

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Energie Renouvelable

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

**Étude et simulation d'une chaîne  
de conversion éolienne**

Présenté par :  
**AOUNALLAH Mourad**  
Soutenu le : 04 Juin 2014

Devant le jury composé de :

Mr : TITAOUINE Abdenacer  
Mr : YAHIA Khaled  
Mr : GHOGGAL Adel

Prof. Univ de Biskra  
Dr. Univ de Biskra  
Dr. Univ de Biskra

Président  
Encadreur  
Examineur

Année universitaire : 2013 / 2014

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Electrotechnique  
Option : Energie Renouvelable

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

# Étude et simulation d'une chaîne de conversion éolienne

Présenté par :

*Etudiant* : AOUNALLAH Mourad

Avis favorable de l'encadreur :

*signature*

Avis favorable du Président du Jury

*Prof* : TITAOUINE Abdenacer

*Signature*

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière :Electrotechnique  
Option :Energie Renouvelable

*Thème :*

# Étude et simulation d'une chaine de conversion éolienne

Proposé par : Mourad AOUNALLAH

Dirigé par : Khaled YAHIA

## RESUMES (Français et Arabe)

### Résumé

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire. Elle est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés comme le pompage d'eau. C'est dans ce contexte qu'on a attribué notre mémoire, qui étudie la modélisation et la simulation d'une chaine de conversion éolienne en vue du pompage, basée sur une génératrice asynchrone à cage.

Mots clés : énergie éolienne, génératrice asynchrone auto-excité.

### الملخص

طاقة الرياح هي الآن أقل تكلفة لإنتاج الطاقة النظيفة. كما انها تستخدم لتوريد الطاقة إلى المناطق المنعزلة كضخ المياه في مجال ماء، وقد قمنا في هذا السياق بدراسة النمذجة والمحاكاة من سلسلة من تحويل الرياح لضخ الماء، بالاعتماد على مولد القفص غير متزامن.

**الكلمات المفتاحية:** مولد القفص الغير متزامن، طاقة الرياح، التحريض الالي.

## Le mémoire contient par ordre d'apparition:

- Dédicaces
- Remerciements
- Liste des Tableaux
- Liste des Figures
- Liste des abréviations
- Résumés (bilingue)

### Sommaire :

- \* Introduction générale
- \* Chapitre 1, 2, 3...  
(Chaque chapitre commence par une Introduction et se termine par une conclusion)
- \* Conclusion générale et perspectives
- \* Bibliographie
- \* Annexe

### Type d'écriture:

- Times new Roman 12
- Les titres en Gras
- Interligne 1.5
- Formules et Figures sont numérotées par chapitre :  
exp. Fig. n°Chap. n°figure (Fig. I.1) ou (Equ. I.1)

---

### Remarques :

- Eviter le glaçage de la page de garde.
- Respecter le contenu par ordre d'apparition.
- Ecrire les résumés bilingues dans une seule page...

- عدم تجليد الصفحة الأولى
- احترام المحتوى المذكور أعلاه
- كتابة ملخص للمذكرة باللغتين العربية والفرنسية) و في صفحة



# Remerciements



*Mes remerciements vont premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé, et la patience, qu'il nous a données durant toutes ces années d'étude.*

*J'exprime mes profondes gratitudes à mes parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à mon encadreur YAHIA KHALLED pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de me donner ses conseils et remarques.*

*Je tiens à remercier vivement toutes les personnes qui nous ont aidés à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés, de près ou de loin, à accomplir ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui a contribué à notre formation.*

*Enfin je tiens à exprimer ma reconnaissance à tous mes amis et collègues pour le soutien moral et matériel.*

## DEDICACE

*A ma chère mère, pour ses sacrifices de puis qu'elle mis au monde,*

*A mon père, qui m'a toujours soutenu et aidé à affronter les  
difficultés,*

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

*A mon chère frère et mes sœurs, à toute ma famille.*

*A tous mes amis madjed ,Hakim , Abdel Ali, Juniore ,Farés ,Rachid .*

*A toute mes amis en étude avec moi surtout Ayoub ,Mohamed*

*,Mossab,*

*Je dédie ce modeste travail.*

*AOUNALLAH Mourad*

**Sommaire**

**Remerciements.....**

**Dédicace.....**

**Introduction générale.....1**

**Chapitre I**

**Configuration des systèmes de conversion éolienne**

**I.1. Introduction.....3**

**I.2. Les énergie renouvelable.....3**

**I.2.1. Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie.....4**

**I.2.2. L'énergie éolienne.....5**

**I.2.3. Potentiel éolienne.....5**

**I.2.4. Différents parties d'un aérogénérateur.....6**

**I.3. Différents types d'une éolienne.....8**

**I.3.1. Eolienne à axe vertical.....8**

**I.3.2. Eolienne à axe horizontal.....8**

**I.4. Les avantages et les inconvénients.....9**

**I.4.1. Les avantages.....9**

**I.4.2. Les inconvénients.....9**

**I.5. Les avantages et les inconvénients de les différents types d'éolienne.....10**

**I.5.1. L'éolienne à axe vertical.....10**

**I.5.1.1. Les avantages.....10**

**I.5.1.2. Les inconvénients.....10**



<b>I.5.2. L'éolienne à axe horizontal.....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.2.1. Les avantages.....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.2.2. Les inconvénients.....</b>	<b>10</b>
<b>I.6. Les différents types de pompage.....</b>	<b>11</b>
<b>I.6.1. Pompage éolienne mécanique.....</b>	<b>11</b>
<b>I.6.2. Pompage éolienne électrique.....</b>	<b>11</b>
<b>I.7. Configuration des systèmes de pompage éolienne suivants le moteur d'entraînement.....</b>	<b>12</b>
<b>I.7.1. Machine asynchrone à cage(MAS).....</b>	<b>13</b>
<b>I.7.2. Machine asynchrone double alimentation(MADA).....</b>	<b>15</b>
<b>I.8. Configuration suivant le pompage utile.....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.1. La pompe volumétrique.....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.2. La pompe centrifuge.....</b>	<b>16</b>
<b>I.9. L'état de l'art sur le système de pompage.....</b>	<b>16</b>
<b>I.10. Conclusion.....</b>	<b>17</b>

## **Chapitre II**

### **Modélisation du système de conversion éolienne**

<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>18</b>
<b>II.2. Modélisation du système.....</b>	<b>19</b>
<b>II.2.1. Caractéristiques et Modélisation du vent.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2.1.1. Le vent.....</b>	<b>20</b>
<b>II.1.2. Les caractéristiques de vent.....</b>	<b>20</b>

II.1.2.2. Modèle de vent.....	21
II.2.2. Modèle de la turbine.....	21
II.2.3. Modèle de multiplicateur.....	23
II.2.4. Modèle de l'arbre de la machine.....	26
II.2.5. Modélisation de la génératrice asynchrone auto-excité.....	27
II.2.5.2. Principe de fonctionnement de GAS.....	27
II.2.5.3. Modèle de la génératrice asynchrone auto-excité.....	28
II.2.5.3. Equation d'auto-excité.....	29
II.3. Conclusion.....	30

## **Chapitre III**

### **Résultats de simulation**

III.1. Introduction.....	31
III.2. Générateur asynchrone auto-excité fonctionnant à vide.....	31
III.3. Générateur asynchrone auto-excité fonctionnant en charge.....	33
III.4. Conclusion.....	36
Conclusion générale.....	
Annexe.....	
Bibliographie.....	

**Liste des figures et tableau**

**Chapitre I**

Tableau (I.1) : répartition de la puissance installée par application.....	4
Figure ( I.1) : Structure de la production d'électricité mondiale en 2011 .....	4
Figure (I.2) : Répartition des usages de l'énergie renouvelable en Algérie.....	5
Figure (I.3) : Tracé de la carte des vents a 10 mètres en Algérie.....	6
Figure (I.4) : principe de l'éolienne à axe horizontale.....	7
Figure (I.4) : les différent types d'éolienne.....	8
Figure (I.5) : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de $\lambda$ et de l'angle de pas des pales .....	9
Figure (I.6) : Schéma synoptique du pompage électrique et mécanique.....	12
Figure (I.7) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).....	13
Figure (I.8) : Système éolien basée sur la machine asynchrone de type Dahlander à deux vitesses de rotation.....	13
Figure (I.9) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	13
Figure (I.10) : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.....	14
Figure (I.11) : Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.....	15
Figure (I.12) : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par la chaîne rotorique.....	15

**Chapitre II**

Figure (II.1) : structure du système de pompage éolienne.....	18
Figure (II.2) : modèle de simulation de vent.....	22

## Liste des figures et tableau

---

Figure (II.3) : résultat Simulink de la vitesse de vent.....	22
Figure (II.4) : modèle de la turbine éolienne.....	23
Figure (II.5) : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de fixe).....	24
Figure (II.6) : Coefficient de la puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation.....	25
Figure (II.7) : Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone [11].....	26
Figure (II.8) : inductance magnétisation en fonction de courant magnétisation.....	28

### **Chapitre III**

Figure (III.1) : schéma de Principe.....	31
Figure (III.2) : Tension statorique à vide.....	32
Figure (III.3) : Zoom de la tension statorique à vide.....	32
Figure (III. 4) : Courant de ligne statorique à vide.....	33
Figure (III. 5) : Zoom du courant de ligne statorique à vide.....	33
Figure (III.6) : Schéma de principe.....	34
Figure (III.7) : Allure des tensions statoriques.....	34
Figure (III.8) : Allure des courants de ligne.....	35
Figure (III.9) : Allure des courants charge.....	35
Figure (III.10) : Allure du courant de magnétisation.....	36



**Notations et symboles**

S	La section de la surface active de la voilure [m <sup>2</sup> ]
P <sub>eol</sub>	Puissance éolienne [kW]
C <sub>p</sub>	Coefficient de puissance de l'éolienne
λ	Vitesse linéaire de la turbine [m/s]
V <sub>v</sub>	Vitesse du vent [m/s]
ρ	La masse volumique de l'air [kg/m <sup>3</sup> ]
s, r	Indices stator et rotor, respectivement
t	Temps [s]
V	Tension [V]
I, i	Courant [A]
i <sub>m</sub>	Courant de magnétisation[A]
Ω	Vitesse de rotation mécanique [ rd / s ]
ω	Vitesse de rotation électrique (ω= Ω p) [ rd / s ]
ω <sub>s</sub>	Pulsation statorique [ rd / s ]
ω <sub>r</sub>	Pulsation rotorique ou de glissement [ rd / s ]
s	Opérateur de Laplace.
C <sub>em</sub>	Couple électromagnétique [Nm]
C <sub>r</sub>	Couple mécanique résistant [Nm]
L <sub>s</sub>	inductance propre cyclique statorique [H]
L <sub>r</sub>	inductance propre cyclique rotorique [H]
L <sub>m</sub>	inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor [H]
R <sub>r</sub>	Résistance rotorique [Ω]

