure I-4). Alors :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (I-8)$$

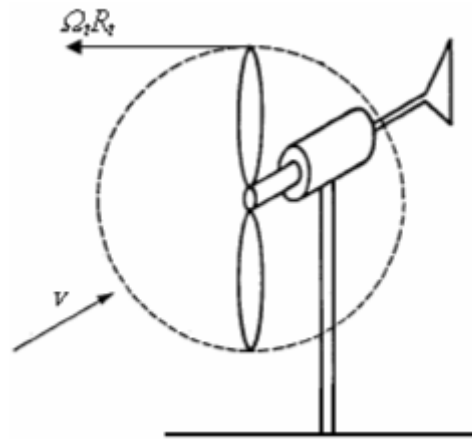


Figure I-4 : Vitesse du vent  $V$  et vitesse tangentielle  $\Omega_t R_t$

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

$V$  : Vitesse de vent en m/s.

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

#### I.2.4 Coefficient de puissance (power coefficient)

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [2].

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{I-9})$$

Le coefficient  $C_p$  est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de **Betz**, est de  $\frac{27}{16}$  soit 0.59.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de **BETZ**; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [3]:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{P \max} \quad (\text{I-10})$$

$C_{p \max}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{\text{opt}}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{tn}$  [3].

### I.2.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple  $C_m$  est assez proche du coefficient de puissance  $C_p$ . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation  $\Omega t$  nulle, ce qui correspond à une valeur de  $C_p$  nulle pour une valeur de  $C_m$  non nulle [3].

En combinant les équations (I.6), (I.7), et (I.8), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot 2R_t H \cdot V_1^3 \quad (\text{I-11})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_1} \quad (\text{I-12})$$

D'où l'expression du coefficient de couple est la suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S R_t V^2} \quad (\text{I-13})$$

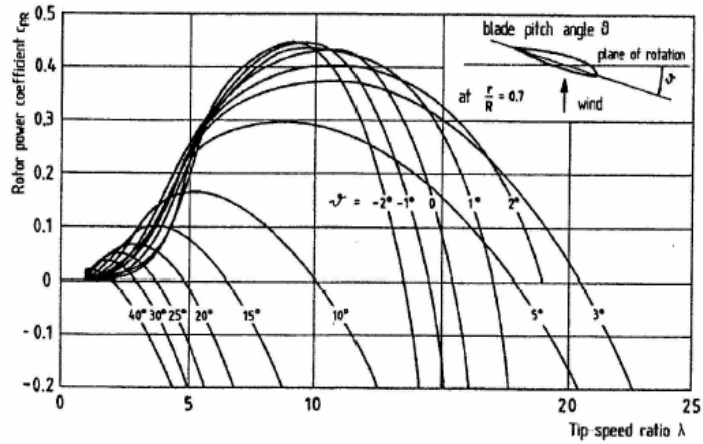
Le couple de la turbine est donnée par:

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \cdot 2R_t^2 H \cdot V^3 = \frac{1}{2} C_m \rho \cdot 2R_t^2 H \cdot V^3 \quad (\text{I-14})$$

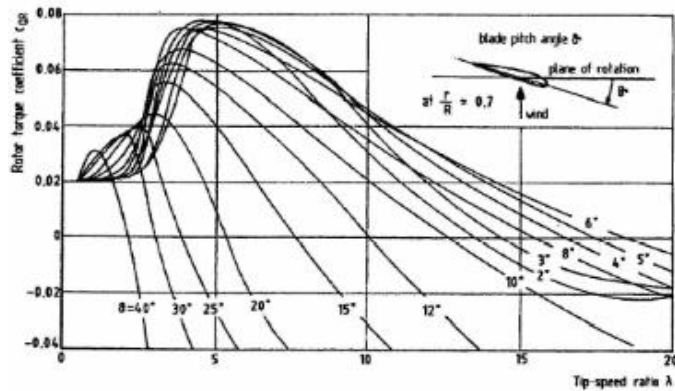
### I.2.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

Les courbes essentielles caractérisant les turbines éoliennes sont décrites par les coefficients de puissance  $C_p$  et de couple  $C_m$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ .

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure des coefficients  $C_p$  et  $C_m$  change donc pour chaque angle de calage  $\beta$  comme représenté à la figure I-5 [4].



(a)  $C_p = f(\lambda, \beta)$



(b)  $C_m = f(\lambda, \beta)$

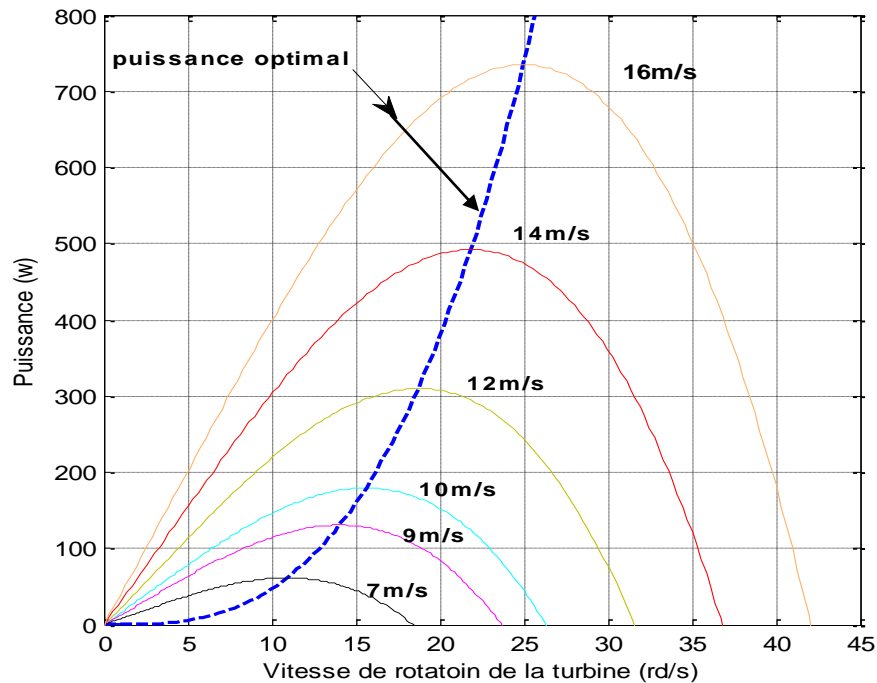
**Figure I-5 :** Allures des coefficients  $C_p$  et  $C_m$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  et l'angle de calage [4]

### I.2.7 Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur de vitesse  $G$ , et à partir des équations (I-11) et (I-12), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_t R}{G V_1} \right) \cdot \rho \cdot 2 R_t H \cdot V_1^3 \tag{I-15}$$

Cette expression permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent (figure I-6).



**Figure I-6 :** puissance théorique disponible de la turbine modélisée pour différentes vitesses de vent

Au regard de la ligne bleue pointillée, qui joint les points de puissances maximales, il apparaît que pour pouvoir optimiser le transfert de puissance pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner à vitesses variables.

### I.3 Modélisation du système éolien

#### I.3.1 Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine.

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes et peut être représenté comme illustré sur la figure (I-7), [4].

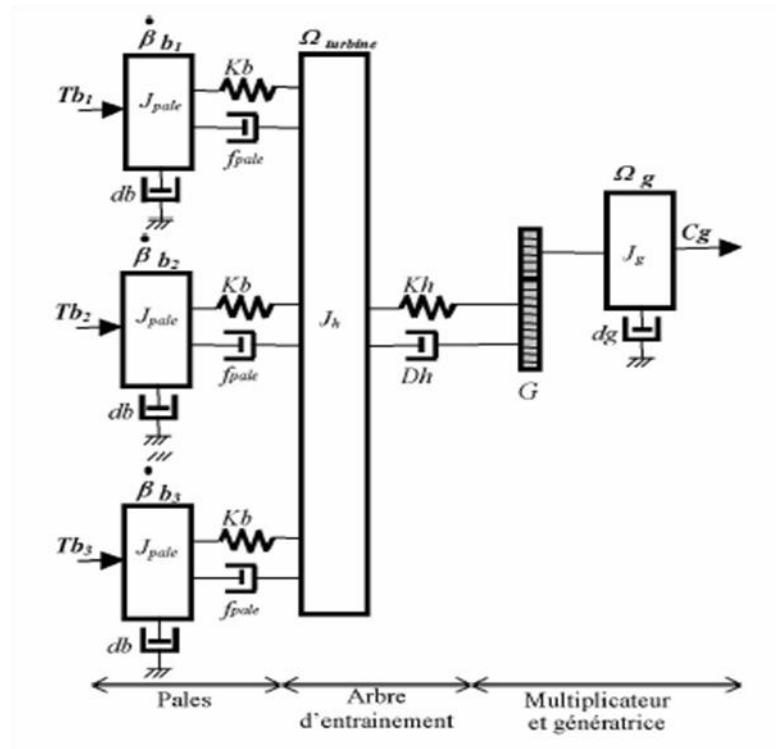


Figure I-7: Représentation du système éolien [4]

1- Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie  $J_{pale}$ , élasticité  $K_b$ , et coefficient de frottement  $db$ . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\beta b_1, \beta b_2, \beta b_3$ .

Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent lui est appliquée [4].

- 2- L'arbre d'entraînement des pales caractérisé par :
  - Son inertie  $J_h$
  - son élasticité  $K_h$
  - son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$
- 3- le multiplicateur de vitesse, de gain  $G$ .
- 4- Le rotor de la génératrice possède :
  - Une inertie  $J_g$
  - Un coefficient de frottement  $d_g$

Ce rotor transmet un couple  $C_g$  à la génératrice et tourne à une vitesse  $\Omega_{méc}$

### I.3.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [4]:

1-La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.

2-Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air ( $db$ ) est très faible et peut être ignoré.

3-Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté générateur.

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (figure I-8) [4].

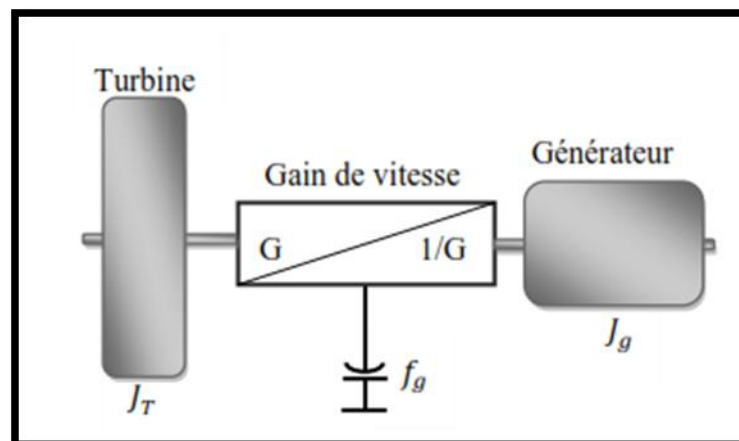


Figure I-8 : Schéma simplifié de la turbine.

### I.3.3 Modèle de la turbine

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent de l'environnement .

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. Il est obtenu à partir des relevés réalisés sur une éolienne [4].

### I.3.4 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice figure I-9. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes

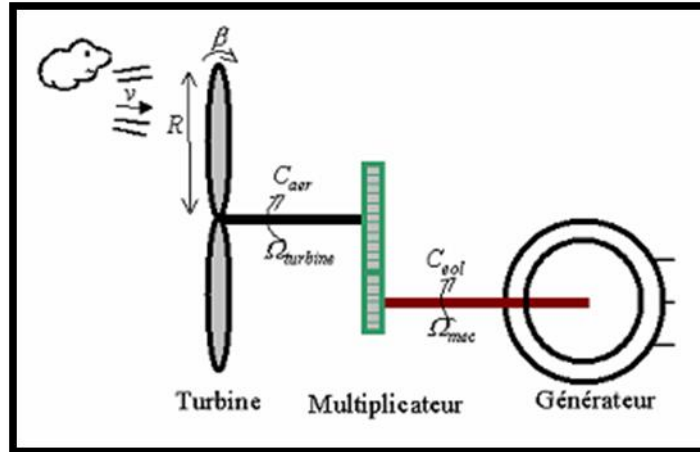


Figure I-9 : Schéma du système éolien [4].

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (I-16)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I-17)$$

### I.3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$  et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [4].

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (I-18)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{I-19}$$

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 issu du multiplicateur  $C_g$ .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{I-20}$$

$C_{vis}$  couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$  :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \tag{I-21}$$

Avec:

$$f = \frac{f_{turbine}}{G^2} + f_g \tag{I-22}$$

#### I.4 Stratégies de commande de la turbine éolienne :

Les stratégies de commande des systèmes de génération éoliens de moyenne et grande puissance à vitesses variables et à régulation de puissance « pitch » utilisées notamment pour les aérogénérateurs Vestas et Gamesa de dernière génération sont basées sur les deux courbes illustrées sur la figure (I-10), qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine [5].

- (a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.
- (b) Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

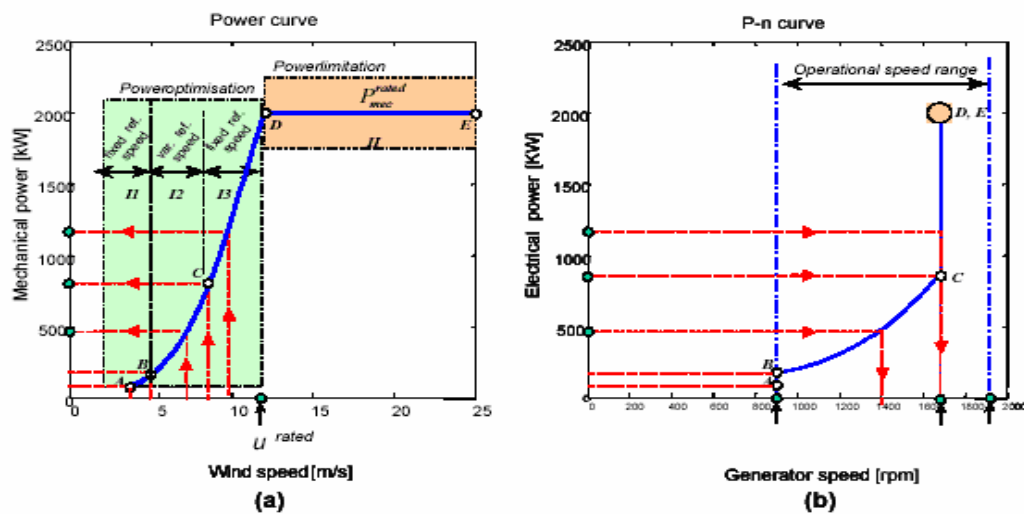


Figure I-10 : caractéristiques: puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation [6] .

- (a) puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent
- (b) puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation

La figure (I-10) représente une autre caractéristique de la turbine éolienne, qui est la vitesse de rotation de l'aérogénérateur en fonction de la variation de vitesse de vent [6].

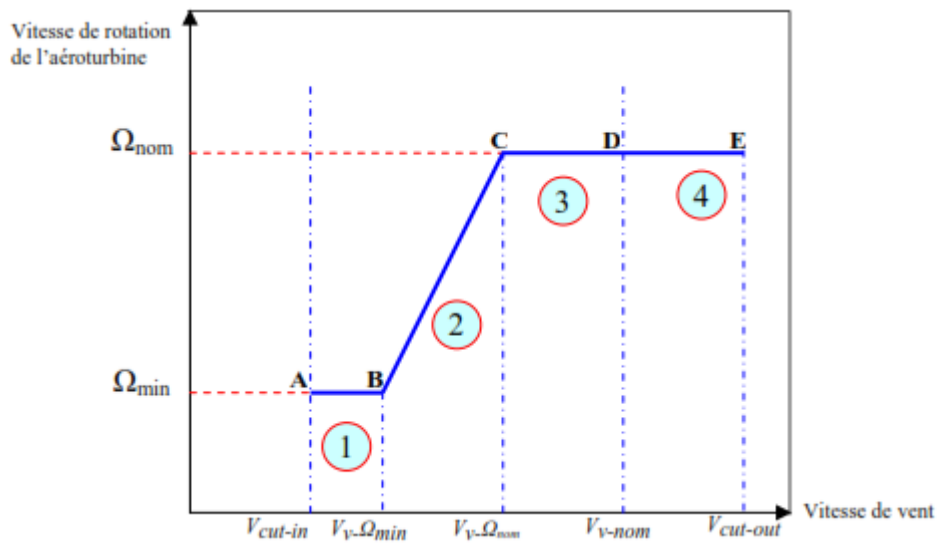


Figure I-11 : Caractéristiques : vitesse de rotation, vitesse de vent

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure (I-11)

I. Stratégie d'optimisation de puissance: Dans cette stratégie représentée par les séquences «A-B-C-D », l'énergie capturée est optimisée au dessous de la vitesse nominale du vent.

II. Stratégie de limitation de puissance : Le but de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine au dessus de la vitesse nominale du vent «D-E ».

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées sur les figures (I-10) et (I-11)

zone1 « A-B »: L'éolienne commence à fonctionner à la vitesse du vent de connexion  $V_{cut-in}$ , à une vitesse de rotation  $\Omega$ .

zone2 « B-C » : Lorsque la vitesse de la génératrice est comprise entre les vitesses  $\Omega_{min}$  et  $\Omega_{nomt-min}$  , un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale du vent. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant.

Zone3 « C-D » : Cette zone correspond au cas où la vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance générée arrive à des valeurs importantes mais inférieures à la puissance nominale.

Zone4 « D-E » : Arrivée à la puissance nominale, un système d'orientation des pales « pitch control » est appliqué afin de limiter la puissance générée.

Au-delà de la vitesse  $\Omega_{\text{cut-out}}$ , un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques.

### I.5 Système de contrôle de l'aéroturbine :

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées [4]:

1. Boucle de régulation de vitesse.
2. Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

### I.6 Méthodes de recherche du point maximum de puissance :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche » [7]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la figure (I-6) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe correspond à une vitesse de vent  $V_v$  donnée. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissances optimales.

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (**MPPT**) correspond à la zone 2 doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

- 1 - la première approche, la moins classique [7], considère que la caractéristique

$$C_p = f(\lambda) : \text{n'est pas connue.}$$

- 2 - La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique

$$C_p = f(\lambda) : \text{est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.}$$

Dans ce travail, on se limite à la deuxième approche ce qui facilite le calcul des algorithmes de maximisation de puissance; et contrôle de la turbines éolienne sur la base des convertisseurs plus basique et moins coûteux.

On utilise dans ce chapitre deux structures de commande; sans asservissement de vitesse et avec asservissement de vitesse.