**Notations et symboles**

$R_s$	Résistance statorique [ $\Omega$ ]
F	Coefficient de frottement visqueux [SI] où [ $N_m.s/rd$ ]
J	Moment d'inertie de l'entraînement [ $kg.m^2$ ]
P	Nombre de paire de pôles
GAS	Génératrice Asynchrone auto-excité
MAS	Moteur Asynchrone ou Machine Asynchrone
D	Diamètre de la canalisation[m]
M	Le nombre de règle intervenant.
$C_p$	Le couple utile pour l'entraînement de la pompe[Nm]
MADA	Moteur asynchrone double alimentation.
$E_V$	Energie cinétique du vent[j]
$V_{sd}, V_{sq}$	Les tensions statoriques dans le repère de Park[V]
$i_{sd}, i_{sq}$	Les courants statoriques dans le repère de Park[A]
$i_{rd}, i_{rq}$	Les courants rotoriques dans le repère de Park[A]
$i_{chd}, i_{chq}$	Les courants en charge dans le repère de Park[A]
$C_{eol}$	Le couple éolienne[Nm]
$C_p^{opt}$	Coefficient de puissance optimale d'une éolienne

## Résumé

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire. Elle est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés comme le pompage d'eau. C'est dans ce contexte qu'on a attribué notre mémoire, qui étudie la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne en vue du pompage, basée sur une génératrice asynchrone à cage.

Mots clés : énergie éolienne, génératrice asynchrone auto-excitée.

## المخلص

طاقة الرياح هي الآن أقل تكلفة لإنتاج الطاقة النظيفة. كما انها تستخدم لتوريد الطاقة إلى المناطق المنعزلة كضخ المياه في مجال ما، وقد قمنا في هذا السياق بدراسة النمذجة والمحاكاة من سلسلة من تحويل الرياح لضخ الماء، بالاعتماد على مولد القفص غير متزامن.

**الكلمات المفتاحية:** مولد القفص الغير متزامن، طاقة الرياح، التحريض الالي.



# Introduction générale

Les énergies renouvelables (eau, vent, soleil) sont aujourd'hui de plus en plus utilisées dans la production de l'électricité. Ces énergies propres et gratuites représentent une bonne alternative aux ressources fossiles.

Parmi les sources renouvelables dénombrées, on compte l'énergie éolienne qui connaît, depuis quelques décennies, un formidable développement.

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal) et aussi différentes configurations d'un système éolien (à vitesse fixe et variable). Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe. Ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler la vitesse de rotation des éoliennes à chaque instant.

Une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales d'une éolienne, multiplicateur de vitesse, ...).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (générateur électrique piloté par une électronique de commande et de puissance,.....).

Le but de ce mémoire est la simulation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto excitée.

Ce mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, on a étudié la configuration d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice asynchrone auto excitée après une brève introduction sur les énergies renouvelables et les différents types de pompes éoliennes.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié la modélisation de la turbine, le vent, le multiplicateur, l'excitation, la génératrice asynchrone auto excitée à vide et en charge.

Dans le troisième chapitre, les résultats de simulation du système global sont donnés et interprétés.

Notre mémoire sera terminé par une conclusion générale et perspectives du futur travail.

# Configuration des systèmes de conversion éolienne

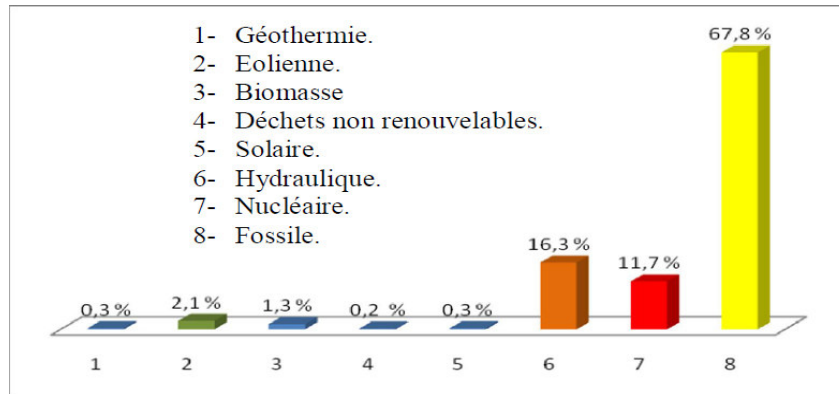
## I.1. Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [4]. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones.

Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible. Ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

## I.2. Les énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années. Dorénavant, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Naturellement décentralisées, il est intéressant de les mettre en œuvre sur les lieux de consommation en les transformant directement, soit en chaleur, soit en électricité, selon les besoins. La figure I.1 présente la production mondiale d'électricité en 2011 [5].



**Figure (I.1):** Structure de la production d'électricité mondiale en 2011.

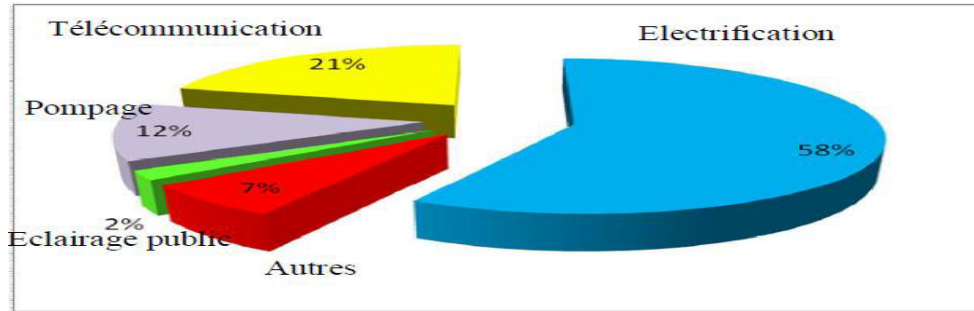
La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère aléatoire des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation des systèmes de récupération d'énergie.

### I.2.1. Evaluation de l'énergie renouvelable en Algérie

Le potentiel de l'énergie renouvelable en Algérie est le plus important en Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays, comme indique le tableau suivant [6].

Application	Puissance instantanée(KW)	Pourcentage
Electrification	1353	58%
Télécommunication	498	21%
Pompage	288	12%
Eclairage public	48	2%
Autres	166	7%

**Tableau (I.1):** répartition de la puissance installée par application.



**Figure (I.2):** Répartition des usages de l'énergie renouvelable en Algérie.

### I.2.2. Energie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

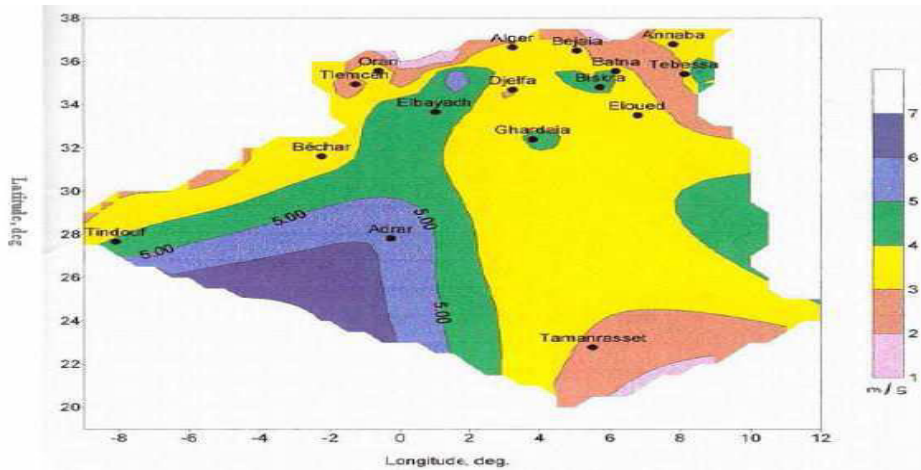
Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 40 ans un essor remarquable notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), le parc éolien pourrait atteindre une puissance installée de 230 GW en 2020, soit plus de 5 fois la puissance installée en 2005 qui était de 40 GW [7].

Le principal inconvénient de cette source d'énergie est l'indisponibilité et l'imprévisibilité du vent.

### I.2.3. Potentiel éolien

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Biskra. Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts plateaux. Au sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4 m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6 m/s dans la région d'Adrar [6].



**Figure (I.3):** Tracé de la carte des vents a 10 mètres en Algérie.

#### I.2.4. Différentes parties d'un aérogénérateur

Une éolienne rapide est constituée principalement de trois parties : les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement.

La tour est généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât 80m) [8].

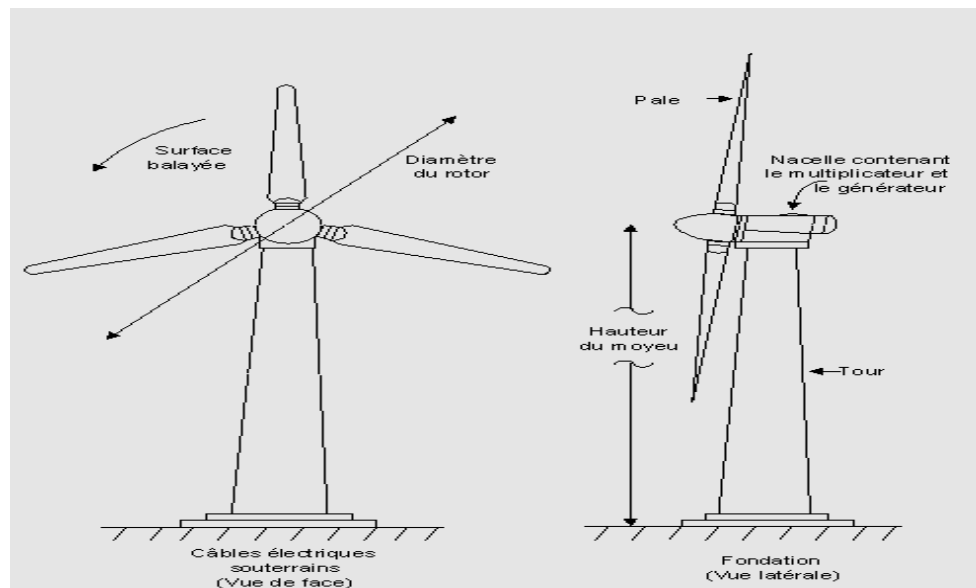
La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur.

Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés) [4].

Une armoire de commande, comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle.

Un multiplicateur de vitesse, un radiateur de refroidissement et un système de freinage.



**Figure (I.4):** principe de l'éolienne à axe horizontal.

### I.3. Différents types d'aérogénérateurs

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître et les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

#### I.3.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

#### I.3.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation.



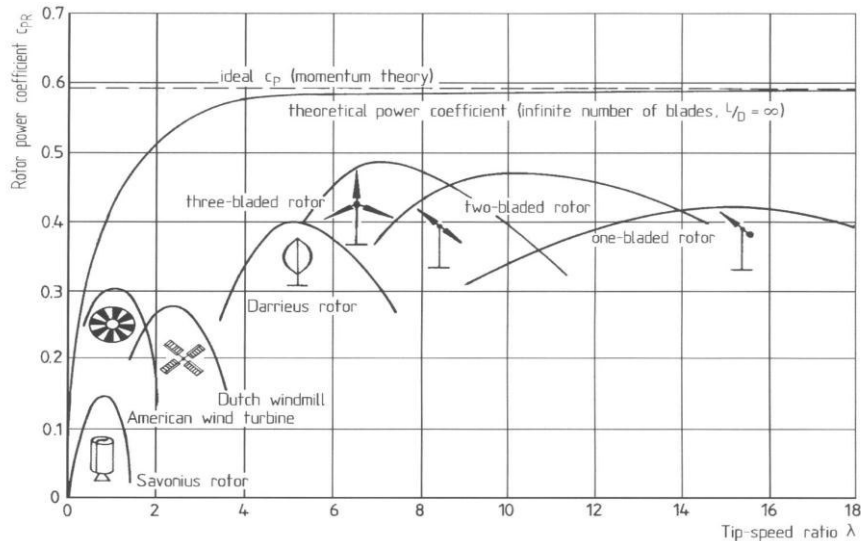
(A) Eolienne d'un axe horizontal



(B) Eolienne d'un axe verticale

**Figure (I.4):** Différent types d'éolienne





**Figure (I.5):** Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de  $\lambda$  et de l'angle de pas des pales.

La figure I.5 montre clairement l'avantage des axes horizontaux en termes de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en site peu ventés (zones urbaines,...). Les courbes  $C_p(\lambda)$  sont plus plates pour les axes horizontaux à faible nombre de pales (1,2,3) par rapport aux axes verticaux ou aux multi pales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de  $\lambda$  autour de  $\lambda_{opt}$  (fonction MPPT moins importante).

## I.4. Avantages et inconvénients [11]

### I.4.1. Avantages

- ✓ Source d'énergie renouvelable et inépuisable, non polluante;
- ✓ Création d'emploi (l'entretien d'un parc éolien);
- ✓ Techniquement au point dans les régions bien ventées;
- ✓ La période de haute productivité en hiver.

### I.4.2. Inconvénients

- ✓ Coût élevé d'un projet éolien
- ✓ Les effets sur le paysage ;
- ✓ Le bruit ;
- ✓ La sécurité.

## **I.5. Avantage et inconvénients des différents types de l'éolienne**

### **I.5.1. Eolienne à axe vertical**

#### **I.5.1.1. Avantages**

- ✓ La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- ✓ Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui lui permet de fonctionner qu'elle que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✓ Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

#### **I.5.1.2. Inconvénients**

- ✓ Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- ✓ La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- ✓ Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

### **I.5.2. Eolienne à axe horizontal**

#### **I.5.2.1. Avantages**

- ✓ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✓ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ✓ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

#### **I.5.2.2. Inconvénients**

- ✓ Coût de construction très élevé.
- ✓ L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

## **I.6. Différent types de pompage**

### **I.6.1. Pompage éolien mécanique**

Les éolienne de pompage mécanique est un système très ancien visible dans beaucoup de nos campagnes. Ce système à la technologie éprouvée reste néanmoins très utilisé pour créer des points d'eau dans des endroits isolés(dont le raccordement au réseau est impossible ou trop cher).On retrouve des applications en:

-élevage de bétail,

-irrigation de cultures.

Le principe de fonctionnement est le suivant: un rotor éolien d'une vingtaine de pales(Le couple de fonctionnement nécessaire étant très élevé) entraîne, par un système de bielle-manivelle, une pompe a position plongée au fond du puits. C'est un système qui convient assez bien pour les zones peu ventées, avec des besoins en eau journaliers n'excèdent pas les 20m<sup>3</sup> et des profondeurs de puits ne dépassant pas les 50m. Avec des puits plus profonds, les quantités d'eau pompées sont faibles et les risques de rupture de la tringlerie décrit plus haut, on peut conclure que les compétitivités des combustibles fossiles de pompage sont accrues compte tenu des efforts mécaniques[11].

### **I.6.2.Pompage éolien électrique**

Plusieurs systèmes de pompage éolien électrique existent, mais le plus courant est sans conteste, celui dont la configuration est représentée dans la figure I.6, un rotor éolien muni de deux à trois pales est couplé à une génératrice alimentant un groupe motopompe. Généralement les deux machines électriques, soit de types asynchrone, alors que la pompe peut être de surface ou submersible. Pour un site isolé et assez bien venté, l'utilisation de l'énergie éolienne pour le pompage de l'eau peut s'avérer indispensable et très compétitive par rapport à d'autre source d'énergie. Des deux systèmes éoliens de pompage, on peut conclure que le pompage éolien électrique est nettement plus performant que le pompage éolien mécanique. Pour le cas des puits profonds et grands débits, le pompage éolien électrique reste l'unique solution[11].

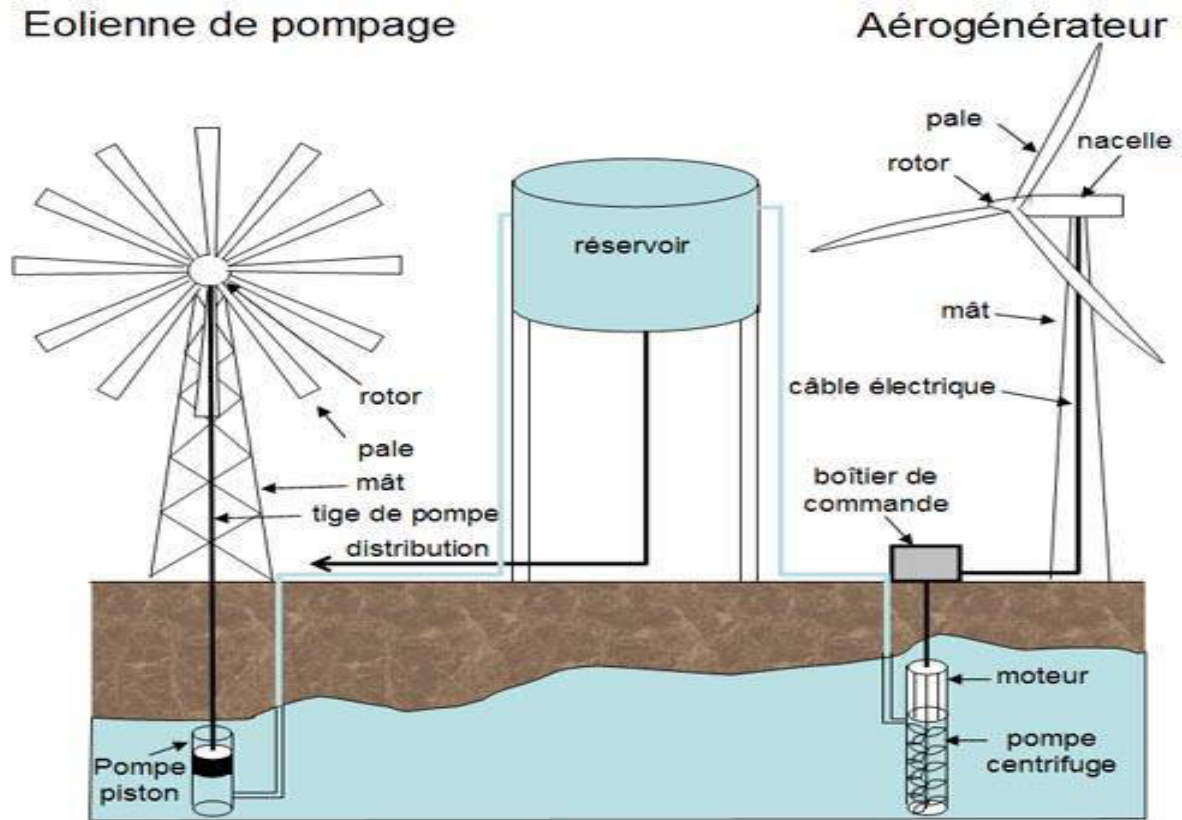


Figure (I.6): Schéma synoptique du pompage électrique et mécanique.

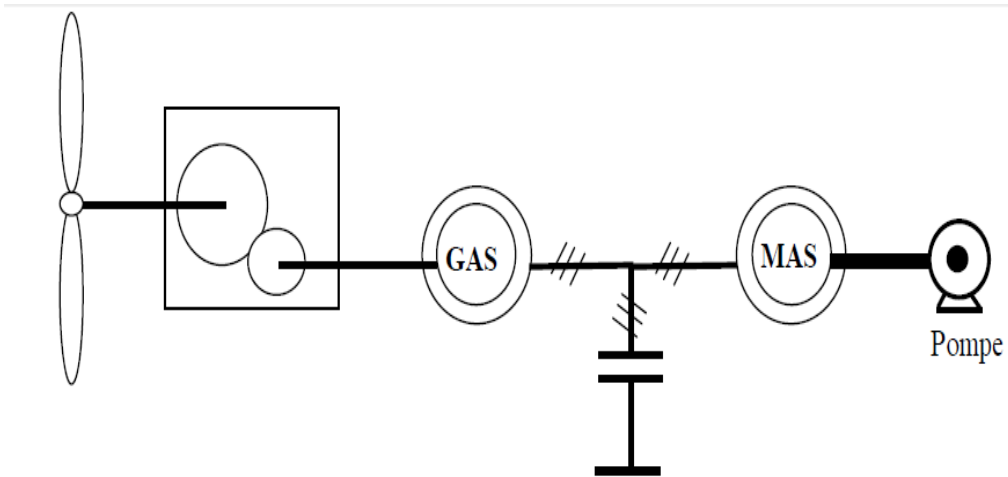
## I.7. Configuration des systèmes de pompes éoliens suivant le moteur d'entraînement

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande de caractéristiques très spécifiques.