### I.7 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée [4]

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (I-23)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mer}) \quad (I-24)$$

$C_{ass}$  : Régulateur de vitesse

$\Omega_{ref}$  : Vitesse de référence

Selon l'équation (I-8), la vitesse de rotation de la turbine est égal à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V_v}{R} \quad (I-25)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$  peut se déduire de (I-25) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (I-26)$$

### I.8 Conception du correcteur de vitesse :

Le correcteur de vitesse constitue la partie « intelligente » de l'asservissement dans cette méthode de maximisation de puissance, et sa détermination judicieuse confiée à l'asservissement de ses qualités. Il doit accomplir les deux fonctions suivantes [4]:

- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.

- Atténuer l'action du couple aérodynamique qui constitue une entrée perturbatrice.

Deux correcteurs ont été utilisés dans le développement du modèle, un régulateur PI à avance de phase et un régulateur PI avec anticipation

### I.8.1 Correcteur proportionnel intégral à avance de phase

Le correcteur considéré a pour expression figure (I-12)

$$C_{em-ref} = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 P}{1 + \tau p} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (I-27)$$

$\alpha_0, \alpha_1$  et  $\tau$  sont les paramètres du correcteur à déterminer et  $P$  est la grandeur de Laplace.

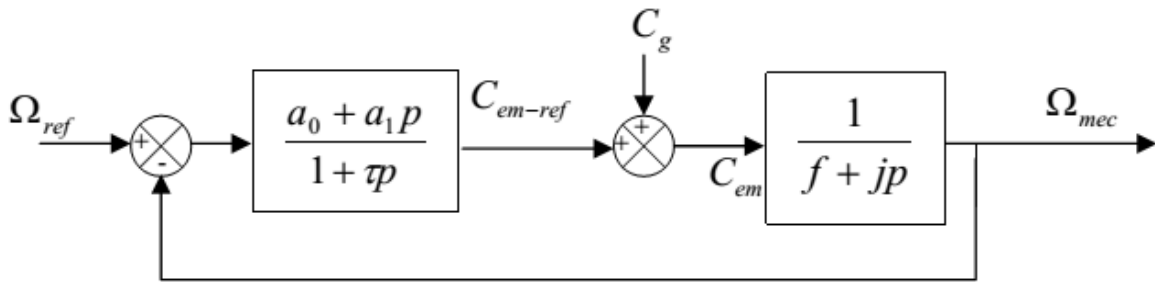


Figure I-12 : schéma bloc du correcteur PI à avance de phase

La fonction de transfert en boucle fermée se met sous la forme mathématique suivante :

$$\Omega_{mec} = F(p) \cdot \Omega_{ref} + P(p) \cdot C_g \quad (I-28)$$

Où  $F(p)$  est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse

$$F(p) = \frac{\alpha_0 + \alpha_1 P}{j \cdot \tau \cdot p^2 + (f \cdot \tau + j + \alpha_1) \cdot P + \alpha_0 + f} \quad (I-29)$$

Et  $P(p)$  est la fonction de transfert de la perturbation  $C_g$

$$P(p) = \frac{\tau p + 1}{j \cdot \tau \cdot p^2 + (f \cdot \tau + j + \alpha_1) \cdot p + \alpha_0 + f} \quad (I-30)$$

Pour atténuer l'action du couple éolien  $C_g$ , il faut que le paramètre  $\alpha_0$  soit élevé. L'équation (I-30) peut s'écrire :

$$P(p) = \frac{j.\tau}{\alpha_0+f} \cdot \frac{\tau p+1}{\frac{p^2}{\frac{\alpha_0+f}{j.\tau}} + \frac{f.\tau+j+\alpha_1}{\alpha_0+f}.p+1} \quad (I-31)$$

Les paramètres ( $\alpha_1$  et  $\tau$ ), sont déterminés de manière à avoir une fonction de transfert du 2ème ordre, ayant une pulsation naturelle  $\omega_n$  et un coefficient d'amortissement  $\xi$  définis comme suit:

$$\frac{2.\xi}{\omega_n} = \frac{f.\tau+j+\alpha_1}{\alpha_0+f} \quad \text{et} \quad \omega_n^2 = \frac{\alpha_0+f}{j.\tau} \quad (I-32)$$

Le paramètre  $\alpha_0$  et  $\alpha_1$  sont déduits de (I-32) comme suit :

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\alpha_0+f}{j.\tau}} \quad (I-33)$$

$$\xi = \frac{f.\tau+j+\alpha_1}{\alpha_0+f} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad (I-34)$$

$$\alpha_1 = \frac{2.\xi.(\alpha_0+f)}{\omega_n+f} - f.\tau - j \quad (I-35)$$

En choisissant un temps de réponse  $tr$  convenable pour le démarrage de la génératrice, de telle sorte qu'on limite les variations de la puissance électrique générées, considère la fonction de transfert anticipatrice suivante figure (I-13) :

$$F'(p) = \frac{j.\tau.p^2+(f.\tau+j+\alpha_1).P+\alpha_0+f}{(\alpha_1.p.\alpha_0).\left(\frac{tr}{3}.p+1\right)} \quad (I-36)$$

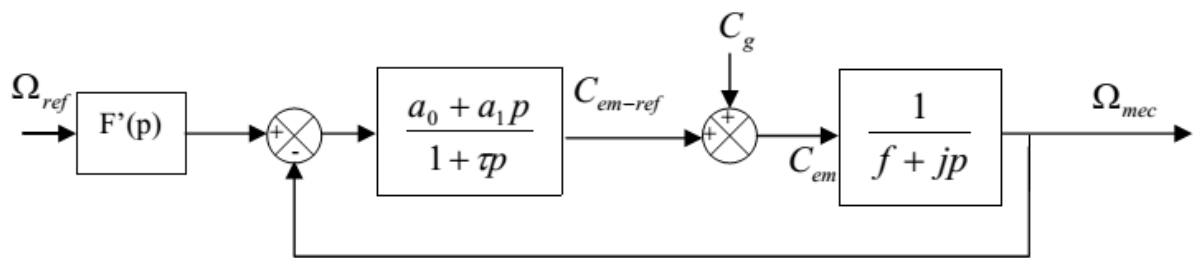


Figure I-13 : Schéma bloc du correcteur PI à avancé de phase

### I.8.2 : Correcteur proportionnel intégral avec anticipation

Le correcteur considéré a pour expression figure (I-14).

$$C_{em-ref} = \left(b1 + \frac{b_0}{p}\right).(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (I-37)$$

$b_0, b_1$  Sont respectivement le gain intégral et le gain proportionnel du correcteur. La fonction de transfert est déterminée de même manière que la précédente.

$$F(p) = \frac{b_1 p + b_0}{j.p^2 + (f + b_1).p + b_0} \quad (I-38)$$

$$P(p) = \frac{p}{j.p^2 + (f + b_1).p + b_0} \quad (I-39)$$

Pour atténuer l'action du couple éolien  $C_g$ , il faut que le paramètre soit élevé [18]. Comme précédemment, Les paramètres ( et ), sont déterminés de manière à avoir une fonction de transfert du 2ème ordre, ayant une pulsation naturelle  $\omega_n$  et un coefficient d'amortissement  $\xi$  définis comme suit:

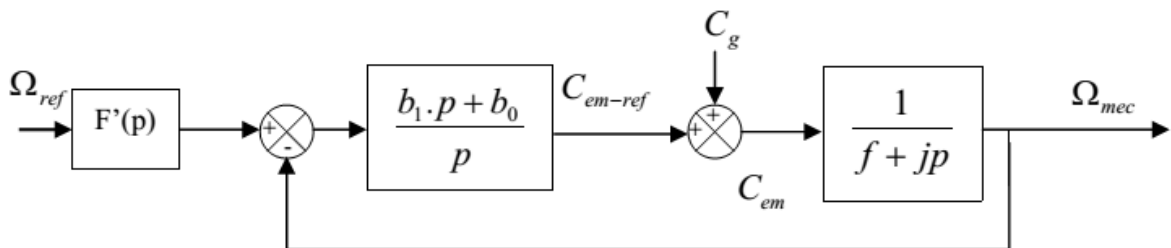
$$\omega_n = \sqrt{\frac{b_0}{j}} \quad \text{et} \quad \xi = \frac{f + j + b_1}{b_0} \cdot \frac{\omega_n}{2} \quad (I-40)$$

Donc les paramètres  $b_0$  et  $b_1$  sont déterminés comme suit :

$$b_0 = \omega_n^2 \cdot j \quad \text{et} \quad b_1 = \frac{2 \cdot b_0 \cdot \xi}{\omega_n} - f - j \quad (I-41)$$

Pour un coefficient d'amortissement  $\xi$  et un temps de réponse  $t_r$  imposés en boucle fermée, on considère la fonction anticipatrice suivante (figure I-14):

$$F'(p) = \frac{j.p^2 + (f + b_1).p + b_0}{(b_1.p.b_0).(\frac{t_r}{3}.p + 1)} \quad (I-42)$$



FigureI-14 : Schéma bloc du correcteur PI avec anticipation

### I.9 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse :

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures

erronées de cette vitesse de vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs .

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent [4]. Ceci, nous conduit à déduire

-Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul  $C_{mec} = 0$ .

-Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé  $C_f = 0$ .

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statique :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0 \quad (I-43)$$

L'équation (I-43) donne :

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (I-44)$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple Aérodynamique

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aér}}{G} \quad (I-45)$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aér-estimé} = \frac{1}{2} C_p \rho S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} V_{estimé}^3 \quad (I-46)$$

$\Omega_{turbine-estimé}$  : Est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I-47)$$

$V_{estimé}$  : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donné par l'expression (I-47).

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (I-48)$$

En utilisant les formules du précédentes, on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{cem-ref} = \frac{c_p}{\lambda^3} \rho H R^4 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (I-49)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda$  sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{c_{pmax}}{\lambda^3} \rho H R^4 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (I-50)$$

En mettant :

$$K_{opt} = \frac{c_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \rho H R^4 \frac{1}{G^3} \quad (I-51)$$

L'expression (I-52) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (I-52)$$

L'algorithme MPPT contrôlé à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape K, détermine le couple de référence dans l'étape K+1 de la façon montrée comme suit.

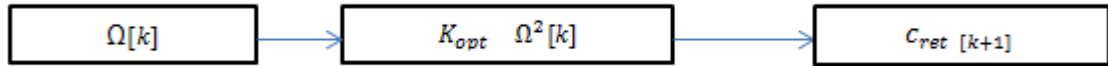


Figure I-15 : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

## I.10 Résultats de simulation

La turbine éolienne à axe verticale utilisée pour la simulation ayant un coefficient de puissance de la formule suivante :

$$C_p(\lambda) = -0.212 \cdot \lambda^3 + 0.0856 \lambda^2 + 0.2539 \lambda \quad (I-53)$$

La figure (I-16) montre le profil du vent considéré pour la simulation de la turbine éolienne à axe verticale dans ce chapitre.

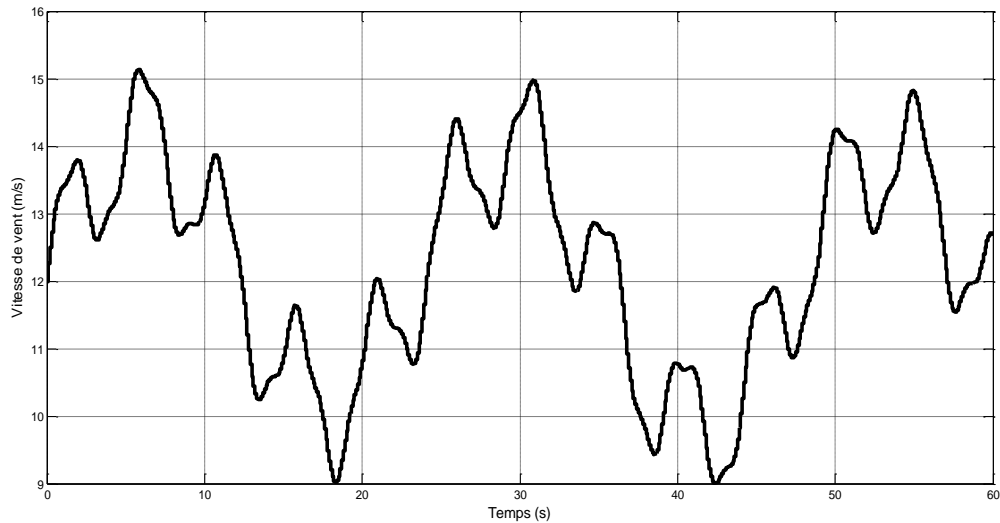


Figure I-16 Profil du vent

### 2.9.1- Résultats de simulation sans asservissement de vitesse

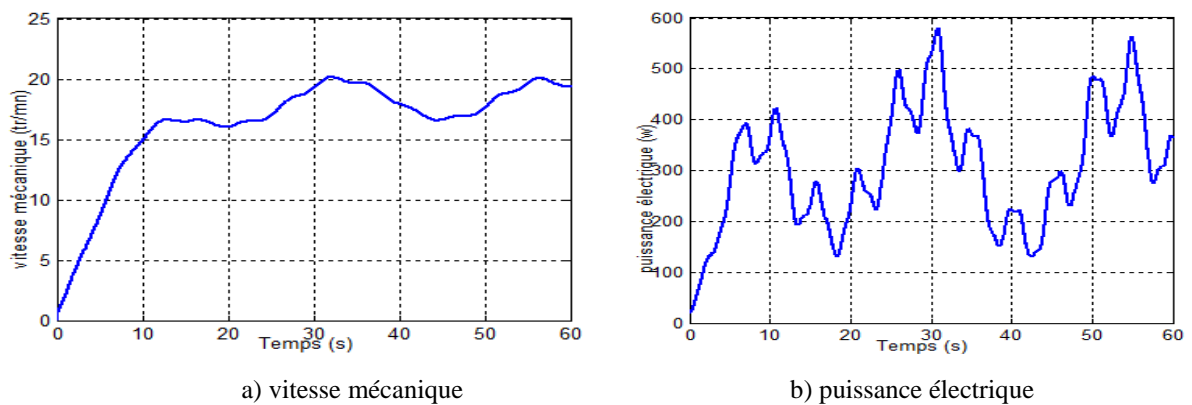


Figure 1-17 : Résultats de simulation avec stratégie de commande sans asservissement de vitesse

Les résultats de simulation montrent bien l'adaptation de vitesse et puissance électrique produite avec les variations de la vitesse du vent.

### I.11 Résultats de simulation avec asservissement de vitesse

Régulateur PI avec avance de phase

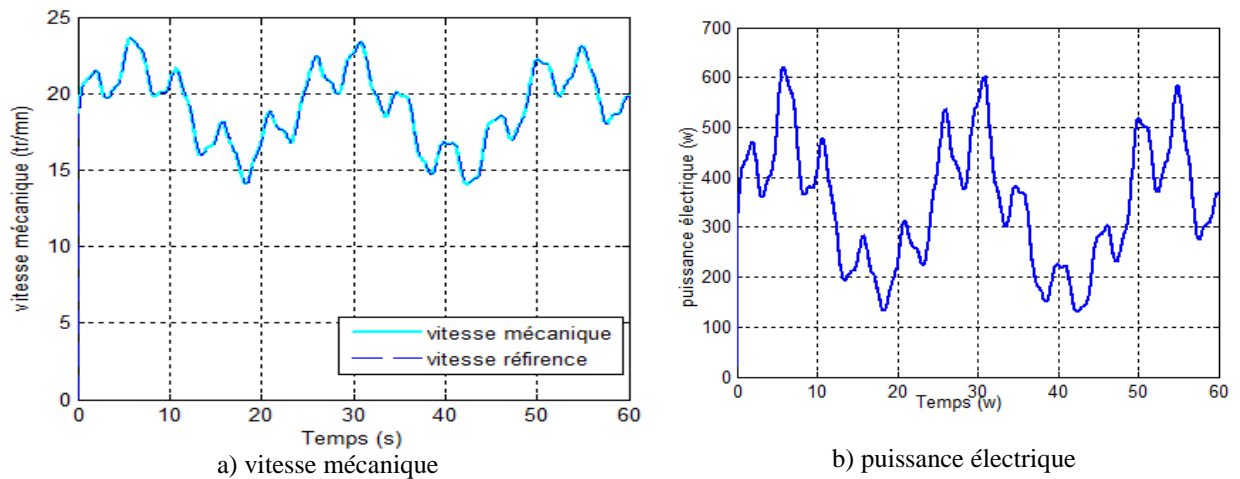


Figure I-18: Résultats de simulation avec régulateur PI à avance de phase

Régulateur PI avec anticipation

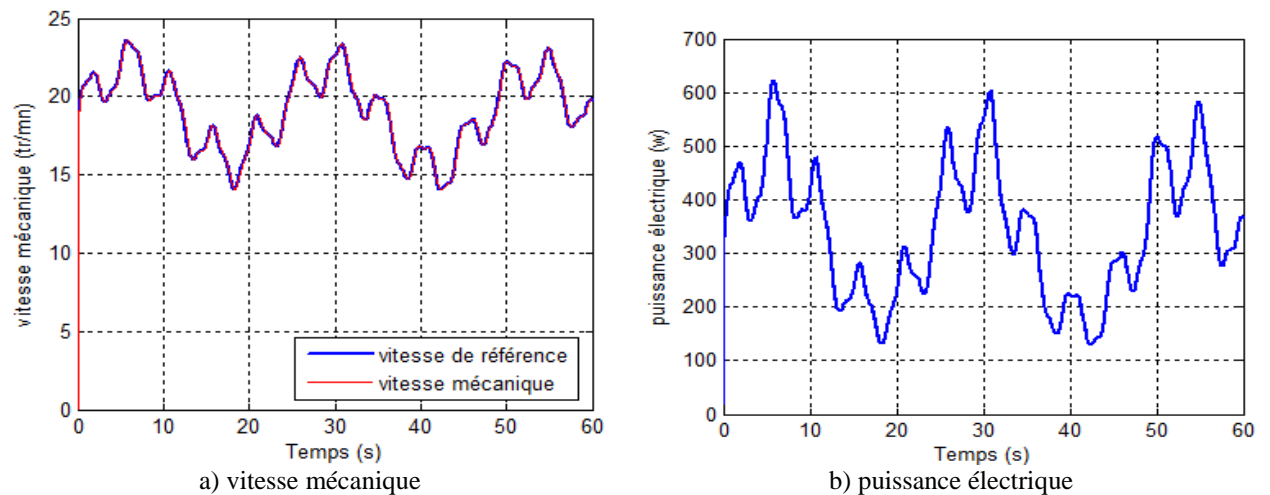
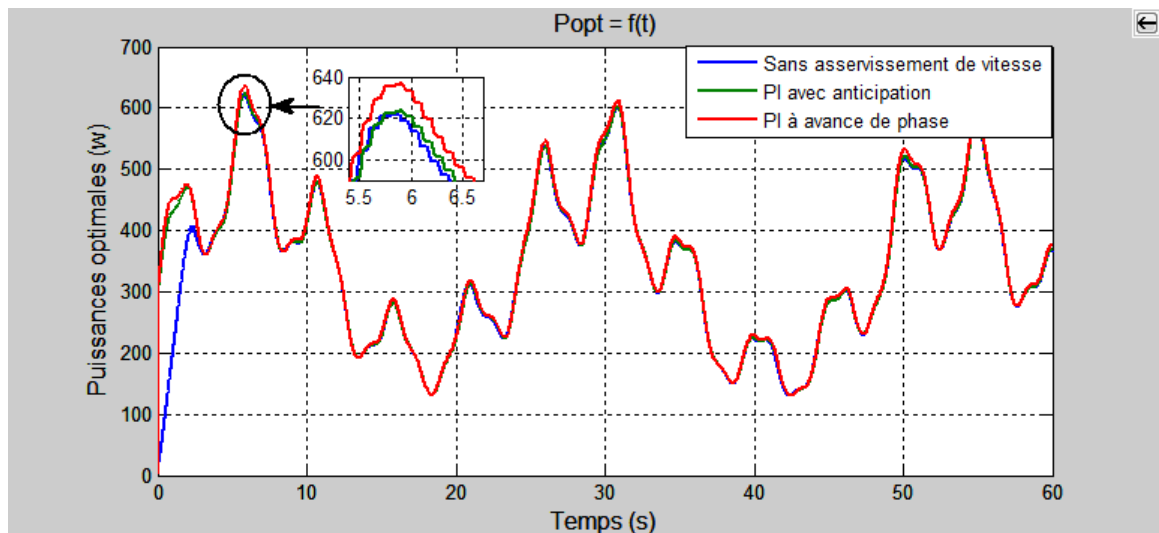


Figure I-19: Résultats de simulation avec régulateur PI avec anticipation

Les résultats de simulation montrent un contrôle très dynamique de vitesse, et la puissance obtenue est plus importante par rapport aux autres stratégies.