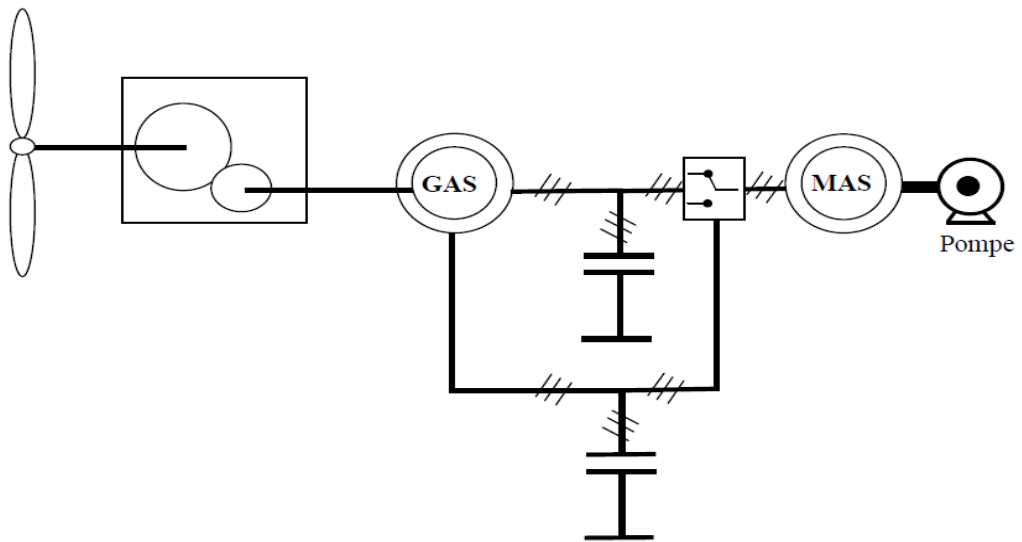
Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

### I.7.1. Machine asynchrone à cage (MAS)

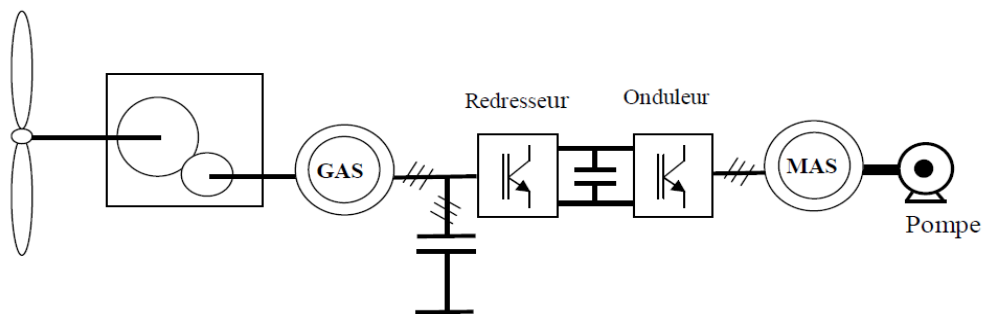
La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur, mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.



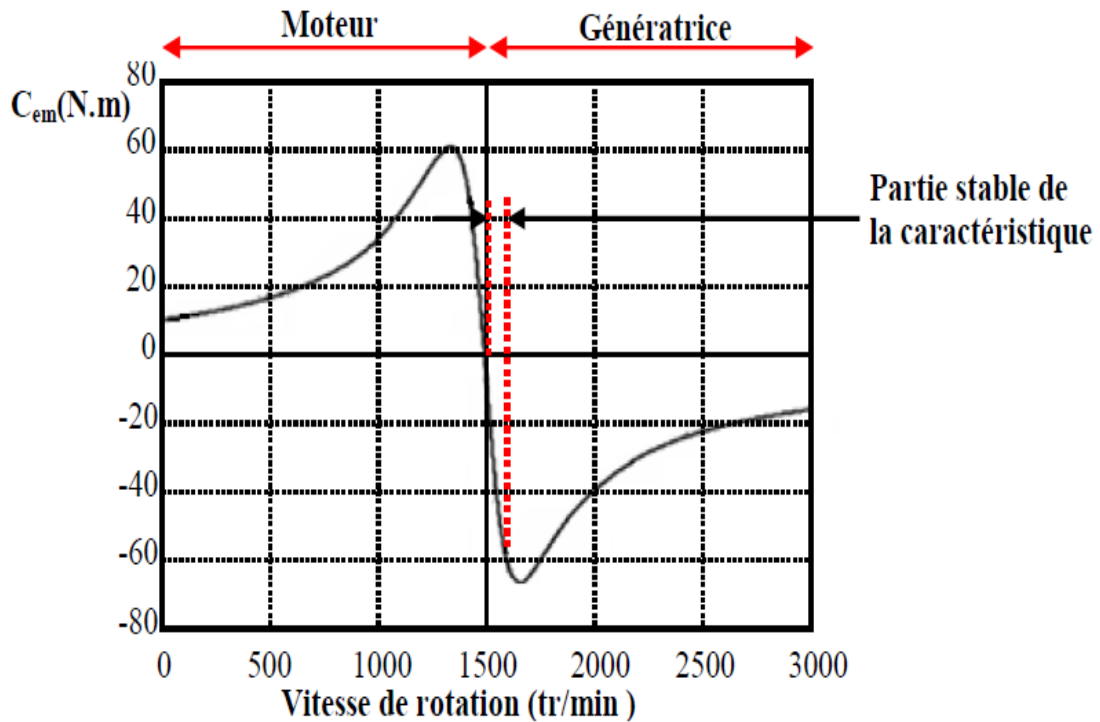
**Figure (I.7):** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).



**Figure (I.8):** Système éolien basée sur la machine asynchrone de type Dahlander à deux vitesses de rotation.



**Figure (I.9):** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.



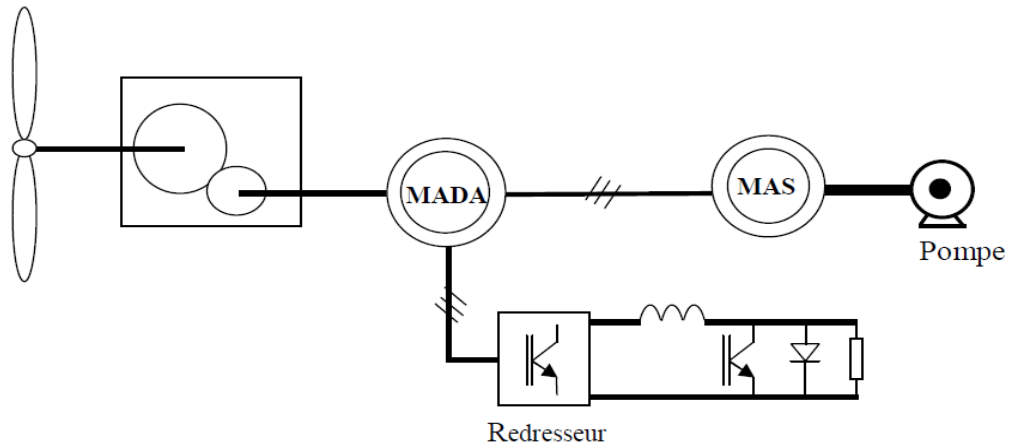
**Figure (I.10):** Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g = 0$ ),

- Si le nombre de paire de pôles fixe, la plage de vitesse est très limitée ( $g < 2\%$ ).
- La fréquence étant imposée par le réseau,
- Si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.
- La simplicité de la configuration permet de limiter la maintenance sur la machine.
- Des capacités sont indispensables pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine.

### I.7.2. Machine asynchrone double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation est une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles. Elle est d'une construction très simple, moins coûteuse et robuste et possède des avantages principaux tels qu'on peut contrôler les puissances générées autour d'un point de fonctionnement [13].

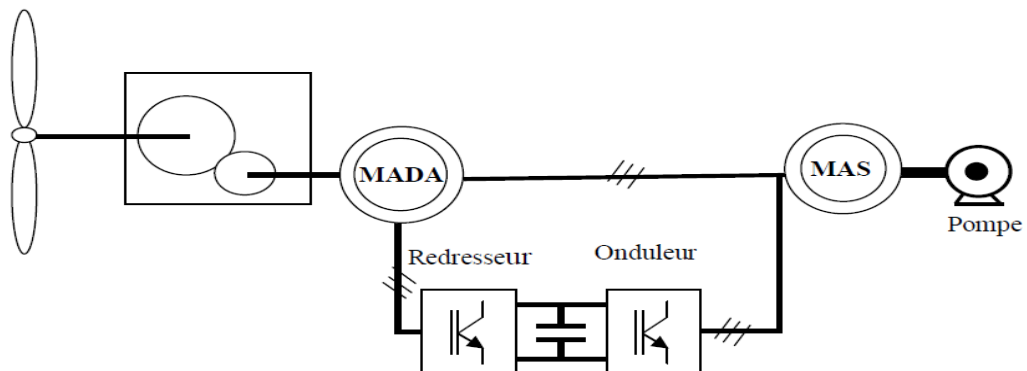


**Figure (I.11):** Système éolien basé sur la machine asynchrone à rotor bobiné – variation de la vitesse de rotation par réglage de la résistance du rotor.

Le rotor de la MADA comporte des enroulements bobinés à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disques en tôle empilés sur l'arbre de la machine est connecté à trois bagues isolées sur lesquelles frottent des balais en charbon. Par conséquent les tensions triphasées rotoriques du modèle ne sont plus nulles [11].

Généralement on utilise la double alimentation, le courant statorique  $I_s$  va créer un champ magnétique statorique qui tourne avec une vitesse de sens contraire par rapport au champ magnétique rotorique. Donc la machine peut fonctionner à une vitesse de double synchronisme [12].

En pratique, l'alimentation est toujours triphasée, le couplage est en étoile et les encoches découpées dans les tôles sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine pour minimiser les variations de réluctance liées à la position angulaire rotor/stator et certaines perturbations dues aux harmoniques.



**Figure (I.12):** Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation, régulation de la vitesse de rotation par la chaîne rotorique.

## **I.8. Configuration suivant le pompage utile**

Un deuxième volet des configurations des systèmes de pompage se base sur le choix de pompe utilisée, cette dernière peut être:

- ✓ centrifuge
- ✓ volumétrique

### **I.8.1. Pompe volumétrique**

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à refoulement.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse de moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale(HMT)et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier et que le débit est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes [16].

### **I.8.2. Pompe centrifuge**

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale(HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit.

La puissance consommée, proportionnelle à  $Q \cdot HMT$ , variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10-100mètres) [21].