Les figures I-20 montrent les puissances optimales obtenues par toutes les stratégies de commande utilisées et pour même profil de vent.



**Figure I-20** : Puissances optimales avec les trois stratégies de contrôle

$P_n=600(w)$ ,  $R=0.5(m)$ ,  $J=0.16(Kg/m^2)$ ,  $H=2m$ ,  $f=0.06$ ,  $TSR_{opt}=0.78$

## I.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons expliqué le principe de la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (Loi de Betz), et les différentes stratégies de contrôle de la turbine éolienne à vitesse variable. Pour simplifier l'étude de la turbine, et avoir ainsi un modèle simple, des hypothèses simplificatrices ont été utilisées.

En vue de comprendre la nécessité de contrôler la turbine éolienne au cours de fonctionnement, trois modes de régulation ont été utilisés et comparés. Le premier est conçu sans asservissement de vitesse, tandis que les deux autres sont conçus avec deux régulateurs différents.

Dans le prochain chapitre, nous allons modéliser et simuler la génératrice asynchrone à aimants permanents, pour l'intégrer dans le modèle global de notre structure.

## **CHAPITRE II**

### **Modélisation de la machine synchrone a aimants permanents**

## II.1 Introduction:

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type manioc, samarium cobalt, néodyme fer bore ...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines [8].

Dans la machine à aimants permanents MSAP, l'inducteur est remplacé par des aimants. Le champ d'excitation créé par les aimants permanents, présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines à outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique,.....). L'étude de cette machine dans le but de la commander, nous oblige à la mettre sous forme d'un modèle mathématique regroupant tous ces paramètres (résistance, inductance,...), permettant ainsi de mettre en évidence certains phénomènes apparaissant lors de son fonctionnement. En outre, ce modèle nous apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques qui interviennent au cours des applications.

## II.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est un système complexe si tous les phénomènes interviennent dans son fonctionnement sont pris en compte. Cependant, nous n'allons pas tenir compte de tous ces phénomènes, car, d'une part, leur formulation mathématique est difficile, d'autre part, leur incidence sur le comportement de la machine est considérée comme négligeable, dans certaines conditions. Ceci nous permet d'obtenir des équations simples, qui traduisent la base fondamentale du fonctionnement de la machine [9].

## II.3 Modèle de la MSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [10]:

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

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

### II.3.1 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont

décrites par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (II.1)$$

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

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

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

$R_s$  : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [11]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

#### II.3.1 .1 Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor (Figure II-1).

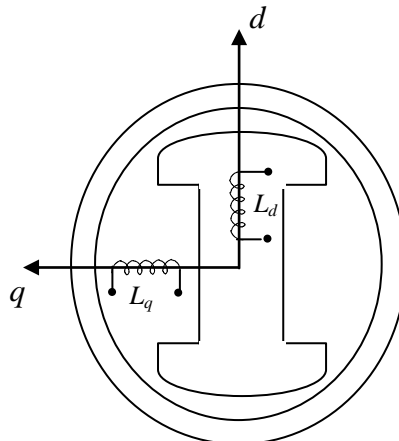


Figure II.1 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [10].

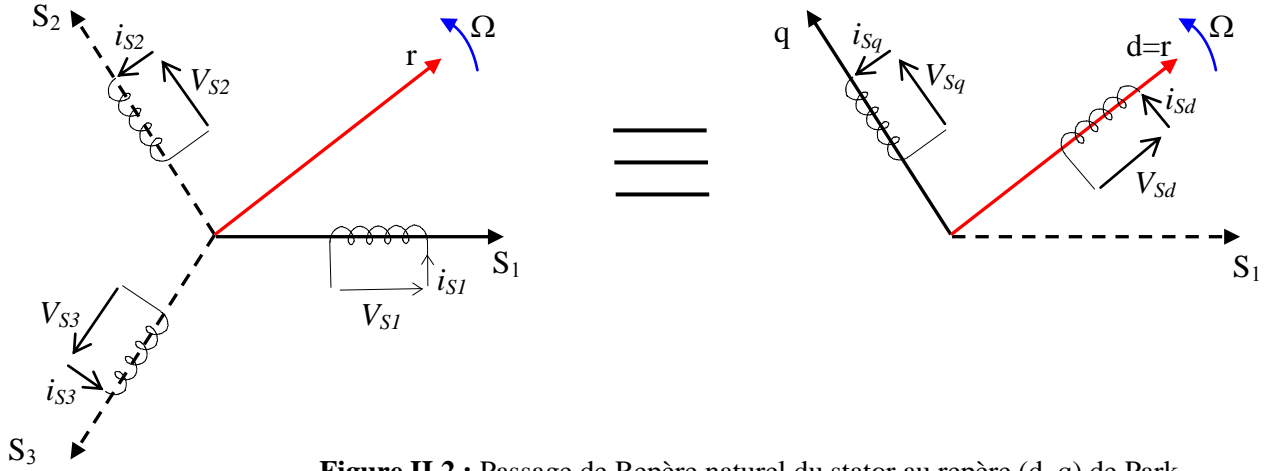


Figure II.2 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park

En appliquant la transformation de Concordia  $T_{32}$  défini par (II.2) :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \text{ Avec: } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 2 \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.2})$$

Le variable  $x$  peut être  $v$ ,  $i$  ou  $\psi$ .

On obtient:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (II-1), on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor. Si  $\theta$  est l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator, nous avons :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \dot{\theta} P\left(\frac{\pi}{2}\right) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$\text{Où : } \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = P(-\theta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad P(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$v_d, v_q, i_d$  et  $i_q$  sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant.

$\psi_d$  et  $\psi_q$  sont les composantes directe et en quadrature du flux.

### II.3.2 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs,  $\psi_d$  et  $\psi_q$  sont fonctions linéaires des courants  $i_d$  et  $i_q$ :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (II.6)$$

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

$\psi_f$  représente le flux des aimants. En remplaçant les expressions des flux dans l'équation

(II-4), on aboutit à :

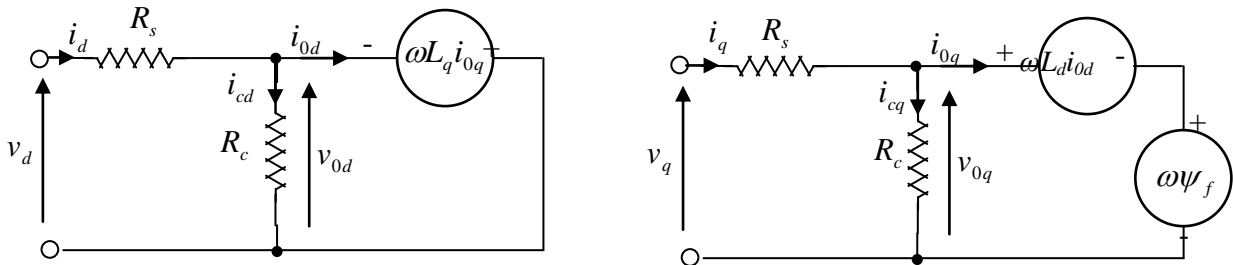
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega P \left( \frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (II.7)$$

Où  $\omega = p\Omega$ ,  $p$  étant le nombre de paires de pôles et  $\Omega$  la vitesse angulaire du rotor.

$e_d$  et  $e_q$  sont les composantes directe et en quadrature de f.e.m. données par :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\psi_f\Omega \end{cases} \quad (II.8)$$

- Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit [12]:



**Figure II.3:** circuit équivalent de MSAP –convention moteur-

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant  $i_d$  et  $i_q$  dans les repères de Park, et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [13]:

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (II.9)$$

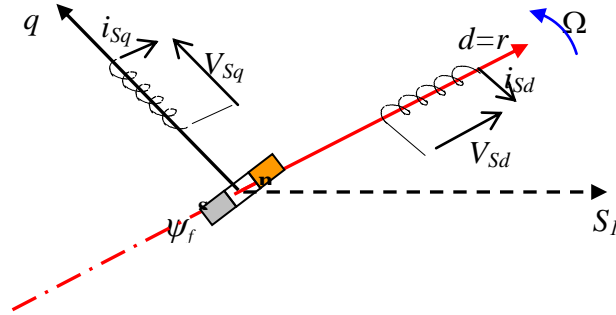


Figure II.4: Modèle de PARK pour la GSAP

### II.3.2.1 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [10]:

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (II.10)$$

$W_e$ : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

$\theta_{geo}$ : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

$P$ : nombre de pair de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (II.11)$$

En remplaçant  $V_d, V_q$  par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2) - (i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}) + \frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d)] \quad (II.12)$$

$\frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2)]$ : Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator [10].

$\frac{3}{2} [i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt}]$ : Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator [14].

$\frac{3}{2} \left[ \frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right]$  : Représente la puissance électromagnétique [10].

$$\text{Sachant que : } p\Omega = \omega \text{ et } P_e = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{II.13})$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{II.14})$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [13]:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_q - L_d) i_d i_q + i_q \psi_f] \quad (\text{II.15})$$

### II.3.3 Equations mécaniques

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

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

$\Omega f$ : Le couple de frottement.

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

$f$ : coefficient de frottement visqueux.

## II.4 Simulation de la GSAP

### II.4.1 GSAP à vide

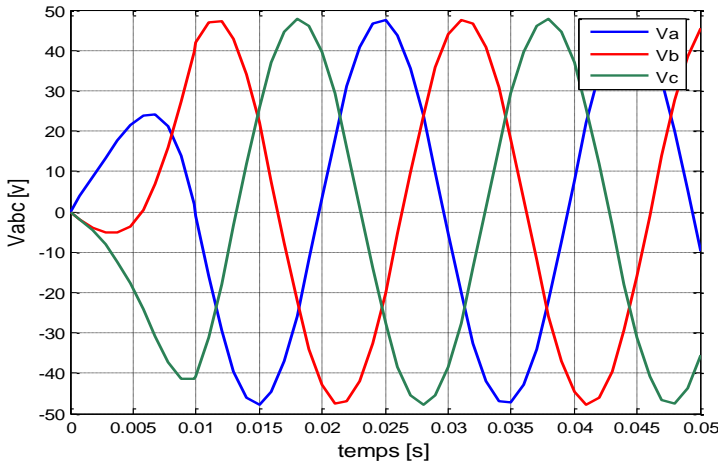
$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les expressions des tensions et couple deviennent:

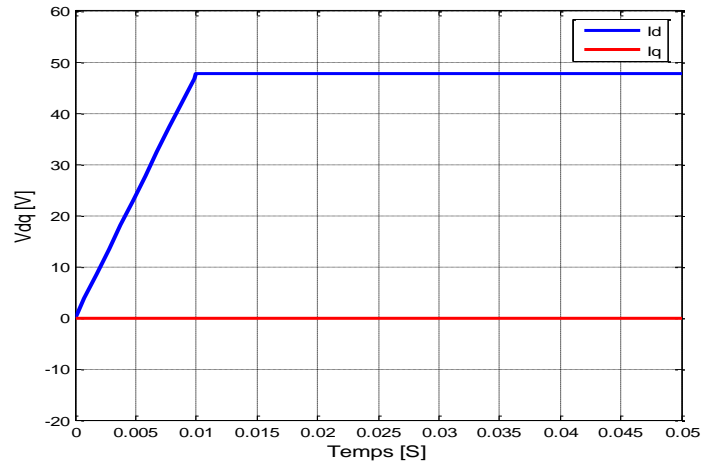
$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \psi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 3.0Nm pour une durée de 10(ms) puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (II-12) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 18.75 (rad/s), alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 47.6 (V) et une fréquence de 50(HZ).

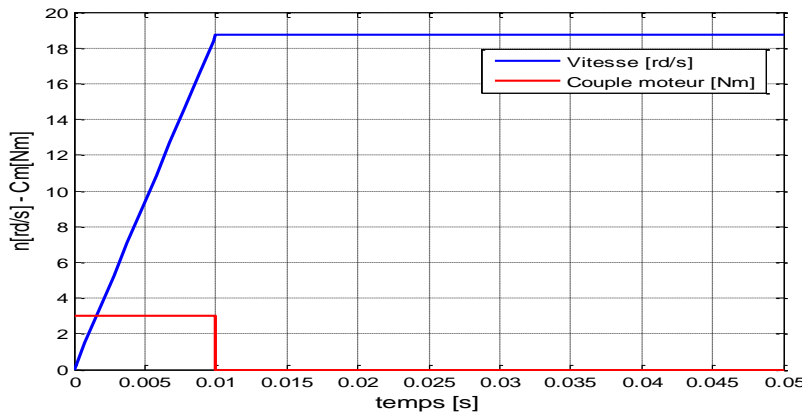
II.4.1.1 Résultats de simulation



a: Tensions statoriques



b: Composantes de tensions Vd et Vq



c: vitesse de rotation et couple moteur

Figure II.5: GSAP à vide

$R_s=1.137\Omega$  ;  $L_d=0.0027H$  ;  $L_q=0.0027H$  ;  $J=0.0016Kg.m^2$  ;  $f=0Nm/rd/s$  ;  $P=17$  ;  $\Psi_f=0.15Wb$

II.4.2 L'influence d'une charge séparée ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ )

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique ( $R_{ch}$ ,  $L_{ch}$ ).

Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique d'une part, les équations données par (II-9) :

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

$$\begin{cases} V_d = R_{ch} I_d + L_{ch} \frac{d}{dt} I_d - \omega L_{ch} I_q \\ V_q = R_{ch} I_q + L_{ch} \frac{d}{dt} I_q + \omega L_{ch} I_d \end{cases} \quad (II.19)$$

En remplaçant les expressions de  $V_d$  et  $V_q$  dans (II-9), on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch}) I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch}) I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (II.20)$$

En introduisant la transformée de **LAPLACE** dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\begin{cases} S I_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) I_d + \omega (L_q + L_{ch}) I_q] \\ S I_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch}) I_q - \omega (L_d + L_{ch}) I_d + \omega \psi_f] \end{cases} \quad (II.21)$$

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

#### II.4.2.1 Equations d'état

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

$$[\dot{x}] = [A][x] + [B][v] \quad (II.22)$$

$$[x] = [i_d \quad i_q]^t, \quad [v] = [0 \quad \psi_f]^t \quad (II.23)$$

$$[x] = [i_d \quad i_q]^t, \quad [v] = [0 \quad \psi_f]^t$$

Les équations (II-21), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (II-24).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & \omega \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\omega \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{\omega \psi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (II.24)$$

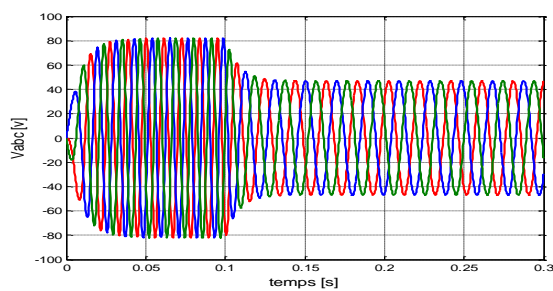
On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme :

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q + L_{ch}}{L_d + L_{ch}} \\ -\frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & 0 \end{bmatrix} \quad (II.25)$$

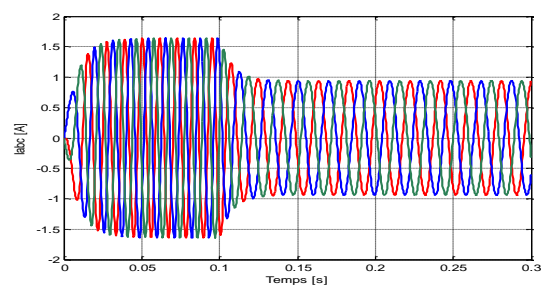
$$[B][v] = \omega \cdot \frac{1}{L_q + L_{ch}} \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_f \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

### II.4.2.2 Résultats de simulation

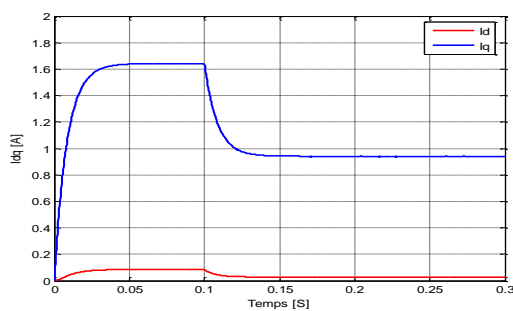
Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (Figure II-6-e). On constate sur la figure (II-6-f) que l'allure de la vitesse de rotation suit parfaitement celle du couple. La fréquence élevée des tensions et courants représentés sur les figures (II-6-a), et (II-6-b) nous déduit l'effet du grand nombre de paire de pôles de la génératrice et le couple moteur suffisant y appliqué. En diminuant le couple moteur de 6.28 (Nm), à 3.6 (Nm), la vitesse mécanique varie de 319(tr/mn) jusqu'à 182(tr/mn); la tension et le courant diminuent respectivement de 83.3 (V), à 47.3 (V), et de 1.72 (A), à 0.96 (A). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie.