### **I.9. Etat de l'art sur le système de pompage**

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais pour Maximum Power Point Tracking) [17-18]. Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore jouer sur la commande de la génératrice. La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance.

De tels systèmes incorporent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années.

Généralement pour commander soit une génératrice ou moteur dans un système éolien on utilise la commande vectorielle[15].

### **I.10. Conclusion**

Dans ce chapitre, une vue macroscopique des systèmes de conversion éolienne, ainsi que les différentes configurations ont été présentés. Ces dernières ont été subdivisées suivant le moteur d'entraînement et la pompe utilisée. Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation du système de conversion éolienne.

# Modélisation du système de conversion éolienne

## II.1. Introduction

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Les pales du rotor captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

Le système de pompage éolien en fonctionne au fil du vent (figure II.1). Il se compose d'une turbine éolienne permettant la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique; d'une génératrice à induction à cage dotée de condensateurs, d'un ensemble redresseur – onduleur de tension et un moteur à induction à cage entraînant une pompe centrifuge monocellulaire.

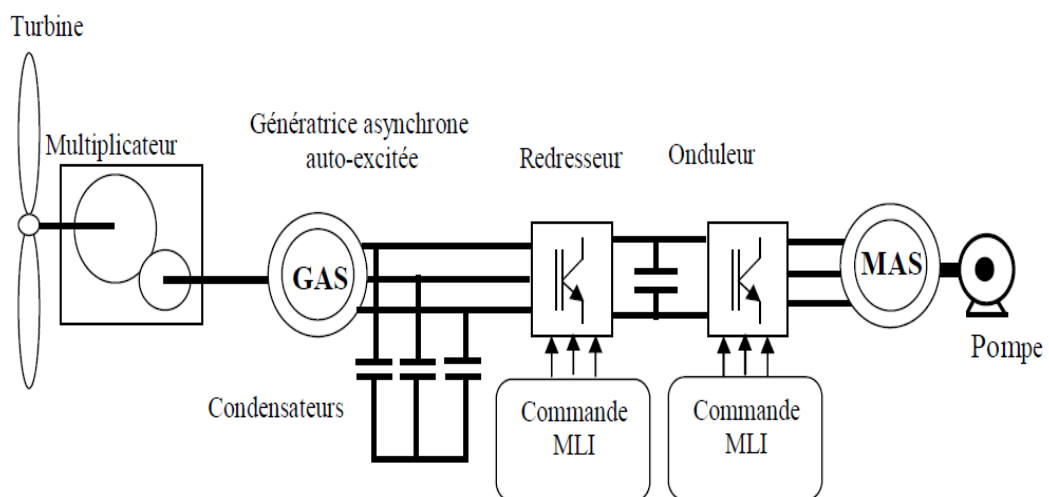


Figure II.1: Structure du système de pompage éolien étudié.

## II.2. Modélisation du système

### II.2.1. Caractéristiques et modélisation du vent

#### II.2.1.1. Le vent

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents. Un site avec des vents d'environ 30 km/h de moyenne sera environ huit fois plus productif qu'un autre site avec des vents de 15 km/h de moyenne. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents [1].

Un autre critère important pour le choix du site est la constance de la vitesse et de la direction du vent, autrement dit la turbulence du vent. En effet, en règle générale, les éoliennes sont utilisables quand la vitesse du vent est supérieure à une valeur comprise entre 10 et 20 km/h, sans toutefois atteindre des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne ou à la nécessité de la « débrayer » (pales en drapeau) pour en limiter l'usure. La vitesse du vent doit donc être comprise le plus souvent possible entre ces deux valeurs pour un fonctionnement optimal de l'éolienne. De même, l'axe de rotation de l'éolienne doit rester la majeure partie du temps parallèle à la direction du vent [2].

Même avec un système d'orientation de la nacelle performant, il est donc préférable d'avoir une direction de vent la plus stable possible pour obtenir un rendement optimal.

Certains sites proches de grands obstacles sont ainsi à proscrire car le vent y est trop turbulent (arbres, bâtiments, escarpements complexes, etc.).

De manière empirique, on trouve les sites propices à l'installation d'éoliennes en observant les arbres et la végétation. Les sites sont intéressants s'ils sont constamment courbés par les vents. Les implantations industrielles utilisent des cartes de la vitesse des vents des atlas éoliens (là où ils existent) ou des données accumulées par une station météorologique proche.

Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :

- L'effet Venturi : lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles comme deux montagnes ou deux grands bâtiments, il est accéléré par effet venturi. De même, lorsqu'il rencontre une colline, l'air est accéléré au niveau du sommet. Ces lieux sont donc très appropriés pour les éoliennes. Ils sont cependant le plus souvent de surface restreinte et peuvent être soumis à des turbulences si la forme des obstacles est irrégulière [11].
- La mer et les lacs sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents. La proximité d'une côte escarpée, en revanche, créera également des turbulences, usant prématurément certains composants mécaniques de l'éolienne.

### II.1.2. Caractéristiques de vent

L'exploitation efficace de l'énergie du vent est une tâche difficile. Comme pour toutes les sources d'énergie, la problématique du rendement d'exploitation est toujours mise en jeu, même si cette question s'avère spécifique dans le cas des énergies renouvelables dont le gisement est « gratuit » et durable contrairement aux sources d'énergie fossile.

Le vent est causé par le déplacement de la masse d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres parties, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. C'est pourquoi, le vent est une grandeur stochastique, intermittente qui dépend d'un ensemble de facteurs tels que la situation géographique, l'altitude, la température et la hauteur de captage [11].

Les caractéristiques du vent déterminent non seulement la quantité d'énergie qui s'applique à la turbine mais également les contraintes de fonctionnement (turbulences, valeurs extrémales,...) qui jouent aussi sur la durée de vie. En réalité, le vent est mesuré par un anémomètre complété par une girouette qui génère les grandeurs fondamentales que sont la vitesse et la direction. On utilise très souvent des distributions statistiques, telle que la distribution de Weibull, générées à partir de campagnes de mesures à long terme qui permettent d'offrir une vision cohérente de l'efficacité du gisement pour les études sur les aérogénérateurs [12].

Une caractéristique importante de la ressource de vent est sa variabilité ou intermittence. Le vent est en effet fortement variable, tant géographiquement que temporellement. En outre, cette variabilité est amplifiée par la relation cubique qui existe entre vent et puissance générée par la turbine éolienne. La représentation dynamique du gisement est ainsi une problématique à part entière.

### II.1.2.2. Modèle de vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a déjà fait l'objet de nombreux travaux [11], [12] et par conséquent, elle ne sera pas détaillée dans ce travail.

$$v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

$$v = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t) \quad (\text{II.2})$$

L'énergie cinétique du vent:

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot m v^2 \quad (\text{II.3})$$

La puissance du vent:

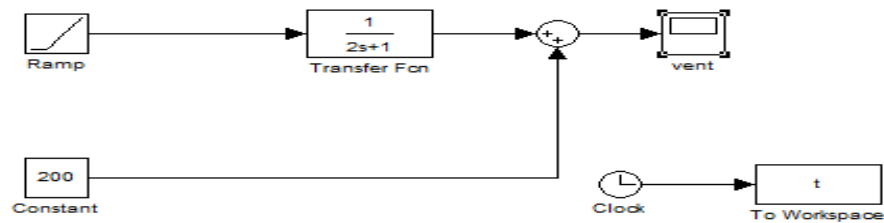
$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} = \frac{1}{2} \left( \frac{dm}{dt} \right) V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (\text{II.4})$$

tel que :  $V(t) = V_0 + V_T(t)$ :

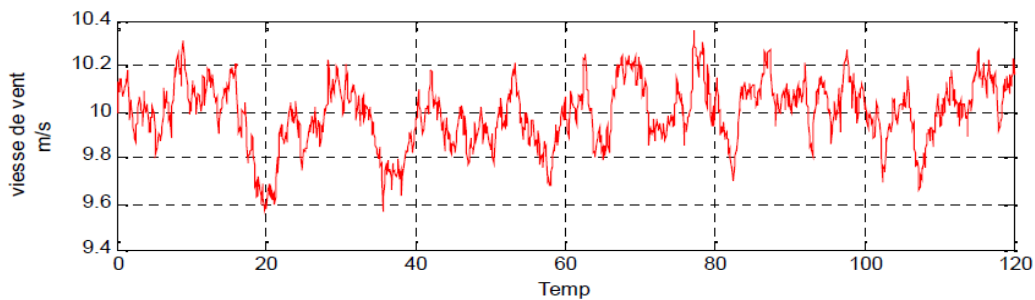
- ✓ Une composante turbulente du vent  $v(t)$  qui est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).

- ✓ Une composante lente  $V_0$ ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

La figure suivante (figure II. 2) représente le modèle de simulation de vent, tandis que la figure (II. 3) représente la vitesse du vent.



**Figure(II.2):** Modèle de simulation de vent.

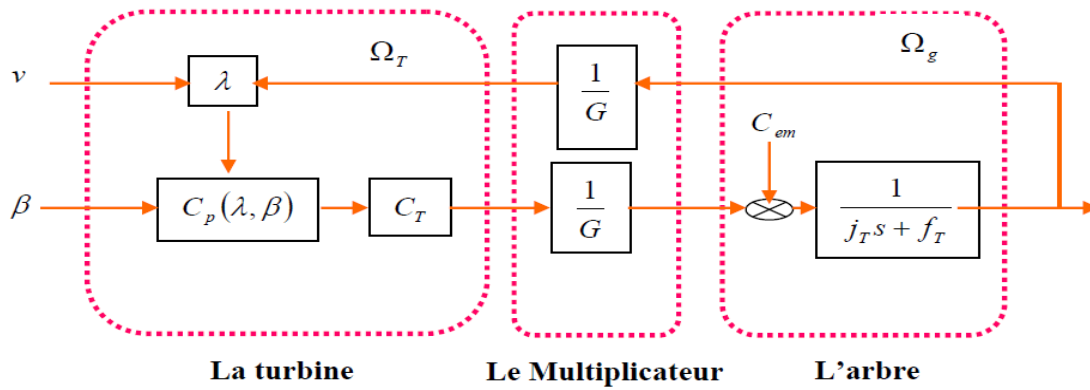


**Figure(II.3):** Vitesse du vent.

### II.2.2. Modèle de la turbine

La turbine éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement, passant par la section de la surface active  $S$  balayée par les pales de la turbine. La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \pi \mathcal{R}^2 v^2 \quad (\text{II.5})$$



**Figure (II.4):** Modèle de la turbine éolienne.

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité [14],[30]. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est fournie par la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_V \quad (\text{II.6})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59 % de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde.

De cette façon, le coefficient de puissance maximum théorique est défini par :

$$C_P^{opt} = \frac{C_P^{opt}}{P_V} = 2 \cdot \frac{P_{max}}{\rho S V_V^3} \quad (\text{II.7})$$

Ce rendement, appelé coefficient de puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure.

Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent par :

$$C_P = 2 \cdot \frac{P_{eol}}{\rho S V_V^3} \quad (\text{II.8})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite (spécifique) $\lambda$  qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent:

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

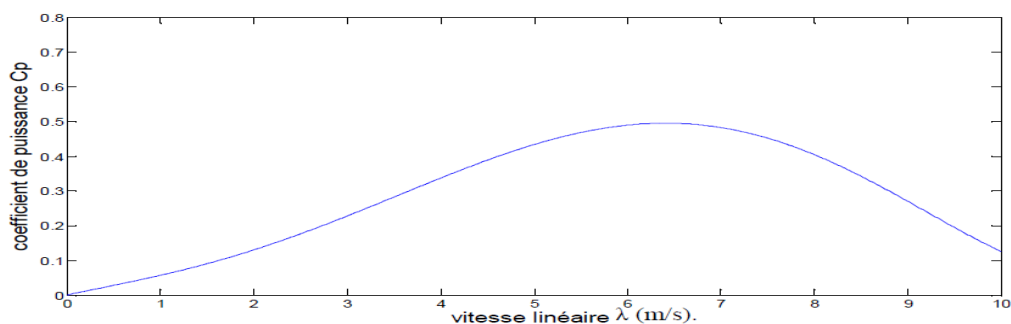
Selon la caractéristique propre de la voilure  $C_p(\lambda)$  de l'équation, la puissance éolienne est calculée ainsi :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_P(\lambda) \rho S V_V^3 \quad (\text{II.10})$$

L'équation analytique de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$ , pour une éolienne de petite puissance, choisie pour notre application, est donnée par:

$$C_p(\lambda) = 7.9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 - 9.86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9.41 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001 \quad (\text{II.11})$$

La figure (II.5) présente le tracé d'une telle caractéristique. Il apparaît un maximum de 0,495 pour une vitesse réduite de 6.8 m/s. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut essayer de conserver cette vitesse réduite en la modifiant avec la variation de la vitesse du vent:



**Figure (II.5):** Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle fixe).

A partir de cette puissance, le couple aérodynamique entrainant la génératrice, s'écrit comme suit:

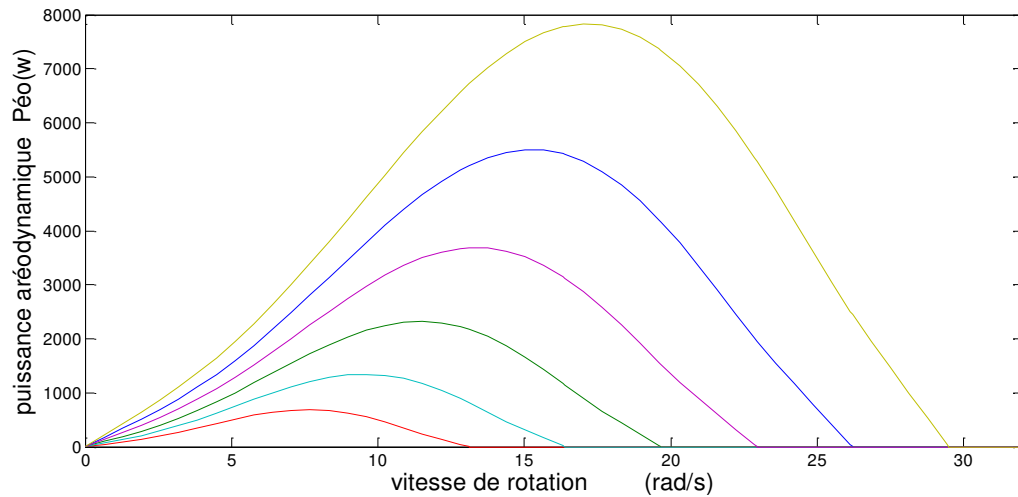
$$C_{eol} = P_{eol} / \Omega \quad (\text{II.12})$$



En remplaçant l'expression (II.9),(II.10) dans (II.12), on obtient:

$$C_{eol} = C_P(\lambda) \rho S R \mathcal{V}_v^2 \quad (\text{II.13})$$

La figure(II.6), représenté les réseaux de la caractéristique de la turbine utilisé, la puissance aérodynamique, comme fonction de vitesse de rotation.



**Figure (II.6):** Coefficient de la puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation.

### II.2.3. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et la génératrice. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés [11]. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles.

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du génératrice:

$$C_{em} = \left(\frac{1}{G}\right) C_T \quad (\text{II.13})$$

$G$ : le rapport de multiplicateur.

$C_{em}$ : le couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine.

(II.14)

$$\Omega_g = G. \Omega_T$$

$\Omega_g$ :vitesse de générateur.

#### II.2.4. Modèle de l'arbre de la machine

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par[11]:

$$J_T d \frac{\Omega_g}{dt} = C_T - f_T \Omega_g \quad (\text{II.15})$$

$J_T$ : inertie totale des partie tournantes(turbine +génératrice).

$f_T$ : coefficient de frottement.

$$C_T = C_{mec} + C_{em} \quad (\text{II.16})$$

$C_{em}$ : le couple électromagnétique.

$C_T$ : couple totale d'une éolienne.

#### II.2.5. Modélisation de la génératrice asynchrone auto-excité

En l'absence de réseau pilote, il est possible d'auto-exciter la génératrice asynchrone au moyen de condensateurs, mais l'amorçage et la protection contre les surtensions de résonance nécessitent une étude très soignée de l'installation.

Seul un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par des capacités directement connectées sur une charge permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées. De plus, un dispositif d'orientation des pales de l'éolienne est nécessaire afin de maintenir une vitesse de rotation et par conséquent une fréquence délivrée fixes[15].

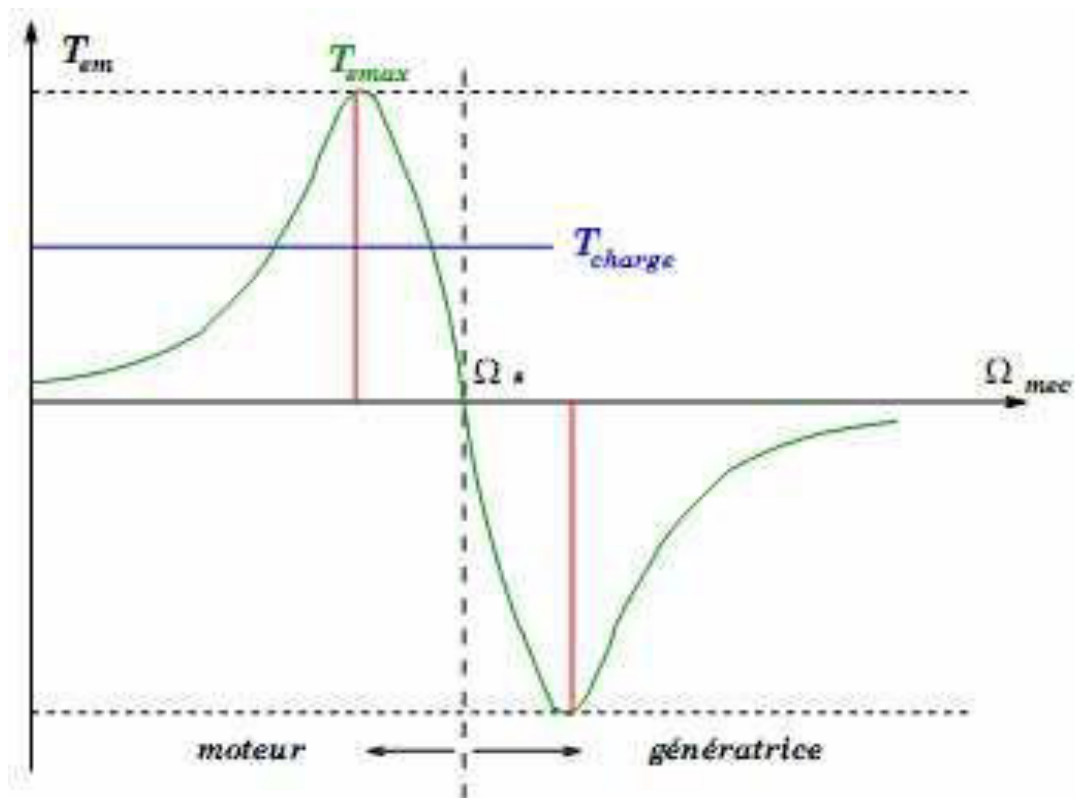
Dans un entraînement a vitesse fixe, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le

nombre de paire de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entraînant tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Dans la figure (II.7), on présente les caractéristiques couple-vitesse de la machine asynchrone.

Dans un fonctionnement autonome, on connecte aux bornes du stator un banc de condensateurs correctement dimensionnés, et on fait tourner le rotor de la machine à la vitesse nécessaire. La présence d'un flux magnétique rémanent dans le fer du rotor est indispensable pour l'auto-amorçage de la génératrice. Le condensateur fournit le courant d'excitation requis par la génératrice, et cette dernière charge le condensateur pour augmenter la tension de sortie [15].

### II.2.5.2.Principe de fonctionnement de la génératrice asynchrone

La génératrice asynchrone n'engendre pas sa propre énergie d'excitation contrairement à l'alternateur. Pour cette raison il faudra lui apporter cette énergie et stabiliser sa tension de sortie et sa fréquence.