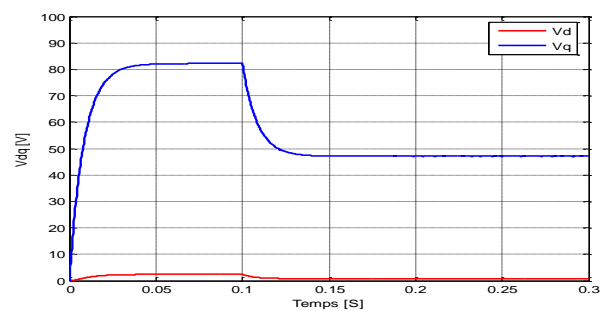
a: Tensions statoriques  $V_{abc}$



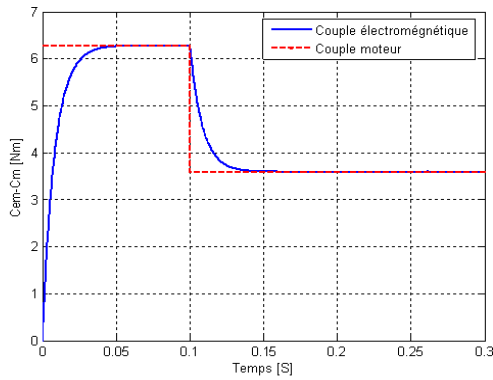
b: Courants statoriques  $I_{abc}$



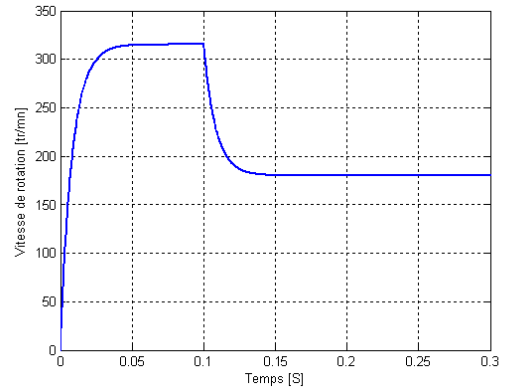
d: Composantes  $V_d V_q$



c: Composantes  $I_d I_q$



e: Couples électromagnétique et moteur



f: Vitesse de rotatio

Figure II.6: GSAP en charge

$R_s=1.137\Omega$  ;  $L_d=0.0027H$  ;  $L_q=0.0027H$  ;  $J=0.0016Kg.m^2$  ;  $f=0Nm/rd/s$  ;  $P=17$  ;  $\Psi_f=0.15Wb$   
 ;  $R_{ch}=50\Omega$  ;  $L_{ch}=0.002H$

### II.4.3 L'influence d'une charge réelle sur une source parfaite

Considérons les tensions  $V_d$ ,  $V_q$  et le flux d'excitation  $\psi_f$  comme grandeurs de commande, les courants  $I_d$ ,  $I_q$  comme variables d'état.

#### II.4.3.1 Equations d'état

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

$$\begin{aligned} \dot{[x]} &= [A][x] + [B][v] \\ [Y] &= [C][x] + [D][v] \end{aligned} \tag{II.27}$$

Avec:

$$[x] = [I_d \quad I_q]^t, [v] = [v_d \quad v_q \quad \psi_f]^t \tag{II.28}$$

Les équations (3-36), peuvent s'écrire sous la forme matricielle (3-44).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{ds} \\ \dot{I}_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & \frac{\omega}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \psi_f \end{bmatrix} \tag{II.29}$$

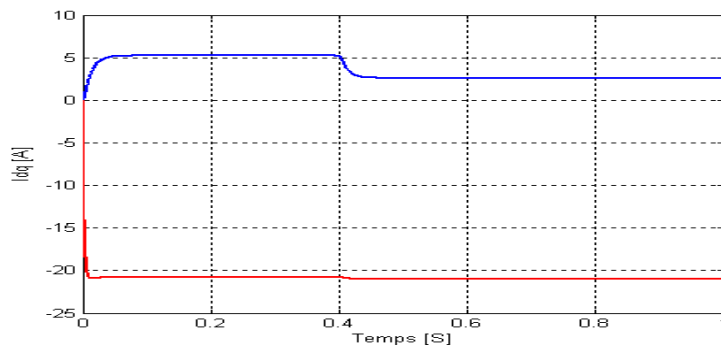
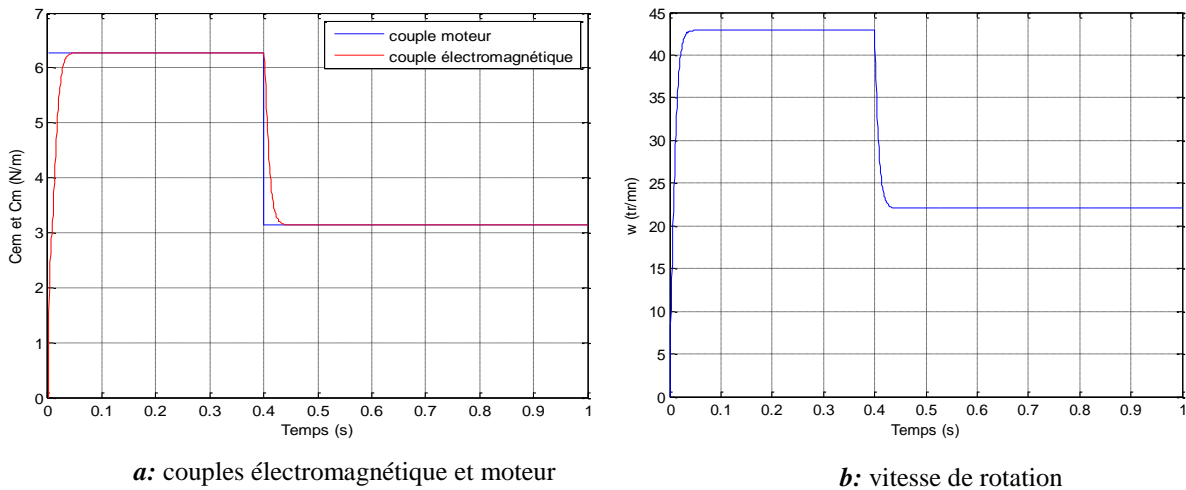
On peut écrire les matrices [A] et [B] sous la forme:

$$[A] = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & L_q \\ -L_d & 0 \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_q} & 0 \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \quad (II.31)$$

### II.4.3.2 Résultats de simulation

Connectée à une source parfaite de tension de valeur efficace de 24(V), on applique à la génératrice un couple moteur suffisant égale à 20 (Nm), à l’instant t=0(s). Après un instant de 0.4(s), on diminue ce couple jusqu’à 10Nm. La vitesse et le couple électromagnétique ont pratiquement les mêmes formes d’allures, et sot stables en régime permanent.



**Figure II.6:** GSAP connectée à une source de tension

$R_s=1.137\Omega$  ;  $L_d=0.0027H$  ;  $L_q=0.0027H$  ;  $J=0.0016Kg.m^2$  ;  $f=0Nm/rd/s$  ;  $P=17$  ;  $\Psi_f=0.15Wb$

**Conclusion:**

Après avoir dérivé la machine synchrone à aimants permanents, nous avons établi le modèle définitif du générateur synchrone à aimants permanents à rotor extérieur, composé des équations électriques, magnétique et mécanique.

Ce modèle a été validé par des résultats de simulation à vide, en charge, et en court-circuit connecté à une source parfaite. Ces résultats montrent que la puissance mécanique fournie influe sur la tension et le courant de charge.

## **CHAPITRE III**

### **Etude et optimisation d'un chaine de conversion éolienne débitant sur une batterie**

### **III.1 Introduction**

Ce chapitre présente une stratégie de gestion d'énergie dédiée aux systèmes éoliens de petites puissances utilisant pour la production d'électricité un générateur synchrone à aimants permanents, et débitant sur une charge de type batteries. Nous allons qualifier en premier lieu une structure dépourvue de composants actifs d'électronique de puissance et de contrôle, raison pour laquelle elle est appelée «chaîne éolienne passive ». L'association directe de la génératrice synchrone à aimants permanents avec un redresseur à diodes est fortement couplée à cause de l'impédance de la génératrice ce qui influe sur les propriétés de cette chaîne et limite son exploitation de production d'électricité.

En vue de remédier aux problèmes d'adaptation naturelle de la chaîne précédente, nous allons détailler une structure appartenant à la chaîne éolienne dite «Active » à cause des composants actifs d'électronique de puissance et les dispositifs MPPT, qui servent à adapter électriquement les différents composants de la chaîne éolienne, et maximiser ainsi le rendement énergétique globale.

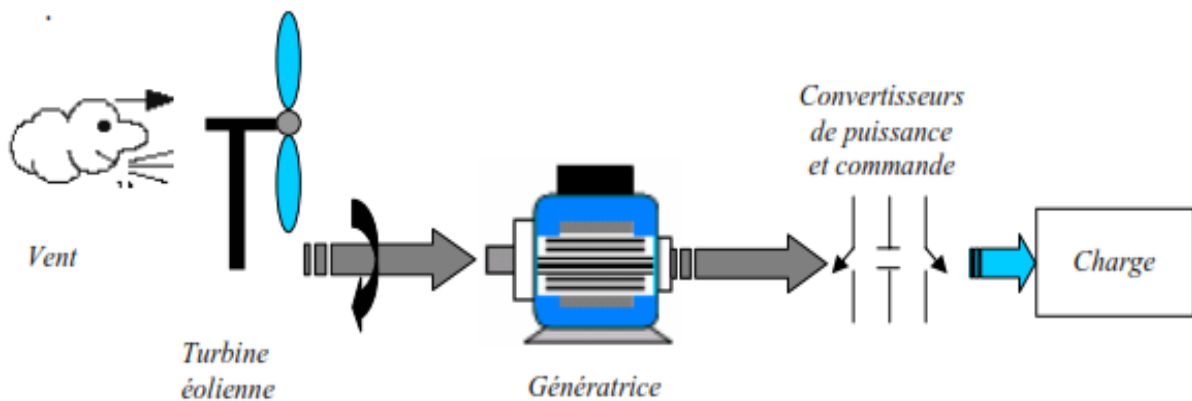
La structure développée au cours de ce dernier chapitre est composée d'une turbine à axe vertical associée à une génératrice synchrone à aimants permanents. En vue de débiter l'énergie électrique sur une batterie, on a associé la génératrice à un pont de diodes et un hacheur survolteur.

La gestion de cette chaîne éolienne est basée sur un control indirect du courant à la sortie de l'hacheur dévolteur.

### **III.2 Configurations de chaînes de conversion dédiées au petit éolien :**

Vu la complexité d'un système éolien à cause de la multiplicité des domaines existants et le couplage mutuelle délicat entre les différents composants à savoir la turbine, l'arbre, le générateur ,et le convertisseur, ainsi que l'environnement extérieur (vent, charge...) ;plusieurs configurations dédiées aux petites éoliennes à entraînement direct ont été étudiées et implantées au niveau mondial en vue d'améliorer leurs rendements énergétiques et de faciliter leurs exploitations. Selon les applications souhaitées de telles systèmes que ce soit, autonomes pour charger des batteries, ou à des applications avec raccordement au réseau électrique ; une variété d'équipements de contrôle et de conditionnement

d'énergie électrique a été développée. La figure III-1 représente une structure générale d'un système éolien.

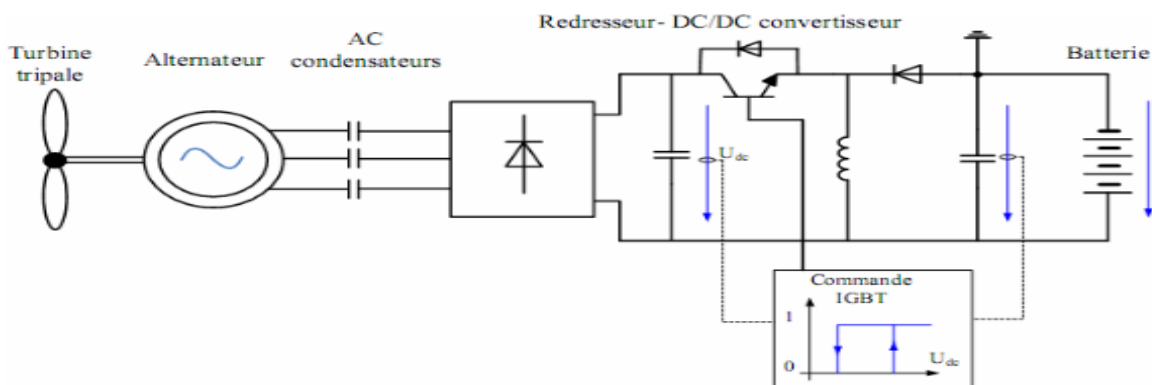


**Figure III-1** : Structure générale des chaînes éoliennes comparées

Avant de détailler l'architecture traitée dans ce mémoire; nous allons citer quelques configurations proposées par les chercheurs, dédiées aux systèmes éoliens à faibles puissances et destinées pour alimenter des charges de type batteries.

### III.2.1 Chaîne de conversion commandée en MPPT par capteur de tension du bus continu et de la batterie

Cette configuration représentée sur la figure III-2 consiste en une compensation réactive de l'alternateur par des condensateurs, Le convertisseur DC/DC de type Buck/ boost sert à optimiser la charge de la batterie et de capter l'énergie maximale sur la gamme de vitesse du vent, la commande MPPT est réalisée par les signaux issus des capteurs de tension du bus continu et de la batterie.



**Figure III-2** : Chaîne de conversion commandée en MPPT par capteur de tension du bus continu et de la batterie

### III.2.2 Chaîne de conversion éolienne passive avec transformateur

Cette chaîne de conversion éolienne de la figure III-3 se compose d'une turbine tripale entraînant une génératrice synchrone triphasée à aimants permanents, d'un transformateur associé à un redresseur à diodes débitant sur un bus continu comprenant des accumulateurs de tension. Cette configuration nécessite la connexion d'un transformateur en aval du générateur afin d'augmenter l'efficacité énergétique captée par la turbine en dépit des variations de tension de la batterie. De plus, elle a montré la corrélation entre la tension du bus continu et la puissance récupérée par l'éolienne et donc l'intérêt possible de cette chaîne très simple moyennant une adaptation naturelle de l'impédance aux variations de la source. Enfin, il a été mis en évidence que l'adjonction d'un transformateur entre le redresseur et l'aérogénérateur s'avère néfaste pour le rendement énergétique global, surtout aux faibles vitesses de vent.

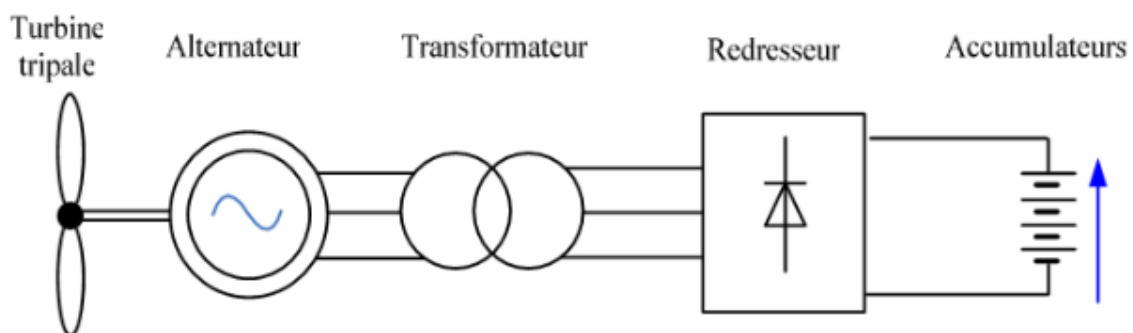


Figure III-3 : Chaîne de conversion éolienne passive avec transformateur [16].

### III.2.3 Petite éolienne tripale autonome débitant directement sur une charge variable

Cette structure de petite éolienne représentée sur la figure III-4 est dédiée pour l'installer sur un site isolé. Les éléments du système sont couplés à une charge variable correspondant à un profil de consommation pendant une durée déterministe via une interface électronique de puissance.

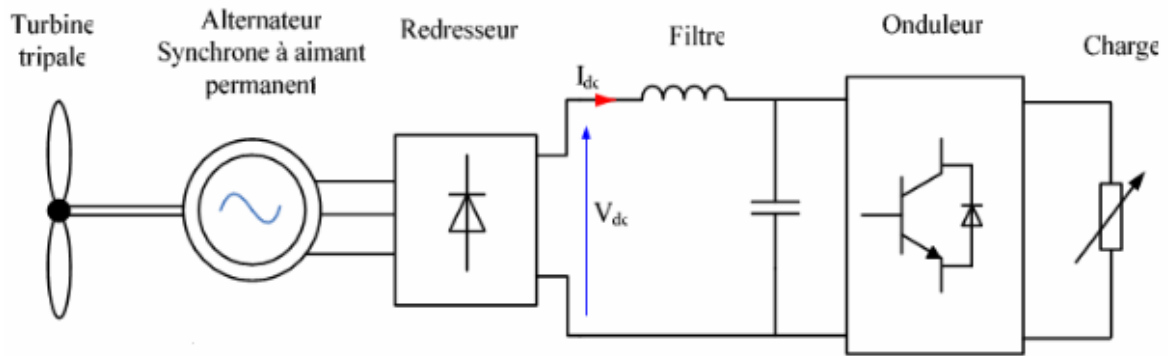


Figure III-4 : Petite éolienne triपालe autonome débitant directement sur charge variable [17]

Ce type de configuration a été abordé dans [18] avec une commande MPPT utilisant un algorithme basé sur un réseau de neurones artificiel. Cette structure est proposée dans le but d'assurer la disponibilité énergétique permanente aux consommateurs de ce réseau autonome. Pour une génératrice donnée, les résultats expérimentaux de cette étude montrent que la puissance récupérée est faible lorsqu'on n'a pas de commande MPPT permettant d'adapter activement l'impédance du réseau à la source éolienne.

### III.3 Chaîne de conversion éolienne active avec commande MPPT par du bus continu

La figure III-5 représente un prototype d'éolienne triपालe alimentant une charge isolée. Il utilise une génératrice synchrone à aimants permanents à effet Vernier associée à un redresseur actif à IGBT commandés par MLI.

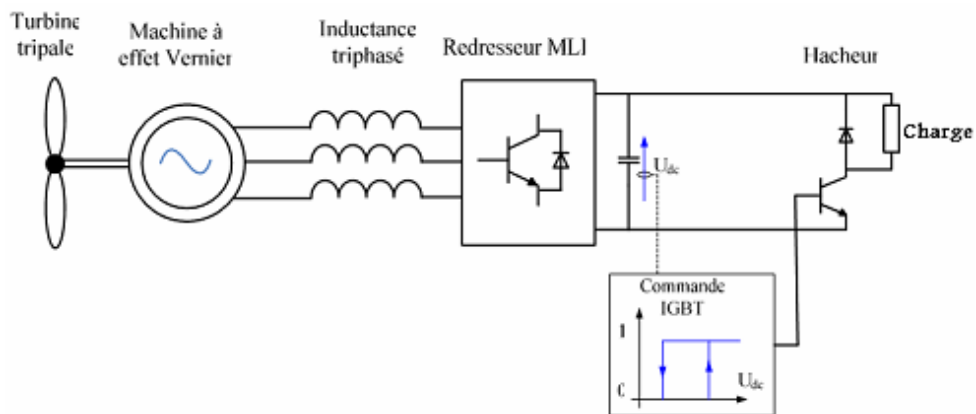
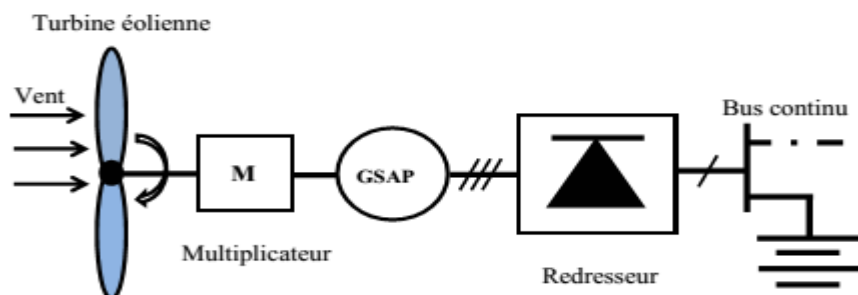


Figure III-5 : Chaîne de conversion éolienne active avec commande MPPT par régulation du bus continu [16]

La commande MPPT est réalisée par le redresseur MLI et le hacheur dévolteur. Cette étude indique que cette génératrice n'est pas adaptée pour être utilisée avec un redresseur à diodes car cette association conduirait à un faible facteur de puissance. C'est pour cela elle utilise un redresseur à commande par MLI et un autre convertisseur. Parallèlement, cette étude montre qu'entre des éléments généralement figés (turbine éolienne, tension des accumulateurs ou tension du réseau), la génératrice est un élément central d'ajustement qui permet d'optimiser l'ensemble de la chaîne de conversion. Suivant le convertisseur d'électronique de puissance utilisé avec la génératrice, il peut être nécessaire de prévoir l'adaptation de celle-ci à une turbine donnée à travers un dimensionnement dédié.

#### III.3.1 Architecture d'une chaîne éolienne « passive » avec multiplicateur de vitesse

Cette topographie illustrée sur la figure III-6 est composée d'une petite turbine éolienne à axe horizontal, d'une boîte d'engrenages à un étage, d'un générateur synchrone à aimants permanents, d'un pont de diodes et d'un groupe de batteries.



**Figure III-6 :** Architecture d'une chaîne éolienne « passive » avec multiplicateur de vitesse

[19]

Dans ce système à tension continue fixe, la vitesse de rotation pour chaque vitesse de vent dépend de quelques paramètres de conception du système comme le rapport de transformation de la boîte d'engrenages et la tension aux bornes de la batterie. L'objectif ici est de maximiser la puissance obtenue en cherchant la combinaison optimale du rapport de la boîte et la tension de batterie.

En résumé des travaux précédents, nous constatons que, la conversion aérodynamique en génie électrique des petites éoliennes est une mission difficile et complexe. La plupart

des études sont orientées vers différentes méthodes pour optimiser la commande MPPT. Cependant, l'architecture de tels systèmes cause les inconvénients suivants :

1- La complexité et le coût du système : avec la commande MPPT, la complexité du système augmente, à travers l'ensemble des fonctions et composants nécessaires au contrôle/commande et à la gestion. L'électronique de puissance contrôlable, soit à travers des structures de redresseurs actifs ou des associations pont de diodes-hacheur complexifie aussi

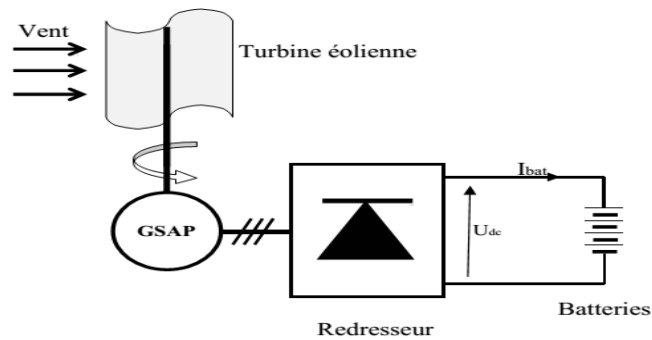
le dispositif. De plus, les organes contrôlés nécessitent aussi des capteurs, et/ou observateurs. Ainsi, malgré la simplification de certaines structures de conversion, ces systèmes présentent encore une complexité, donc un coût qui, bien que parfaitement acceptable et compétitif pour l'éolien classique, reste non négligeable dans le contexte technico-économique du «Petit éolien».

2- La fiabilité et la maintenance : En termes de tendance générale, plus le système n'est complexe, plus la fiabilité et la durée de vie diminuent. Le coût de maintenance tend aussi à augmenter. En réalité, plusieurs incidents techniques sur des petites éoliennes proviennent des dispositifs de commande, de l'électronique de puissance et des capteurs.

#### **III.4 Etude de la chaîne éolienne « passive »**

##### **III.4.1 Introduction**

L'étude de cette structure simple est apparaît nécessaire dans ce travail pour pouvoir estimer son comportement énergétique, et savoir les conditions assurant les performances d'utilisation à savoir la plage de variation du vent, et le dimensionnement du générateur utilisé, et pouvoir par la suite faire une comparaison judicieuse avec d'autres configurations. Cette structure illustrée sur la figure(III-7) n'a pas eu d'importance significative par les chercheurs dans le domaine d'énergie éolienne à l'exception de quelques travaux à savoir [20],[21] qui ont concentrés leurs études sur la conception et le dimensionnement de l'ensemble génératrice – pont de diode – bus batterie contrairement aux chaînes actives classiques qui sont en cours de développement de plusieurs architectures et stratégies de contrôle qui servent à optimiser de plus en plus leurs exploitation dans les sites isolés ou raccordés aux réseaux.



**Figure III-7 :** Architecture d'une chaîne éolienne « passive »

Cette chaîne éolienne « entièrement passive », est conçue donc sans électronique de puissance

contrôlée, et sans commande MPPT. Elle intègre une turbine à attaque directe entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents. Le courant triphasé de la génératrice est redressé par un pont de diodes qui débite directement sur un bus batterie.

### III.4.2 Modélisation de la chaîne éolienne passive

En vue de comprendre mieux la chaîne éolienne passive illustrée sur la figure III-7 et l'influence mutuelle entre ces différents constituants, et notamment, entre le redresseur à pont de diodes et la génératrice à cause de l'impédance de cette dernière, Il apparaît nécessaire d'avoir des modèles qui reflètent judicieusement le comportement électrique réel de l'ensemble de la chaîne.

Un modèle implanté sur MATLAB ne prend pas en considération le phénomène d'empiètement et fait apparaître l'effet des inductances sur le processus de commutation en le comparant avec celui du pont de diodes parfait alimenté par une source de tension avec une impédance supposée nulle et débite sur une batterie idéale.

Par ailleurs, un modèle analytique équivalent a été développé pour expliquer l'aspect de l'adaptation naturelle de l'impédance interne de la génératrice sur le comportement énergétique globale et les limites de fonctionnement de la chaîne éolienne passive.

#### III.4.2.1 Etude d'un redresseur monophasé à diode sur charge RL

Le montage de la figure III-8 représente un circuit simple de redresseur monophasé qui débite charge RL.

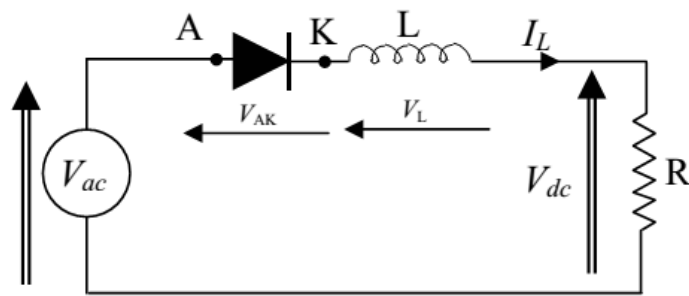


Figure III -8 : Redresseur monophasé à diode

- La diode se met à conduire lorsque la tension anode-cathode devient positive ( $V_{AK} > 0$ ).

Lorsqu'elle est conductrice, la tension à ses bornes est nul (cas d'une diode parfaite) ou plus généralement égale à une valeur de seuil  $U_{D0}$  (typiquement comprise entre 0.5 et 1 V). Cette valeur reste toutefois négligeable devant les autres chutes de tension dans le circuit.

Le courant dans la diode est alors imposé par le reste du circuit.

- La diode se bloque lorsque le courant anode-cathode qui la traverse s'annule ( $I_{AK} = 0$ ).

La tension anode-cathode est alors imposée par le reste du circuit.

### III.4.2.2 Modèle du redresseur monophasé à diode

Le comportement du redresseur peut être caractérisé en exprimant le courant dans l'inductance:

$$I_L = \frac{1}{L} \int V_L(t) dt \quad (\text{III} - 1)$$

Où la tension  $V_L$  aux bornes de l'inductance dépend de l'état de conduction  $c$  de la diode selon la relation :

$$V_L = c(V_{ac} - V_{dc}) \quad (\text{III} - 2)$$

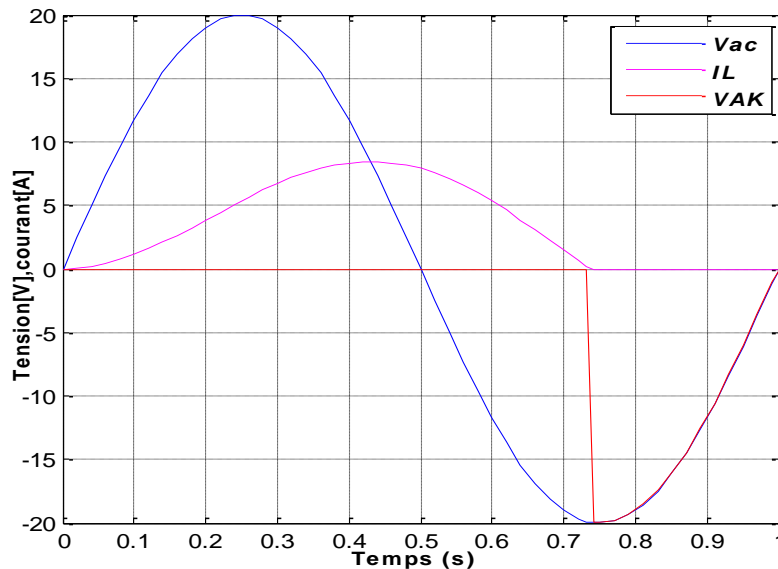
Sachant que la tension aux bornes de la résistance est donnée par la relation:

$$V_{dc} = RI_L \quad (\text{III} - 3)$$

L'équation (III.1) est devenue :

$$I_L = \frac{1}{L} \int c (V_{ac} - RI_L) dt \quad (III - 4)$$

Les différents paramètres sont montrés sur la figure III-9



**Figure III -9 :** Courbes de tensions et courant d'un redresseur monophasé à diode et charge inductive

Les résultats de simulation de la figure III-9 nous montrent le retard de blocage engendré par la charge inductive. Nous rappelons qu'au cas d'une charge purement résistive, le blocage au zéro du courant  $I_L$  correspond exactement au passage par zéro de la tension  $V_{ac}$ .

### III.4.2.3 Modélisation et simulation d'un pont de diode sans prise en compte de l'empiétement

Considérons en premier lieu, le circuit de la figure III-10 constitué par un pont de diodes parfait alimenté par une source de tension avec une impédance supposée nulle et débite sur une batterie idéale.

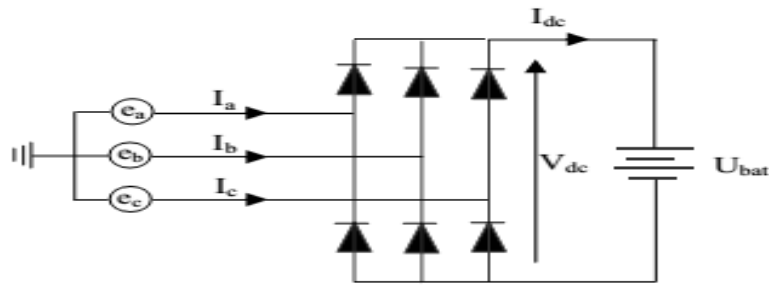


Figure III-10 : Schéma d'un circuit parfait

Avec ces hypothèses, chaque diode assure la conduction du courant pendant 1/3 de la période

dans ce cas, les courants de ligne  $i_a$ ,  $i_b$  et  $i_c$  prennent à tour de rôle la valeur et la forme du courant continu  $I_{dc}$ . Les relations entre les tensions d'entrée et de sortie d'une part et les courants d'entrée et de sortie d'autre part, sont les suivantes [12].

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} E_{ab}^{max} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_a^{eff}$$

(III - 5)

$$I_{dc} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_a$$

(III - 6)

Où  $V_{dc}$  et  $I_{dc}$  sont les valeurs moyennes de la tension et du courant en sortie du redresseur et  $V_{abc}$  et  $I_{abc}$  sont les tensions et courants des trois phases côté alternatif. Considérant une séquence de conduction entre les deux phases a et b; on aura le schéma équivalent de la figure III-11

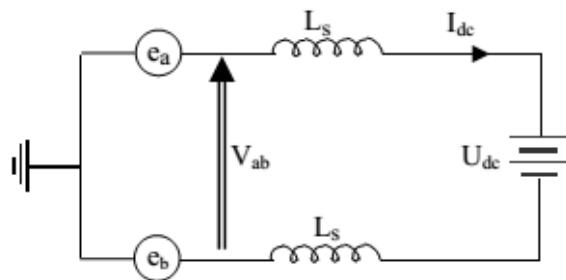


Figure III-11 : Schéma équivalent d'une séquence en conduction normale

En appliquant la loi des mailles et des nœuds, nous aurons l'équation suivante reliant le courant  $I_a$  avec les tensions  $V_a$  et  $V_b$ :

$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_a - V_b + V_{dc}) \quad (\text{III} - 7)$$

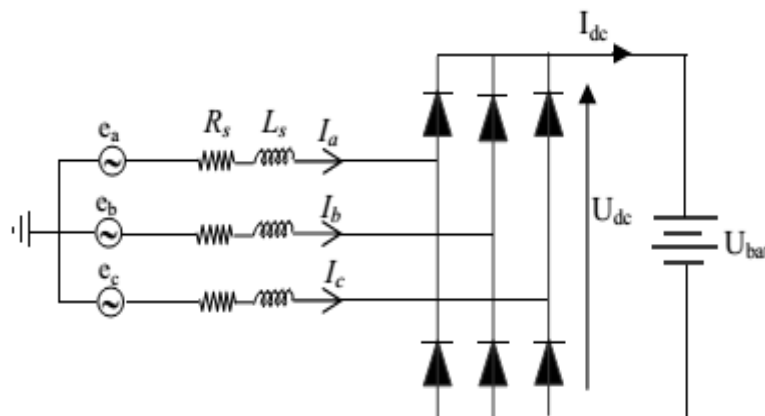
On déduit alors les expressions des courants  $I_b$  et  $I_c$  en fonction des tensions  $V_a$ ,  $V_b$ , et  $V_c$  résultants des circuits équivalents correspondants aux séquences de conduction des phases (a-c), et (b-c):

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_b - V_c + V_{dc}) \quad (\text{III} - 8)$$

$$\frac{dI_c}{dt} = \frac{1}{L_s} (V_c - V_a + V_{dc}) \quad (\text{III} - 9)$$

### III.4.3 Etude analytique de l'ensemble GSAP-Pont de diodes-Bus continu

En vue de comprendre l'influence de l'impédance interne de la génératrice sur le comportement énergétique et les limites de fonctionnement de l'ensemble du circuit non commandé de la figure III-12, le recours à un modèle analytique est apparu nécessaire.



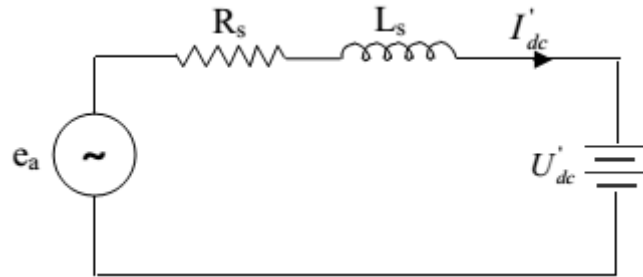
**Figure III-12** : Chaîne de conversion à association directe pont de diode – batterie

#### III.4.3.1 Modèle équivalent de la chaîne éolienne passive

Plusieurs modèles analytiques ont été développés dans le but de simplifier l'étude de tels systèmes. Parmi ces modèles, ceux qui définissent une machine à courant continu équivalente à la machine synchrone à aimants permanents associée à un redresseur à diodes [20], [21] ou tous les paramètres se trouvant en amont du pont de diodes (tension, courant; résistance et inductance) sont ramenés du côté continu.

Dans notre cas, on cherche à avoir un modèle équivalent plus simple en ramenant uniquement la tension et le courant de la batterie du côté alternatif.