**Figure (II.7):** Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone [11].

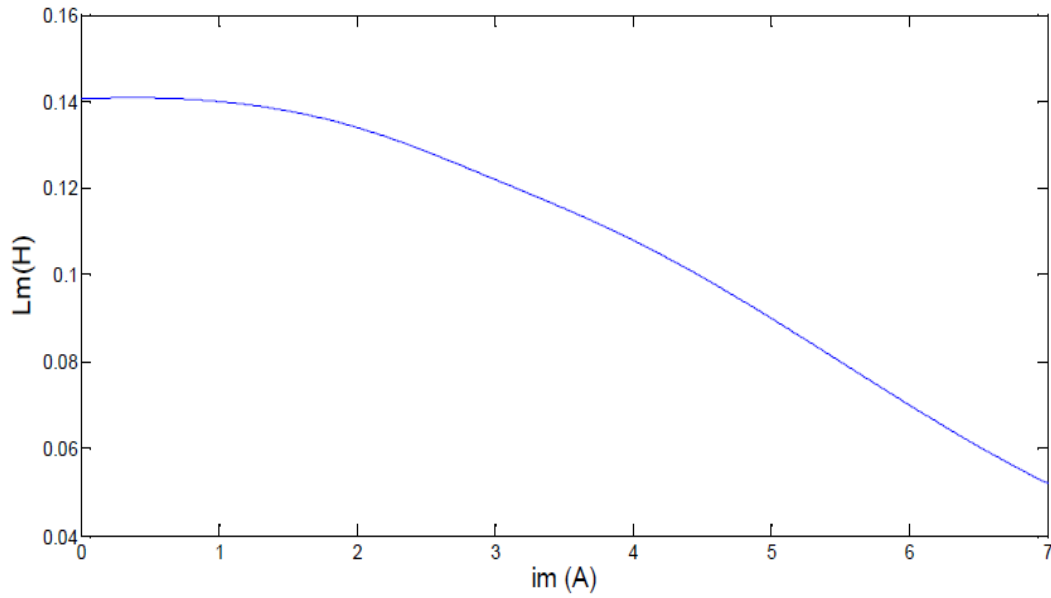
Dans un entrainement à vitesse fixe la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paire de pôles de la génératrice. Le couple mécanique entrainant tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau (Fig. II. 7). Par ailleurs, il lui fournit l'énergie réactive dont elle a besoin pour tous ses régimes de fonctionnement. Cette énergie est nécessaire à la création de son flux magnétique. Pour une génératrice standard a deux paires de pôles, la vitesse mécanique est le germent supérieure à la vitesse de synchronisme (1500tr /mn), ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la vitesse de la génératrice a celle du rotor de l'éolienne [1], [7], [11], [48].

### II.2.5.3. Modèle de la génératrice asynchrone auto-excité

Le modèle utilisé pour la simulation du fonctionnement de la génératrice asynchrone tient en compte l'effet de la saturation des matériaux. En effet, l'entrefer des machines à induction étant généralement faible. La non-linéarité des matériaux magnétiques a un effet non négligeable. Cet effet est difficile à appréhender dans le cas des modèles triphasés classiques. Par conséquent, on adopte généralement des modèles diphasés pour en tenir compte d'une manière globale. Cela suppose évidemment que l'induction est homogène dans la totalité de la structure. Dans notre approche, nous adoptons le modèle de Park de la machine asynchrone [15].

L'effet de la saturation est pris en compte par l'intermédiaire d'une inductance de magnétisation  $L_m$ . Cette dernière est approximée par un polynôme à 12 degrés en fonction du courant de magnétisation  $i_m$  (figure (II.8)).

$$\left\{ \begin{array}{l} L_m = f(|i_m|) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot |i_m|^j \\ L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|} = \frac{d}{d|i_m|} f(|i_m|) = \sum_{j=0}^n a_j \cdot |i_m|^{j-1} \end{array} \right. \quad (\text{II.17})$$



**Figure (II.8):** Inductance de magnétisation en fonction du courant de magnétisation.

Après quelques développements mathématiques, nous aboutissons alors au système matriciel suivant (II.18), définissant les équations de tension de la machine :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s l_s & 0 & -\omega_s l_m \\ \omega_s l_s & R_s & \omega_s l_m & 0 \\ -R_r & \omega_r l_r & R_r & -\omega_r (l_r + l_m) \\ -\omega_r l_r & R_r & \omega_r (l_r + l_m) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{md} \\ i_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_s & 0 & l_m + l'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & l'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & l_s & l'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} & l_m + l'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \\ -l_r & 0 & l_r + L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} & l'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} \\ 0 & -l_r & l'_m \frac{i_{md} i_{mq}}{|i_m|} & l_r + L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{md}}{dt} \\ \frac{di_{mq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (II.18)$$

Avec :

$$\begin{cases} imd = isd + ird \\ imq = isq + irq \end{cases} \quad (II.19)$$

$$im = \sqrt{imd^2 + imq^2} \quad (II.20)$$

### II.2.5.3. Equation d'auto-excité

Pour exciter la génératrice on utilise les condensateurs comme source d'énergie réactive. Alors les équations d'auto-excitation sont des équations de tension aux bornes du condensateur :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -isd \\ -isq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

C: la valeur de capacité d'auto-amorçage.

En charge, les équations deviennent comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{c} & 0 \\ 0 & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -isd & -ichd \\ -isq & -ichq \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ -\omega & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

### II.3. Conclusion

L'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée dans un système éolien doit prendre en considération les limites de fonctionnement observées. Celles-ci concernent également les variations des tensions et de la fréquence lors des impacts de charge et des éventuels écarts de vitesse dus à l'imprécision du dispositif d'orientation des pales de l'éolienne. Les risques de démagnétisation en cas de surcharge de la machine sont également à prendre en compte car ils nécessitent une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de démagnétiser la machine. Le principe de la machine asynchrone auto-excitée peut cependant être amélioré grâce à un dispositif d'électronique de puissance. Toutefois, l'avantage de la simplicité est alors perdu et il semble préférable de se tourner vers une autre structure.

# Résultats de simulation

## III.1. Introduction

Le modèle global établi précédemment va nous permettre d'avoir un bilan des performances et des limites d'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée dans l'optique de l'utilisation de celle-ci dans un système éolien autonome. Les essais que nous avons réalisés consistent à valider le modèle de la génératrice asynchrone autonome.

## III.2. Génératrice asynchrone auto-excitée fonctionnant à vide:

La figure (III. 1) représente le schéma de principe du fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone.

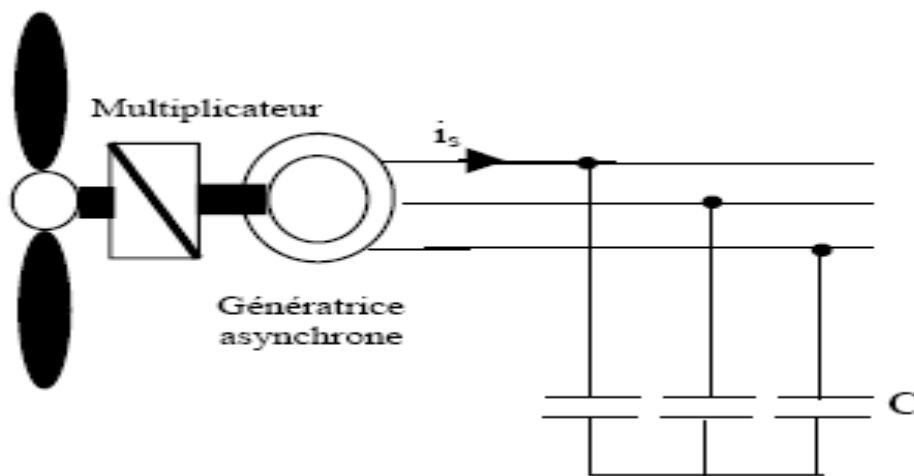
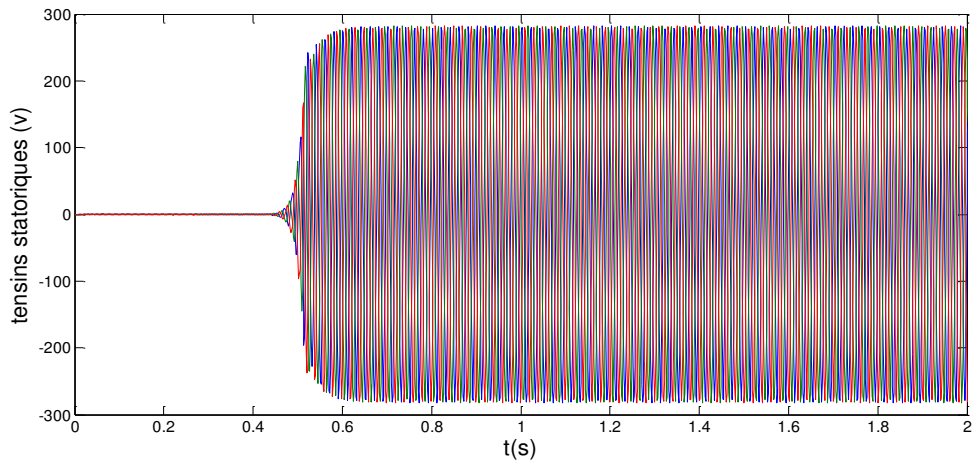
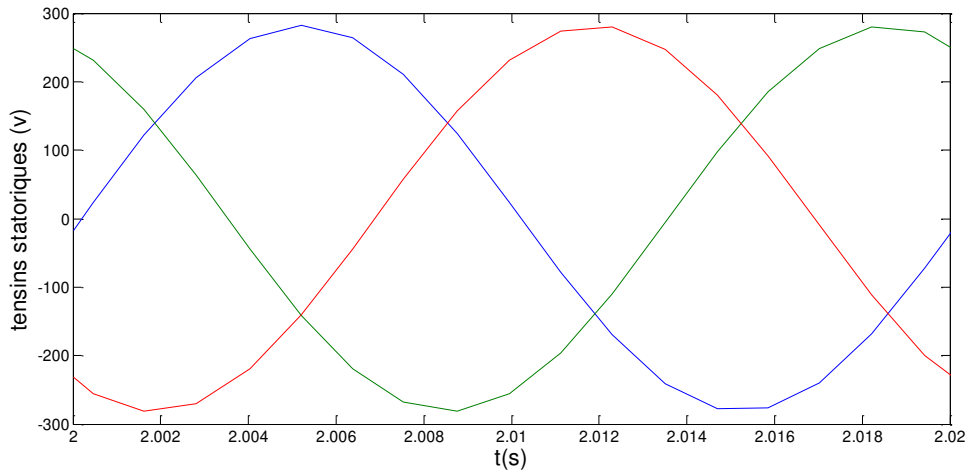


Figure (III. 1): Schéma de principe.