Une machine synchrone triphasée fonctionnant en génératrice peut se représenter par un circuit équivalent par phase ramené du côté génératrice comme la montre la Figure( III-13)



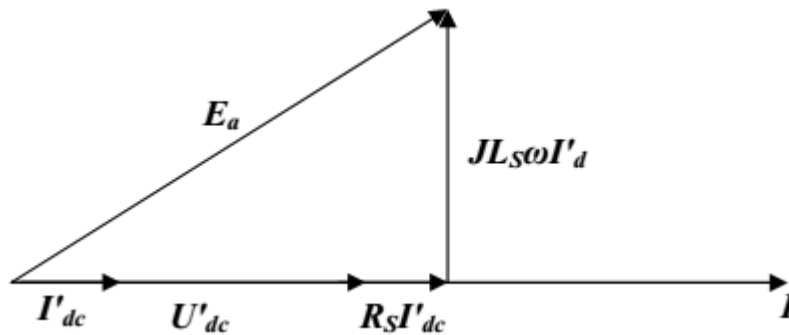
**Figure III-13 :** Schéma équivalent monophasé ramené du côté alternatif

$U'_{dc}$  et  $I'_{dc}$  sont respectivement, la tension et le courant de la batterie ramenés côté alternatif.

Soit  $U_a$  la composante fondamentale de la tension monophasée à l'entrée du pont à diodes la tension  $U'_{dc}$  est donnée par [22]:

$$U'_{dc} = U_a^{max} = \frac{2}{\pi} u_{bat} \quad (III - 10)$$

La représentation vectorielle des tensions est illustrée sur la figure III-14.



**Figure III-14 :** Schéma vectoriel du circuit équivalent

On tire du schéma vectoriel la relation suivante :

$$E_a^2 = (U'_{dc} + R_S I'_{dc})^2 + (L_S \omega I'_{dc})^2 \quad (III - 11)$$

Après développement et réarrangement des termes, on aura l'expression suivante :

$$I'_{dc}^2 + \frac{2U'_{dc}R_S}{(L_S \omega)^2 + R_S^2} I'_{dc} + \frac{U'_{dc}^2 - E_a^2}{(L_S \omega)^2 + R_S^2} = 0 \quad (III - 12)$$

L'équation (4-18) est sous la forme d'une équation parabolique telle que :

$$x^2 + bx + c = 0 \quad (\text{III} - 13)$$

La résolution de l'équation (III-19) nous donne :

$$x = \sqrt{\frac{b^2}{4} - c} - \frac{b}{2} \quad (\text{III} - 14)$$

Avec :

$$b = \frac{2U'_{dc}R_S}{(L_S\omega)^2 + R_S^2} \quad (\text{III} - 15)$$

$$c = \frac{U'_{dc}{}^2 - E_a^2}{(L_S\omega)^2 + R_S^2} \quad (\text{III} - 16)$$

L'expression du courant  $I'_{dc}$  est devenue donc :

$$I'_{dc} = \frac{\sqrt{E_a^2((L_S\omega)^2 + R_S^2) - U'_{dc}{}^2(L_S\omega)^2} - U'_{dc}R_S}{(L_S\omega)^2 + R_S^2} \quad (\text{III} - 17)$$

Sachant que :

$$E_a = \frac{1}{\sqrt{6}} K_\Omega \omega \quad (\text{III} - 18)$$

$$K_\Omega = \sqrt{6} \Phi_{eff} \quad (\text{III} - 19)$$

$$\omega = p\Omega \quad (\text{III} - 20)$$

Alors, l'expression du courant efficace équivalent  $I'_{dc}$  prend la forme :

$$I'_{dc} = \frac{\sqrt{\frac{K_\Omega^2 p^2 \Omega^2}{6} ((L_S p \Omega)^2 + R_S^2) - \frac{4U_{bat}^2}{\pi^2} (L_S p \Omega)^2 - \frac{2U_{bat}R_S}{\pi}}}{(L_S p \Omega)^2 + R_S^2} \quad (\text{III} - 21)$$

La puissance électrique triphasée est égale :

$$P_{elec} = 3U_a^{eff} \cdot I'_{dc} \quad (\text{III} - 22)$$

Avec :

$$U_a^{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}} U_a^{max} \quad (\text{III} - 23)$$

Alors :

$$P_{elec} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \times U_{bat} \times \sqrt{\frac{\left(\frac{K_{\Omega}^2 P^2 \Omega^2}{6} - \frac{4U_{bat}^2}{\pi^2}\right) \left((L_S P \Omega)^2 + R_S^2\right)}{(L_S P \Omega)^2 + R_S^2}} \quad (III - 24)$$

De l'équation (4-30), on déduit la condition de fonctionnement de la chaîne éolienne étudiée :

$$\left(\frac{K_{\Omega}^2 P^2 \Omega^2}{6} - \frac{4U_{bat}^2}{\pi^2}\right) \geq 0 \quad (III - 25)$$

La condition imposée sur la tension de la batterie est alors :

$$U_{bat} \leq \frac{\pi K_{\Omega} P \Omega}{2\sqrt{6}} \quad (III - 26)$$

$$U_{bat} \leq \frac{\pi}{2} E_{ab}^{max} \quad (III - 27)$$

Pour assurer la conduction continue du pont de diodes, et ainsi le bon fonctionnement de la chaîne éolienne passive étudiée, il est nécessaire que la tension de la batterie utilisée en aval du pont de diodes doive être inférieure à la valeur de la force électromotrice maximale composée de la génératrice, multipliée par le facteur  $\pi/2$ .

### III.4.3.2 Résultats de simulation

Les figures III-15 et III-16 représentent les courbes de puissances éoliennes optimales en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, et les courbes de charges définies par la relation (III-24), pour deux tensions de batterie.

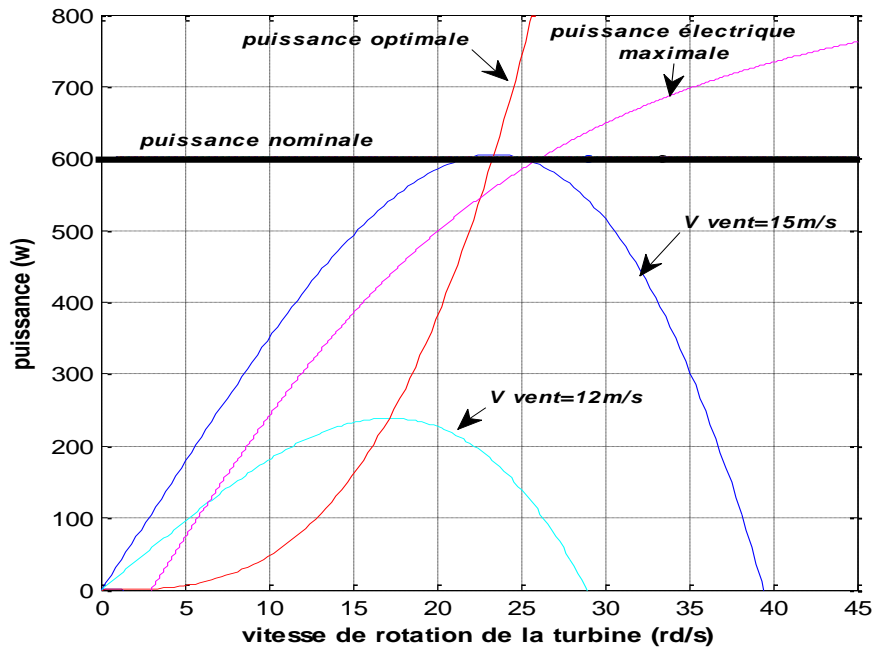


Figure III-15 : Courbes de puissances de la chaîne passive pour une tension batterie 12v

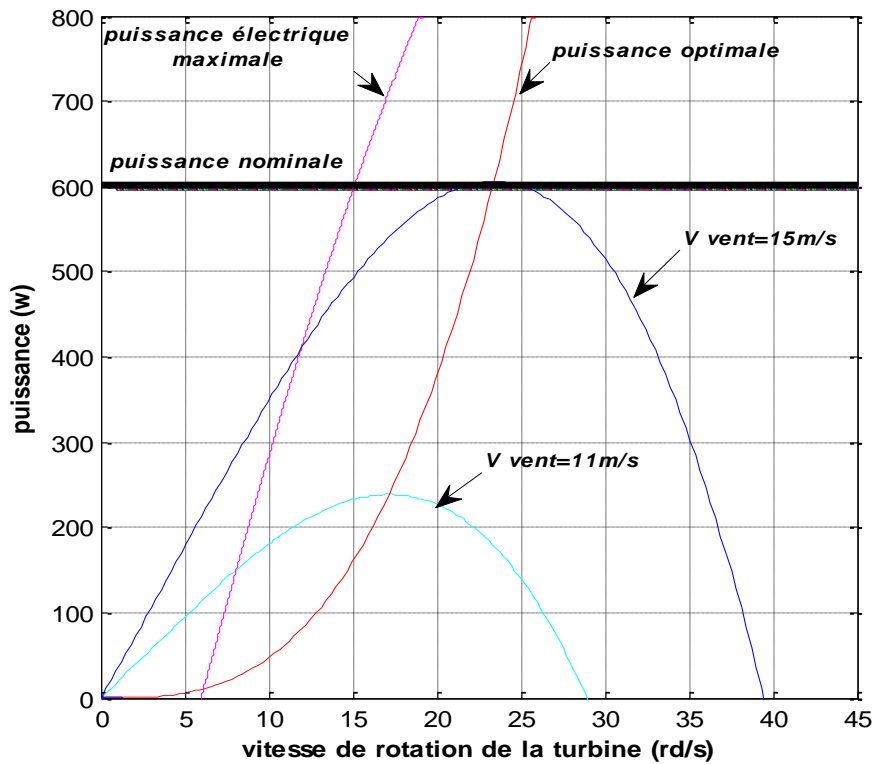


Figure III-16 : Courbes de puissances de la chaîne passive pour une tension batterie 24v

Les courbes de puissances illustrées sur les figures III-15 et la figures III-16 nous montrent bien

l'éloignement remarquable entre la puissance éolienne optimale et la puissance électrique maximale extractible du générateur synchrone à aimants permanent, ce qui dégrade le rendement globale de la chaîne éolienne passive considérée.

Cependant, un dimensionnement judicieux de l'ensemble des composants de cette chaîne, comportant une adaptation adéquate de l'impédance du générateur, et un choix optimale de tension de la batterie selon l'équation (III-27), peut aboutir à une caractéristique de la courbe de charge assez proche de celle de la puissance éolienne optimale; et avoir ainsi un comportement énergétique proche de l'optimum sans recours aux techniques de commandes (MPPT) et donc moins coûteux.

### **III.4.4 Conclusion**

Après cette étude, on peut tirer les avantages et les inconvénients de la chaîne passive :

#### **Avantages**

Premièrement, une chaîne éolienne entièrement « passive » est une solution très simple pour le petit éolien. En éliminant la partie commande MPPT, nous réduisons fortement la complexité et donc le coût du système. Par ailleurs, plusieurs dispositifs supplémentaires des systèmes actifs sont supprimés (capteurs, régulateurs.....).

En second lieu, simplifier le système permet de supprimer certains « points faibles », et ainsi d'augmenter la fiabilité de la chaîne, limitant ainsi la maintenance.

La chaîne éolienne « passive » est donc une solution efficace, particulièrement, pour une petite éolienne.

#### **Inconvénients**

La chaîne éolienne entièrement passive adapte la puissance captée par adaptation « naturelle » d'impédance. Ce sont donc les caractéristiques des éléments constitutifs du système (Turbine, Génératrice, Pont de Diodes, bus batterie) qui définissent l'efficacité énergétique du système.

## **III.5 Etude de la chaîne éolienne « active »**

### **III.5.1 Introduction**

Nous avons vu que la chaîne éolienne entièrement « passive » adapte la puissance captée par adaptation « naturelle » d'impédance. L'efficacité énergétique du système est donc imposée par les caractéristiques des éléments constitutifs du système, ce qui occasionne un « coût de conception » supplémentaire lié à la nécessité d'un « dimensionnement dédié » de tous les éléments. L'utilisation des convertisseurs statiques commandés est apparue nécessaire dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne pour optimiser la puissance prélevée avec la forme souhaitée sans adaptation naturelle d'impédance.

### **III.5.2 Convertisseurs statiques commandés dans la chaîne éolienne active**

Dans cette partie, on va associer le pont de diodes d'un convertisseur DC/DC de nature survolteur pour stocker l'énergie extraite dans le bus batterie. Par ce procédé, la puissance éolienne peut être indirectement contrôlée par un contrôle du courant à l'entrée du convertisseur.

#### **III.5.2.1 Principe de modélisation du convertisseur totalement commandé**

Pour qu'un convertisseur puisse fonctionner dans un mode totalement commandé, le générateur et le récepteur doivent être complémentaires lors des commutations: Ils doivent se comporter l'un comme une source de tension, l'autre comme une source de courant. Cela revient en pratique, à considérer soit des systèmes dont les tensions aux sorties du générateur et les courants aux entrées du récepteur sont des variables d'état, soit des systèmes où la situation inverse se présente [12].

### **III.5.3 Modélisation de l'association aérogénérateur-pont de diodes-hacheur dévolteur**

Le système de conversion d'énergie éolienne est composé d'un redresseur triphasé à six diodes suivi d'un hacheur dévolteur mono directionnel en courant et tension, commandé indirectement en puissance. Comme montré sur la figure (III.17)

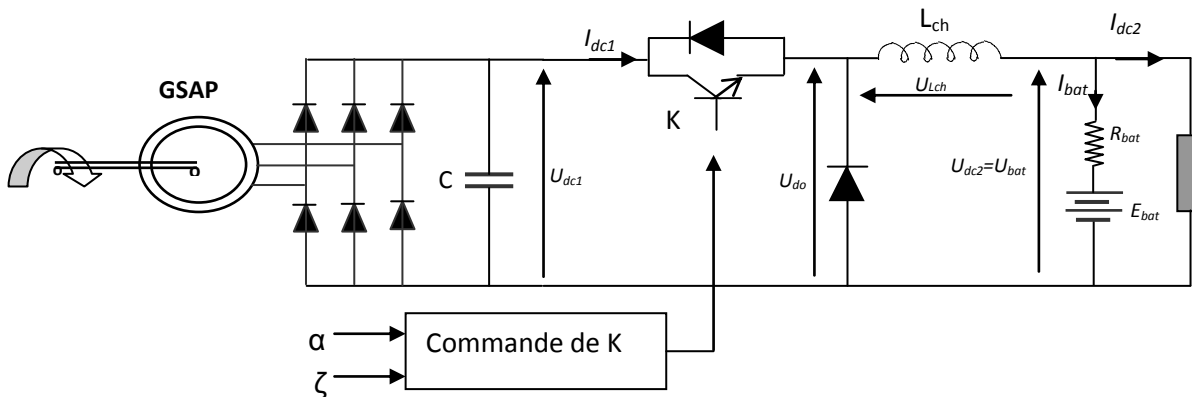


Figure III-17 : Structure avec pont de diodes et hacheur dévolteur simple

### III.5.3.1 Modélisation du hacheur dévolteur simple

Le circuit du hacheur dévolteur est représenté sur la figure III.17, La charge choisie dans ce montage est une batterie supposée composer d'une source de tension parfaite  $E_{bat}$  en série avec une résistance interne  $R_{bat}$ .

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale. Pour les batteries au plomb par exemple sa valeur vaut [23] :

$$R_{bat} = N \cdot 0.036 \Omega$$

N: Représente le nombre de cellules élémentaires d'une tension nominale égale à 12V.

$L_{ch}$  : Inductance de lissage, elle est dimensionnée en fonction de l'ondulation du courant tolérée dans la batterie selon l'expression [23]

$$L_{ch} = \frac{(1 - \alpha)}{\Delta I_{bat}^{max} + f_{dec}} \cdot E_{bat}$$

(III-28)

$\alpha$  : Rapport cyclique de l'interrupteur K

$f_{dec}$ : Fréquence de découpage.

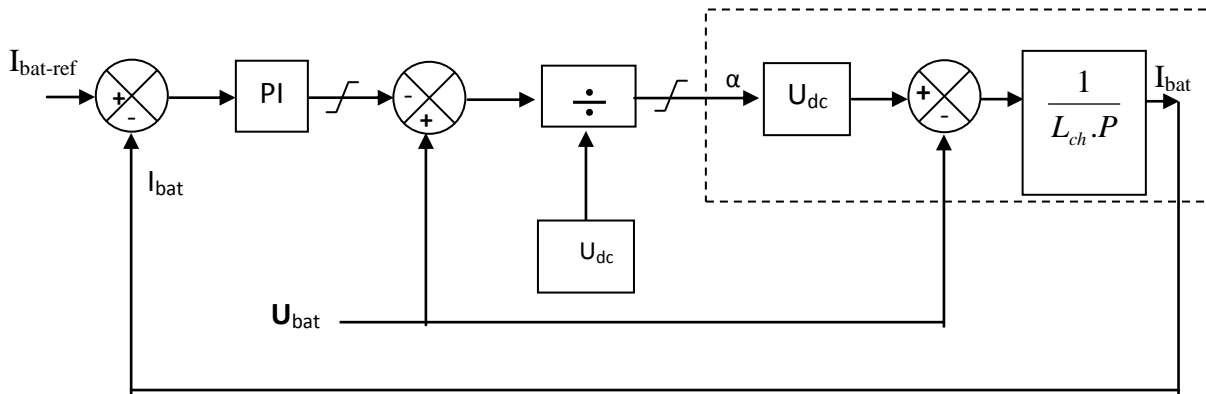
Les équations électriques obtenues sur une période de commutation peuvent s'écrire en terme de valeurs moyennes comme suit:

$$U_{do} = \alpha U_{dc1} \tag{III-29}$$

$$U_{do} = U_{bat} + U_{Lch} \quad (III-30)$$

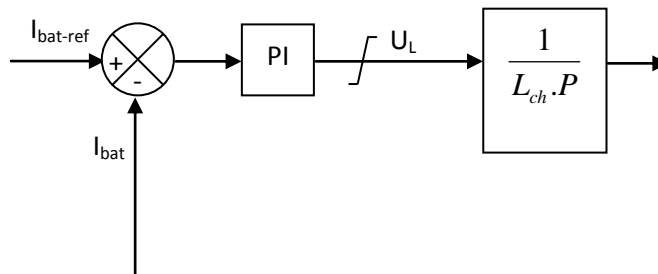
$$U_{do} = E_{bat} + R_{bat}I_{bat} + L_{ch} \frac{dI_{bat}}{dt} \quad (III-31)$$

La stratégie de commande consiste à contrôler le courant dans la batterie  $I_{bat}$  en utilisant un régulateur de type PI . La boucle de régulation ainsi obtenue est représentée sur la figure



**Figure III-18** : Schéma de la boucle de régulation

Après compensation, le schéma de régulation se réduit à celui de la figure III-19.



**Figure III-19** : Schéma de synthèse de régulateur

Etant donné que le courant de batterie  $I_{bat}$  dépend de la puissance de la batterie  $P_{bat}$ , cette dernière est considérée donc comme une variable de référence selon l'équation (III-32).

$$I_{bat}^{ref} = \frac{P_{bat}^{ref}}{U_{bat}} \quad (III-32)$$

L'interrupteur K est commandé par un signal à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). La valeur de rapport cyclique  $\alpha$  est donc comparée à une porteuse triangulaire.

En mesurant le courant de charge  $I_{bat}$  de la batterie ayant la tension  $U_{bat}$ , la puissance électrique obtenue ainsi est donnée par:

$$P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} \quad (III-33)$$

La prise en compte du rendement global  $\eta$  permet d'exprimer le bilan de puissance:

$$P_{bat} = U_{bat} \cdot I_{bat} = \eta \cdot P_{eol} \quad (III-34)$$

Le rendement global  $\eta$  est donné par le rapport de puissances maximales comme suit:

$$\eta = \frac{P_{bat}^{max}}{P_{eol}^{max}} \quad (III-35)$$

#### III.5.4 Compatibilité de la structure vis-à-vis de la tension batterie

En négligeant pour l'analyse, l'empiètement du pont de diodes et les pertes machine, la tension redressée dépend de la force électromotrice de la génératrice par:

$$U_{dcl} = \frac{3}{\pi} E_{ab}^{max} \quad (III-36)$$

Sachant que la force électromotrice de la génératrice est donnée par:

$$E_{ab}^{max} = \sqrt{3} \cdot p \cdot \psi_{max} \cdot \Omega \quad (III-37)$$

L'expression de la tension redressée est devenue :

$$U_{dcl} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot p \cdot \psi_{max} \cdot \Omega \quad (III-38)$$

Pour un régime de fonctionnement optimal, la vitesse de rotation s'établit en fonction de la vitesse du vent par l'équation (III-39). La valeur de la tension redressée en fonction de la vitesse du vent peut être déterminée au point optimal :

$$U_{dcl} = \frac{3 \cdot \sqrt{3}}{\pi} \cdot p \cdot \psi_{max} \cdot \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot V_v \quad (III-39)$$

En négligeant les pertes, la tension redressée peut s'écrire en fonction de la tension de la batterie  $U_{bat}$  et le rapport cyclique  $\alpha$ .

$$U_{dcl} = \frac{U_{bat}}{\alpha} \quad (III-40)$$

Selon la plage d'application du système éolien Le fonctionnement du hacheur dévolteur simple impose des limitations. La tension à l'entrée du hacheur possède des butées minimale et maximale qui sont déterminées par la tension de la batterie de stockage et par les butées du rapport cyclique  $\alpha_{min}$  et  $\alpha_{max}$ . La tension redressée  $U_{dcl}$  minimale à l'entrée du hacheur est défini par l'équation:

$$U_{dcl}^{min} = \frac{U_{bat}}{\alpha_{max}} \quad (III-41)$$

A partir des équations (III-39) et (III-41), la vitesse de vent minimale peut être calculée en fonction de la tension batterie :

$$V_v^{min} = \frac{\sqrt{3} \cdot \pi \cdot R}{9 \cdot p \cdot \psi_{max} \lambda_{opt} \alpha_{max}} \cdot U_{bat} \quad (III-42)$$

Admettant que la valeur maximale du rapport cyclique  $\alpha_{max}$  égal à 0.99, il est possible de trouver les vitesses minimales de vent assurant le bon fonctionnement de la chaîne éolienne pour différentes tensions de batteries. Pour la limite inférieure du rapport cyclique  $\alpha_{min}$  qui est supposé égale à 0.1, aucun problème n'est posé car les valeurs de vent obtenues sont très grandes.

### III.5.5 Calcule du régulateur PI pour le hacheur dévolteur simple

La fonction de transfert de la boucle ouverte du schéma bloc III-19 est exprimée par :

$$G_0(P) = \left( K_P + \frac{k_I}{P} \right) \cdot \frac{1}{L \cdot P} = \frac{K_I \cdot P \cdot T + 1}{L \cdot P^2} \quad (III - 43)$$

Avec:  $T_I = \frac{K_P}{K_I}$

La phase est égale à :

$$\varphi(j\omega) = \arg(G_0(j\omega)) = \arg(T_1 \omega) - \pi \quad (III - 44)$$

La bande passante est définie par la fréquence  $f_{BP}$  où la pulsation  $\omega_{BP}$  est liée par la relation :

$$\omega_{BP} = 2\pi f_{BP} \quad (III - 45)$$

En se basant d'une part sur un critère de marge de phase tel que :

$$M\varphi = \text{atg}(T_I \cdot \omega_{BP}) = \text{atg}(T_I \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{BP}) = \frac{\pi}{3} \quad (\text{III- 46})$$

Ce qui donne:

$$T_I = \frac{\text{tg}(\frac{\pi}{3})}{2 \cdot \pi \cdot f_{BP}} = \frac{\sqrt{3}}{2 \cdot \pi \cdot f_{BP}} \quad (\text{III - 47})$$

D'autre part, un critère sur la marge de gain donne :

$$|G_0(j\omega)| = \frac{K_I}{L} \cdot \frac{\sqrt{1+(T_I \cdot \omega_{BP})^2}}{\omega_{BP}^2} \quad (\text{III - 48})$$

Qui permet de calculer le facteur  $KI$  du correcteur :

$$K_I = \frac{1}{2} \cdot L \cdot \omega_{BP}^2 \quad (\text{III - 49})$$

D'où la valeur du gain proportionnel  $k_p$  qui peut être aussi aisément calculée:

$$K_P = K_I T_I \quad (\text{III - 50})$$

### III.5.6 Maximisation de la puissance avec contrôle en vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (\text{III-51})$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ce ci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{III-52})$$

$C_{ass}$  : régulateur de vitesse

$\Omega_{ref}$ : vitesse de référence

A partir de l'expression (III-7), on en déduit la vitesse de rotation de la turbine en fonction de la vitesse spécifique comme suit :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V_v}{R} \quad (III-53)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$  peut se déduire de (III-53) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (III-54)$$

En substituant la vitesse de vent dans (III-10), L'expression de la puissance éolienne optimale pour une éolienne de type savanius ayant comme surface  $2.R.H$  peut être donnée sous la forme :

$$P_{eol-opt} = \frac{C_p}{\lambda_{opt}} \cdot \rho \cdot R^4 \cdot H \cdot \Omega_{turbine-ref}^3 \quad (III-55)$$

En mettant :

$$K_{opt} = \frac{C_p}{\lambda_{opt}} \cdot \rho \cdot R^4 \cdot H \quad (III-56)$$

La puissance éolienne maximale est donc donnée par :

$$P_{eol-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_{turbine-ref}^3 \quad (III-57)$$

Alors la puissance maximale injectée dans la batterie peut être assimilé à :

$$P_{bat}^{max} = \eta \cdot K_{opt} \cdot \Omega_{turbine-ref}^3 \quad (III-58)$$

Le courant optimal de batterie peut être donc calculé en utilisant l'équation (III-58), on définit une constante modifiée  $K'_{opt}$  :

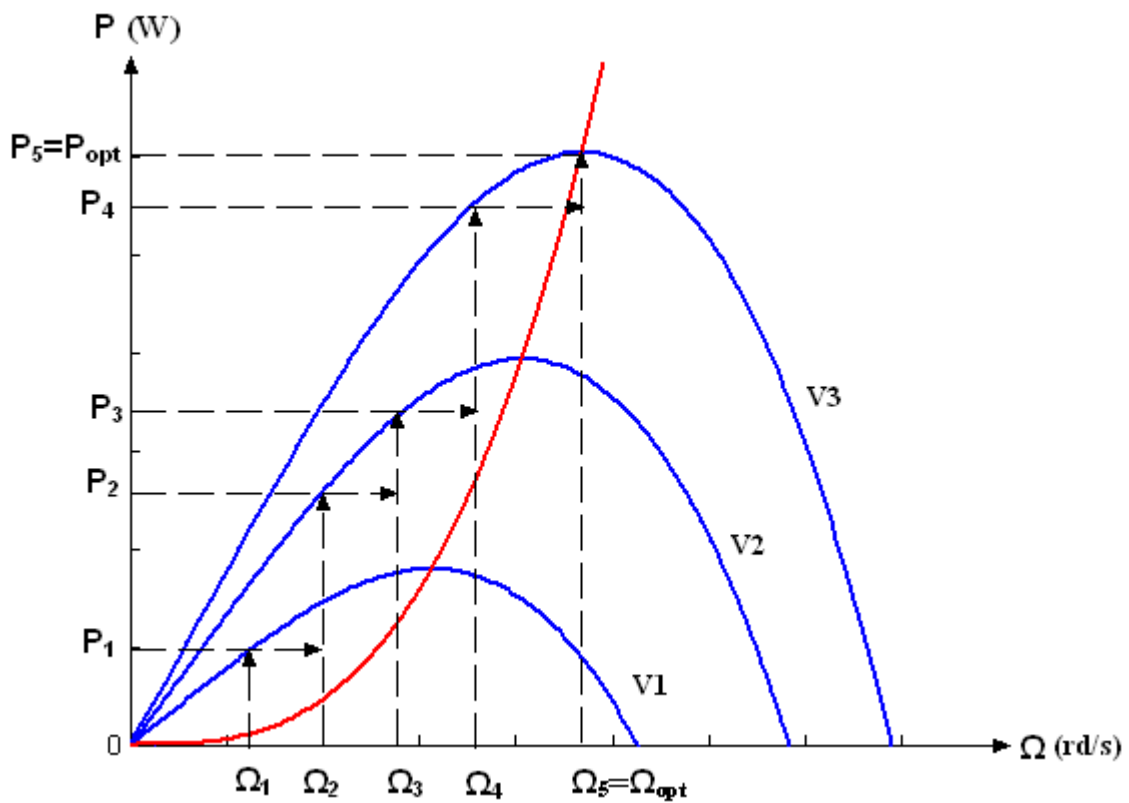
$$I_{bat}^{ref} = \frac{\eta \cdot K_{opt}}{U_{bat}} \cdot \Omega_{turbine-ref}^3 = K'_{opt} \cdot \Omega_{turbine-ref}^3 \quad (III-59)$$

Le dispositif de recherche de la puissance maximale peut être alors construit pour ce type de

circuit (Figure III-20) en utilisant la mesure de la vitesse de rotation.

$$\begin{array}{ccc} \longrightarrow & \Omega[K] & \longrightarrow I_{\text{bat}}^{\text{ref}} [K + 1] \\ & K'_{\text{opt}} \cdot \Omega^3 [K] & \end{array}$$

**Figure III-20 :** Courant de batterie en fonction de la vitesse de rotation



**Figure III-21 :** Principe de convergence vers le point optimale

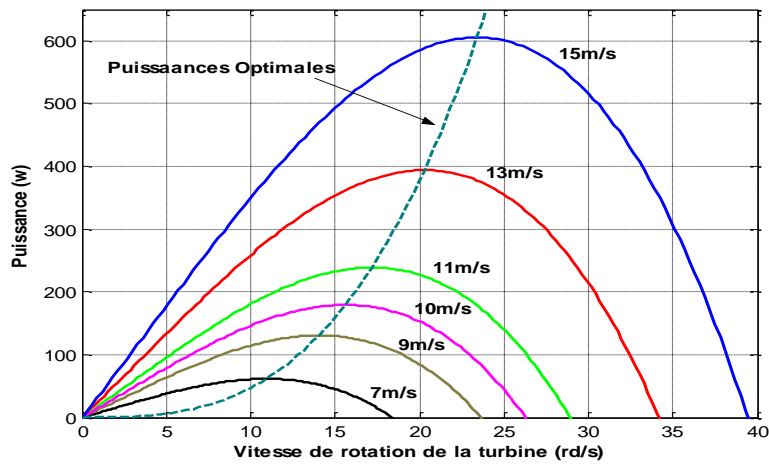
### III.5.7 Courbes caractéristiques de la turbine utilisée:

Comme on a vu au chapitre deux, la turbine à axe vertical utilisée dans cette partie de modélisation est caractérisée par le coefficient de puissance donné par la formule [14] :

$$C_p(\lambda) = -0.2121 \cdot \lambda^3 + 0.0856 \cdot \lambda^2 + 0.2539 \cdot \lambda$$

La courbe spécifique de cette turbine possède une forme en cloche très prononcée qui nécessite d'autant plus de disposer d'un dispositif d'extraction maximale de puissance (MPPT). Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale donc au point optimal. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximal  $C_{popt}$  suivantes:  $\lambda_{opt} = 0.78$  et  $15 C_{popt} = 0$ .

La figure 4-21 montre les différentes puissances éoliennes obtenues en fonction de la vitesse de rotation de la turbine pour plusieurs vitesses de vent.



**Figure III-22 :** Caractéristiques  $P_{eol} = f(\Omega)$  pour différentes vitesses de vent.

### III.6 Résultats de simulation

La figure (III-23) montre le profil du vent considéré pour la simulation des différentes stratégies de

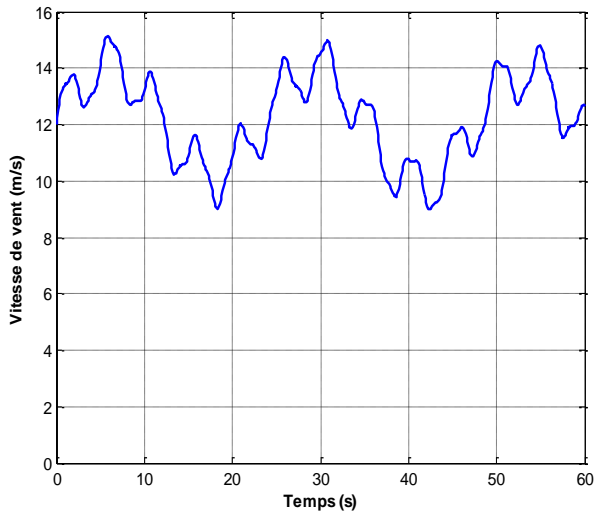


Figure III-23: Profil du vent

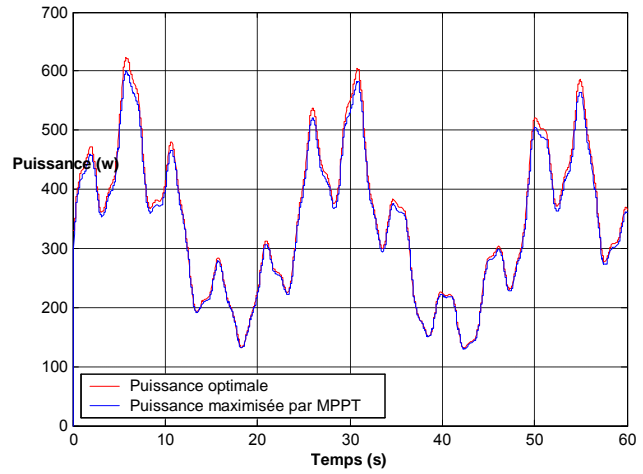


Figure III -24: Puissances

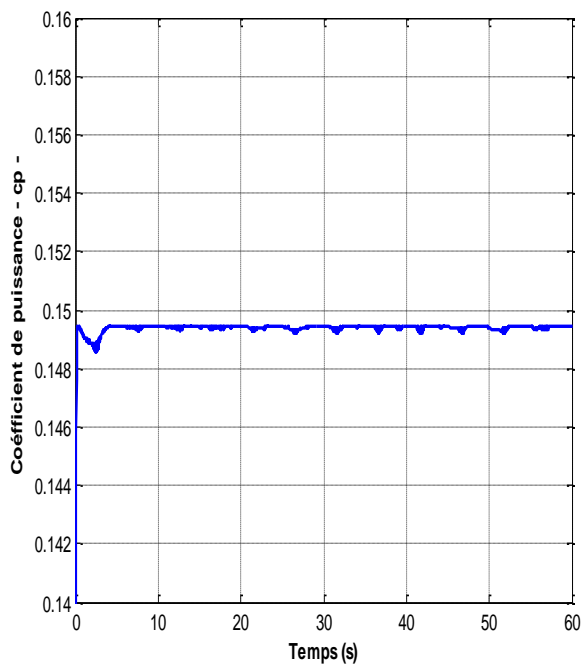


Figure III-25 : Coefficient de puissance

### **III.7 Conclusion:**

Le profil de vent utilisé dans ce chapitre est donné sur la figure (III-23). Comme illustré sur la figure (III-24), les puissances fournies avec la stratégies d'optimisation utilisée suivent parfaitement le profil du vent. Selon la variation de vitesse de vent, il est clair que la control du system du l'acheur est par faite ment réalisé ce-ci est justifié par l'écart insignifiante entre la puissance de référence et celle optimisée et la courbe du coefficient de puissance de la figure (III-23) qui est maintenu proche à sa valeur maximal

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

L'objectif de ce travail est le développement d'une stratégie de contrôle, appliquée sur un aérogénérateur synchrone à aimants permanents à faible puissance, et destinée principalement pour les sites isolés.

Une modélisation de la turbine éolienne a été détaillée en tenant compte des hypothèses simplificatrices; le comportement de la turbine peut donc être observé à travers un modèle de simulation pour un profil de vent choisi. Les résultats de simulation ont montré la spécificité de chaque stratégie de contrôle.

Le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents a été validé par les résultats de simulation à vide, avec charge séparée, ou encore connectée à une source de tension.

Dans le dernier chapitre, nous avons étudié une simple structure éolienne à petite taille dédiée aux sites isolés en utilisant une stratégie de commande avec capteur de vitesse pour extraire le maximum de puissance possible de la turbine éolienne, et d'alimenter d'une façon optimisée une charge de type batterie. L'algorithme de maximisation de puissances MPPT utilisé a pour rôle la recherche automatique du point optimal de puissance. En vue de comprendre les contraintes techniques de la chaîne éolienne passive, c.-à-d. sans électronique de puissance, nous avons associé l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents avec un pont de diodes débitant directement sur une charge de type batterie. La courbe de charge obtenue de cette structure montre bien la nécessité d'une adaptation naturelle de l'impédance pour mieux exploiter cette structure. L'efficacité énergétique est donc définie par les caractéristiques des éléments constitutifs du système (Turbine, Génératrice, Pont de Diodes, bus batterie). Ceci occasionne un « coût de conception » supplémentaire lié à la nécessité d'un « dimensionnement dédié » de tous les éléments (en particulier de la génératrice).

Pour remédier aux contraintes précédentes de la chaîne éolienne passive, et apporter des solutions technico-économiques dans le domaine de conversion d'énergie, une chaîne éolienne active a été adoptée. Le redresseur à pont de diodes a été utilisé avec un hacheur abaisseur de tension.

Suite aux travaux réalisés, on peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances d'une chaîne de conversion éolienne :

- Développement des stratégies de contrôle et des algorithmes de maximisation de puissances de la turbine éolienne sans capteur de vitesse.

## Conclusion générale

---

- Adaptation des modèles et stratégies de contrôle, développés sur des aérogénérateurs de puissances plus importantes.
- Concevoir et développer des chaînes éoliennes passives par un dimensionnement adéquat des composants, en vue de les intégrer dans le domaine de production décentralisée.

# **BIBLIOGRAPHIQUE**

[1] **P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, « *Éoliennes* », *Techniques de l'Ingénieur*, BM 640

[2] **Boubekeur Boukhezzar**, « sur les stratégies de commande pour l'optimisation et La régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable » thèse de doctorat, université de Paris, 2006.

[3] **Prof. Dr. Manfred Stiebler**, « *Wind Energy Systems for Electric Power Generation* » *Springer Series in Green Energy and Technology* ISSN 1865-3529-2008, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

[4] **S. El Aimani**, « *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* », thèse de doctorat de l'école centrale de Lille (ECL).

[5] **J. Martin**, "Energies éoliennes", *Techniques de l'Ingénieur*, traité de Génie énergétique, pp. B 8 585 1- B 8 585 21.

[6] **P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, « *Éoliennes* », *Techniques de l'Ingénieur*, BM 640

[7] **Rachid Azaizia**, "Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation alimentée par un convertisseur multi niveaux". Thèse de Magister, Soutenu en 2008. Université M'Hamed Bougara « Faculté des hydrocarbures et de la chimie de Boumerdes ». Algérie.

[8] **S.M. MUYEEN, J. TAMURA, T. MURATA**. « Stability augmentation of a grid-connected wind farm ». Springer 2009.

[9] **M. Rapin, J.M. Noel** « *Energies éoliennes, Principes et étude de cas* », 1<sup>ère</sup> Edition Dunod, Paris, 2010, ISBN 978-2-10-055060-9

[10] **Gabriel-Octavian Cimuca**, « *Système inertiel de stockage d'énergie associé à*

*des générateur éoliens », Thèse doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, centre de Lille, France, N°ordre: 2005-27*

**[11] L.H. Hansen, P.H. Madsen, F. Blaabjerg, H.C. Christensen, U. Lindhard, K. Eskilsen,**

*« Generators and power electronics technology for wind turbines », IECON'01 : The 27<sup>th</sup> annual conference of the IEEE industrial electronic society. 0-7803-7108-9/01/2001 IEEE*

**[12] G. Séguier, F. Labrique, H. Buyse, R. Bausiere,** « *Les convertisseurs de l'électronique de puissance* », volume 5, *Commande et Comportement dynamique, Techniques, documentations* 1998.

**[13] F. Poitiers,** « *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, 19 Décembre 2003, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, n°. ED 0366-125

**[14] M. Mayouf,** «*Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents*», Thèse de doctorat en science électrotechnique, Batna, Avril 2014.

**[15] A.M De Broe, S. Drouilhet, V. Gevorgian,** «*A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications*», *IEEE Trans. On Energy Conversion*, No. 4, pp. 1630-1635, December 1999.

**[16] O. Gergaud,** «*Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur*», Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.

**[17] E. J. R Sambatra,** « *Contribution à la modélisation comportementale d'une chaîne de conversion de l'énergie à source éolienne et à charge variable* », Thèse doctorat de l'Université du Havre, 2005.

[18] **K.L. Shi, H. Li**, «*A novel control of small Wind Turbine Driven Generator based on Neural Networks*», *IEEE Trans. On Power Electronics*, 2004.

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

[20] **A. Abdelli** "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive «Thèse préparée au Laboratoire Plasma et Conversion d'Energie, Unité Mixte CNRS-INPT-UPS N°5213, Octobre 2007

[21] **D.-H. Tran**, «*Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale*», *Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, septembre 2010*

[22] **M. Adem**, «*Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* ». *thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse. Avril 2005*

[23] **BENARIOUA Sofiane** " Etude d'un Système Eolien à Vitesse Variable" Thèse Magister en Electrotechnique ,24/10/2014. UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF UFAS (ALGERIE), Présenté à la Faculté de Technologie Département d'Electrotechnique

[24] **A.M De Broe, S. Drouilhet, V. Gevorgian**, «*A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications*», *IEEE Trans. On Energy Conversion*, Vol. 14, No. 4, pp. 1630-1635 , December 1999.

# **ANNEXE**

ANNEXE A

A-Schémas blocs de simulation

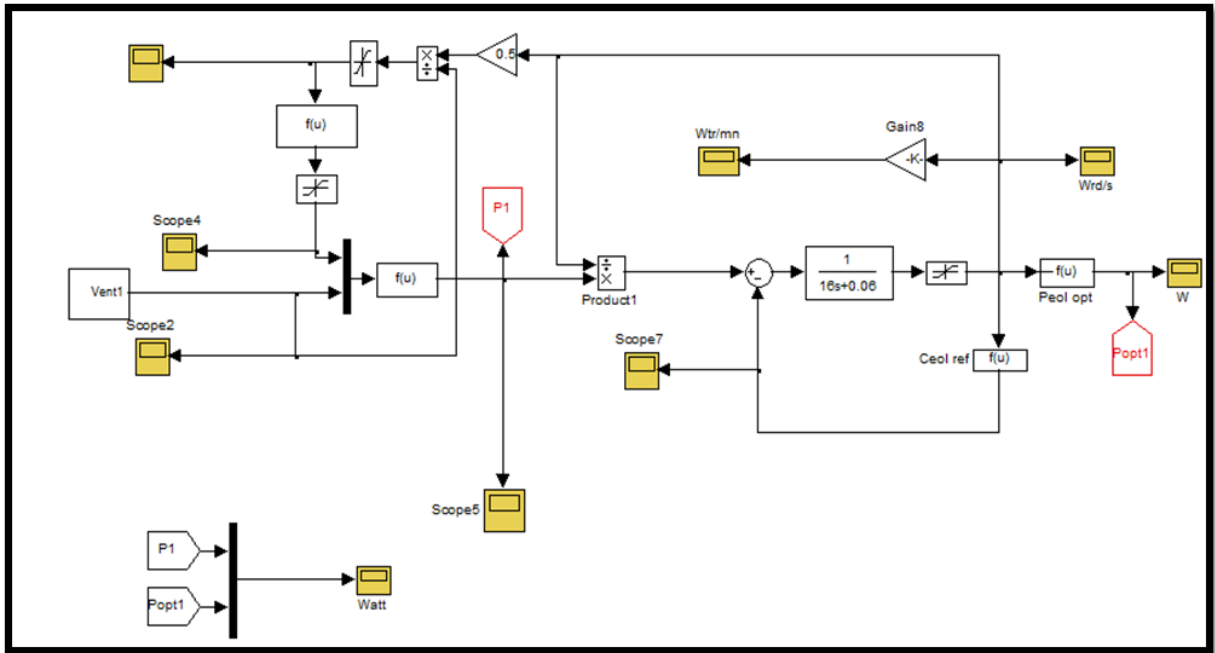


Figure A-1: schéma bloc de simulation de la turbine Sans asservissement

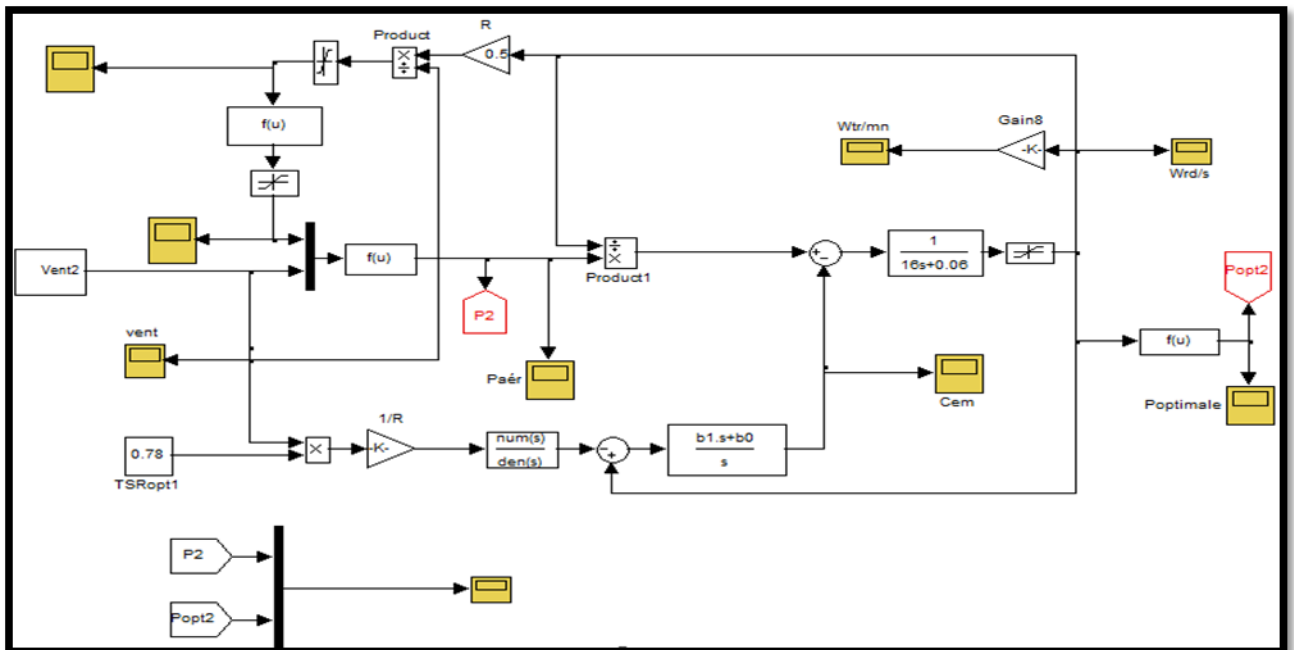


Figure A-2: schéma bloc de simulation de la turbine Régulateur PI avec anticipation

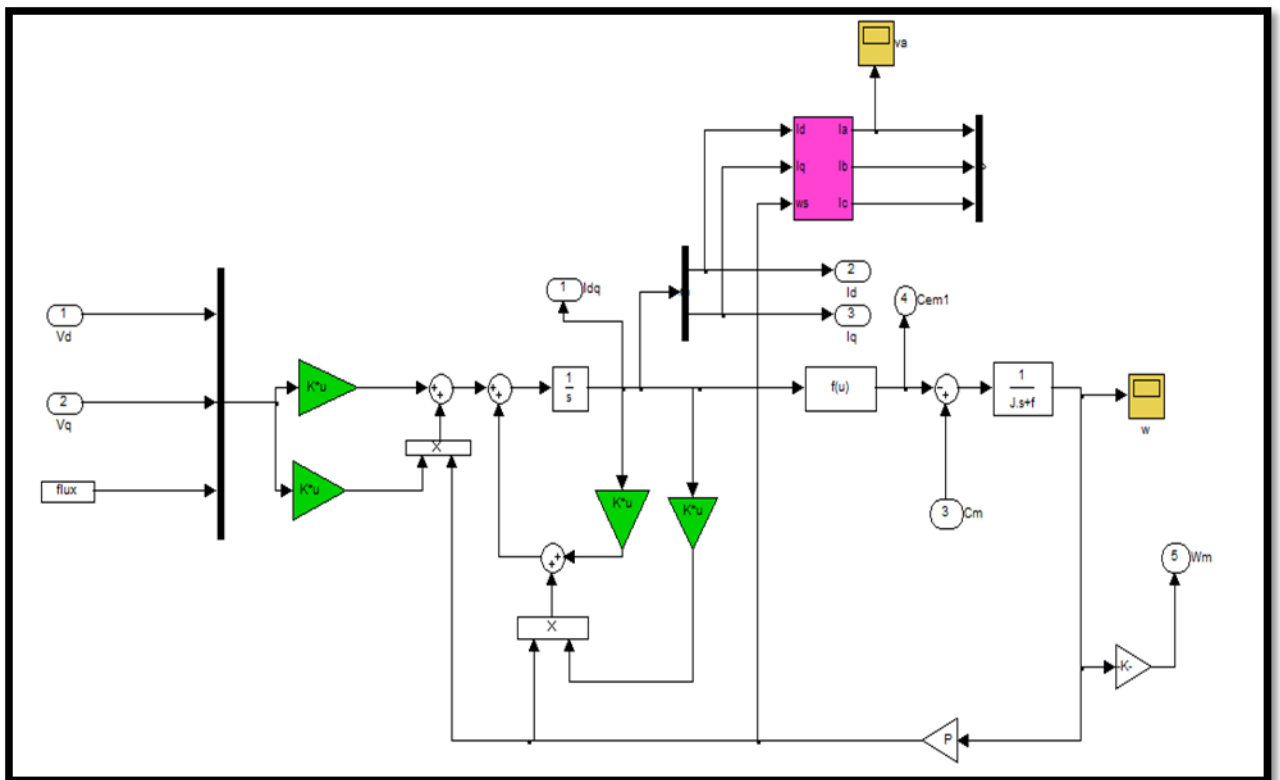


Figure A-3: Bloc de simulation de la GSAP en charge

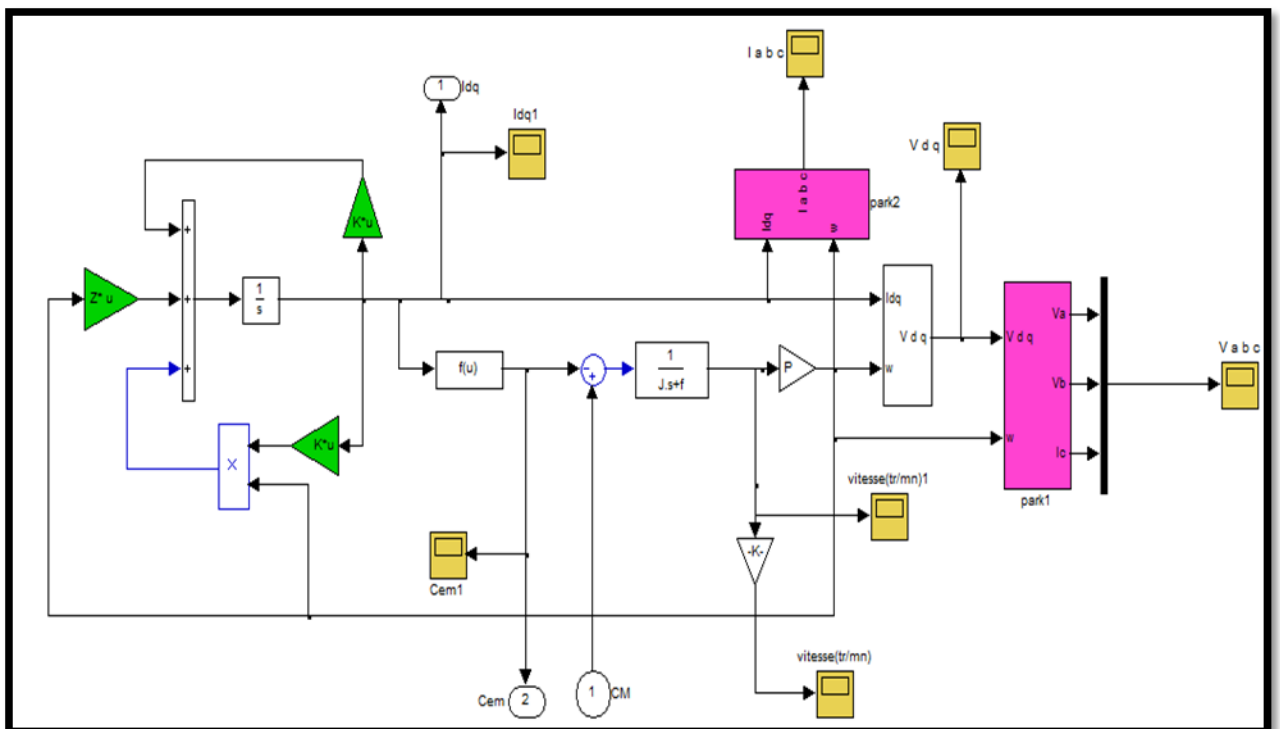


Figure A-4: Bloc de simulation de la GSAP connectée au réseau

## ANNEXE B

## B-Paramètres de simulation

## B1: Paramètres de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents

Elément de la chaîne de Conversion éolienne	Valeur numérique	Signification
Turbine éolienne type Savanius	$\rho = 1.2$	Masse volumique de l'air ( $Kg.m^2$ )
	R=0,5	Rayon de l'éolienne (m)
	H=2	Hauteur de la turbine (m)
	S=2	Surface active ( $m^2$ )
	$\lambda_{opt} = 0.78$	Vitesse réduite optimale
	$Cp^{opt}$	Coefficient de puissance optimale
Générateur synchrone A aimants permanents	P=600	Puissance nominale (w)
	$R_s=1,137$	Résistance statorique ( $\Omega$ )
	$L_d=2,7$	Inductance statorique selon l'axe d (mH)
	$L_q=2,7$	Inductance statorique selon l'axe q (mH)
	$\Psi_f$	Flux des aimants permanents (Wb)
	P=17	Nombre de paires de poles
	J=16	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice ( $Kg.m^2$ )

## B2 : Paramètres des diodes du redresseur

Paramètres	Valeurs
Résistance de conduction $r_D$	15,7 m $\Omega$
Tension Seuil $V_D$	0,86 V
Courant moyen maximal ( $I_{FSM}$ )	6 A
Tension de blocage maximale ( $V_{RRM}$ )	800 V

### B3: Paramètres du transistor et de la diode du hacheur

Paramètres	MOSFET IRLI3615	Diode Schottky 12CWQ10FN
Résistance en conduction $R_d$	85 $m\Omega$	20,7 $m\Omega$
Tension Seuil $V_D$	0 V	0,65 V
Courant moyen maximal ( $I_{FSM}$ )	14 A	12 A
Tension de blocage maximale ( $V_{RRM}$ )	150 V	100 V

## Résumé

Ce travail présente une stratégie de gestion de l'énergie dédiée aux systèmes éoliens de petites puissances utilisant pour la production de l'électricité un générateur synchrone à aimant permanents, la structure étudiée au cours de ce travail est composée d'une turbine à axe vertical attaquant directement un générateur synchrone à aimants permanents.

En vue de débiter l'énergie électrique sur une batterie, on a associé le générateur à un pont de diodes et un hacheur à baisseur de tension.

La stratégie d'optimisation est basée sur le contrôle du courant à la sortie de l'hacheur abaisseur de tension.