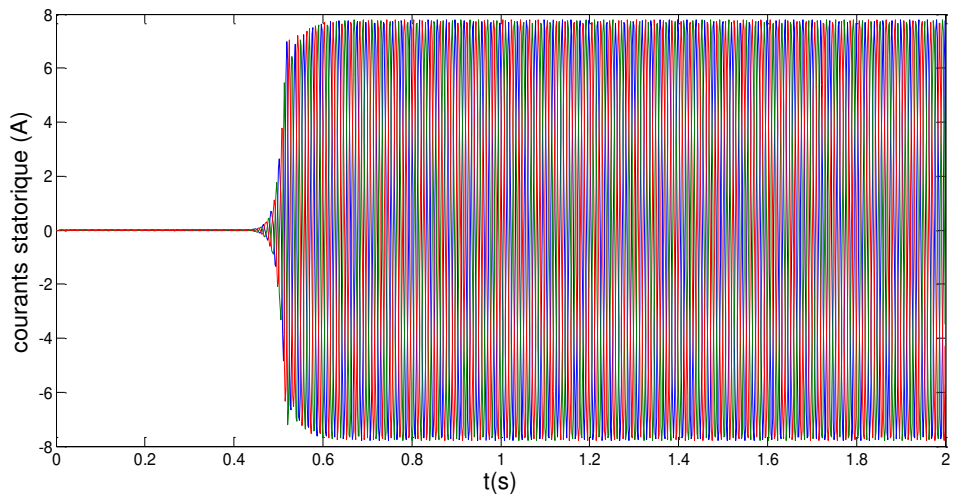
Les figures (III. 2) et (III. 4) représentent respectivement l'évolution de la tension et le courant statoriques en fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone. Au démarrage, la tension et le courant générés croissent de façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 220 V et à 4.2A en régimes totalement établis à  $t=0.77s$ , et c'est l'instant où le courant de magnétisation atteint son régime saturé.



**Figure(III .2):** Tension statorique à vide.

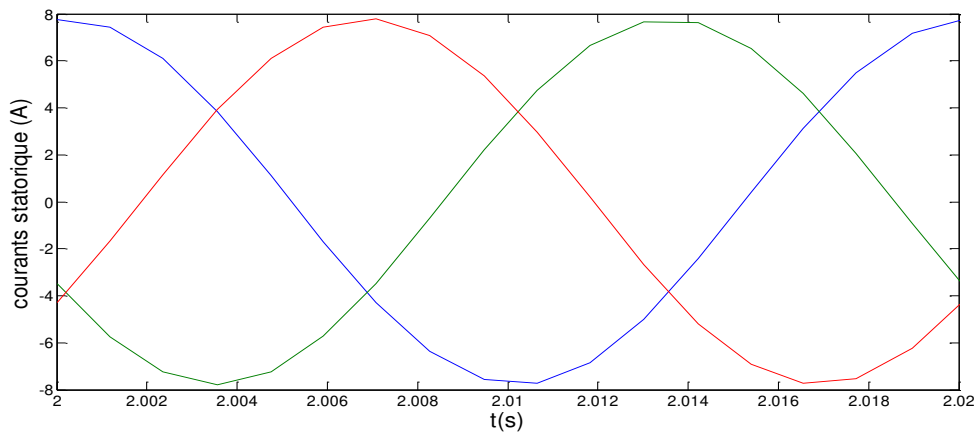


**Figure (III. 3):** Zoom de la tension statorique à vide.



**Figure (III. 4):** Courant de ligne statorique à vide.

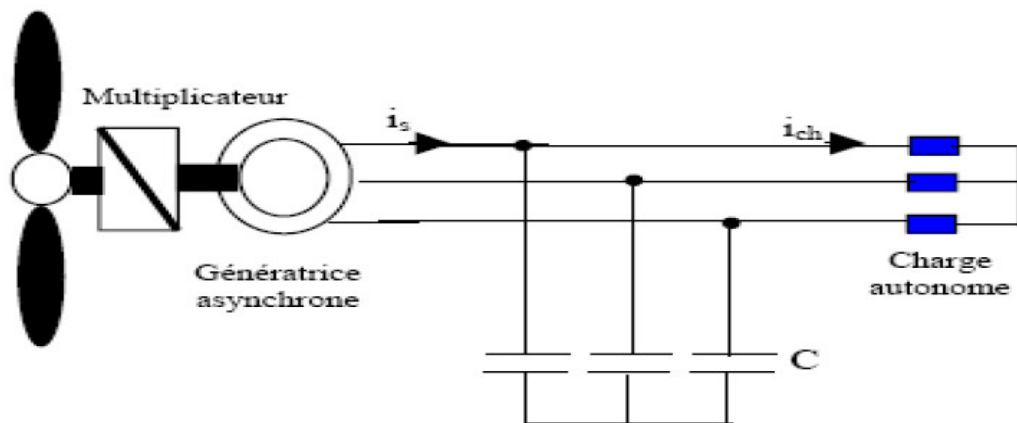




**Figure (III. 5):** Zoom du courant de ligne statorique à vide.

### III.3. Génératrice asynchrone auto-excitée fonctionnant en charge

La figure (III. 6) représente le schéma de principe du fonctionnement en charge de la génératrice asynchrone.

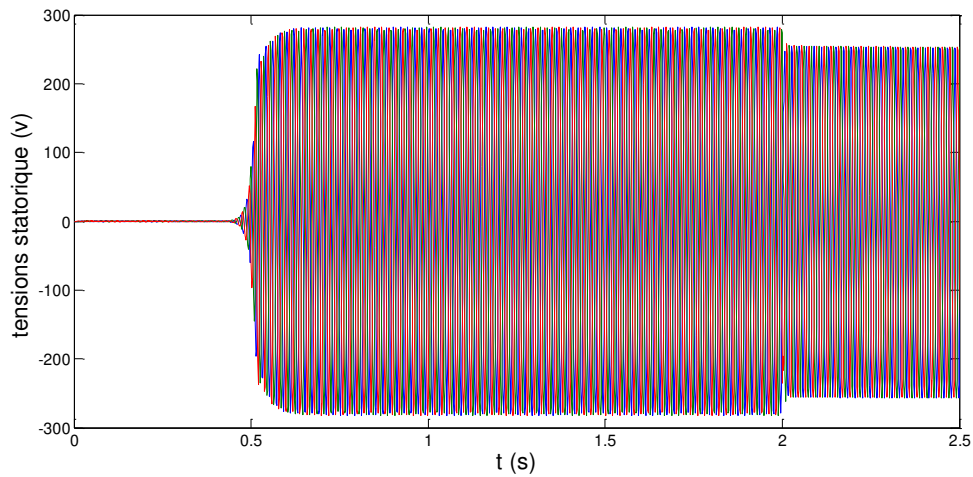


**Figure (III.6):**Schéma de principe

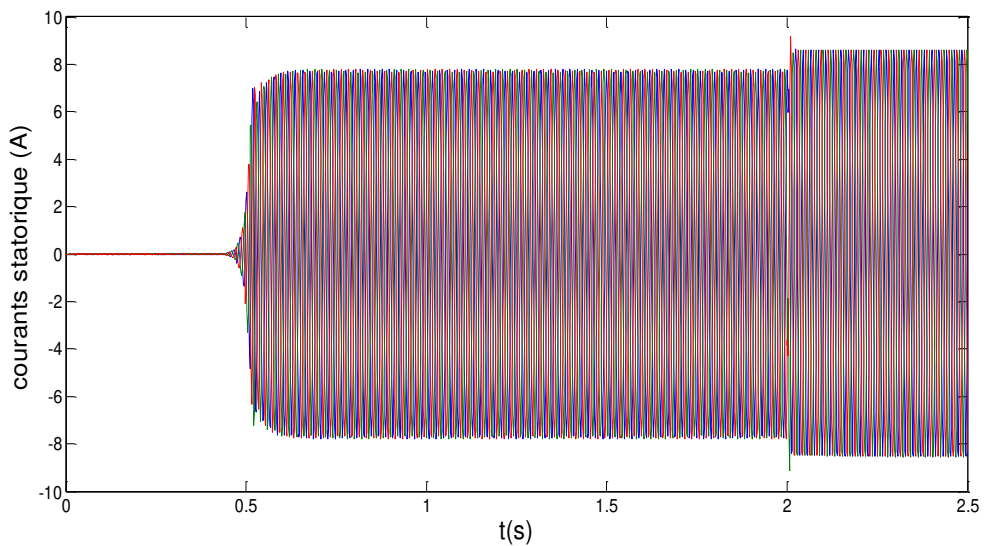
A l'instant  $t = 2$  s, on branche brusquement une charge résistive aux bornes de la génératrice auto-excitée. La tension diminue à l'instant d'introduction de la charge (figure III.7), tandis que le courant de ligne (figure III.8) augmente pour fournir le courant de charge (figure III.9). Le courant de la charge fait diminuer le courant magnétique résultant, comme il peut être remarqué sur la figure III.10.

L'insertion de la charge engendre des diminutions au niveau de l'ensemble des caractéristiques de la génératrice asynchrone par rapport à celles observées en

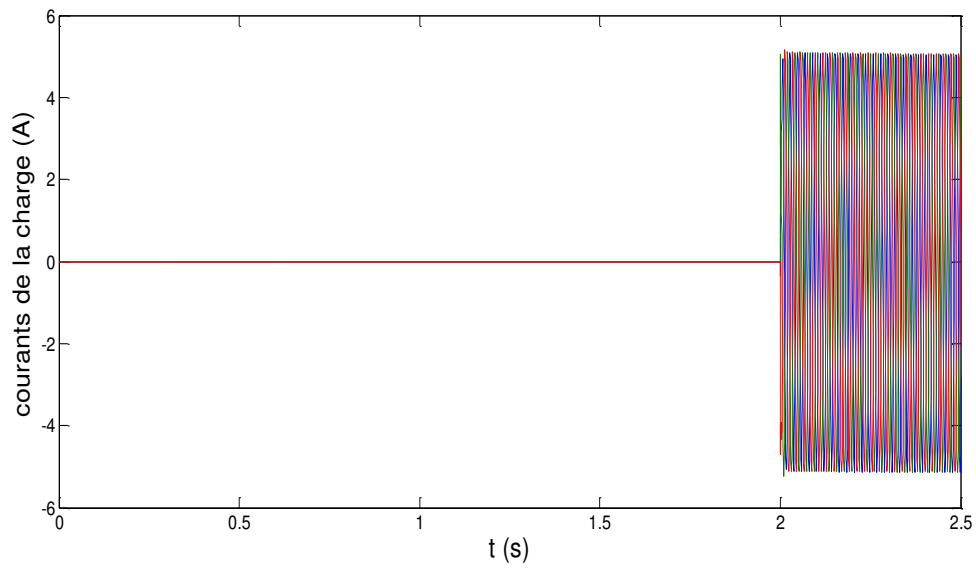
fonctionnement à vide. Cela est du essentiellement à la démagnétisation de la machine et au manque d'énergie réactive nécessaire d'une part pour la magnétisation de la machine et d'autre part pour alimenter la charge, en particulier celle inductive qui est consommatrice de l'énergie réactive, et c'est aux condensateurs d'excitation de satisfaire et de partager l'énergie qu'ils produisent entre les deux consommatrices de la puissance réactive.



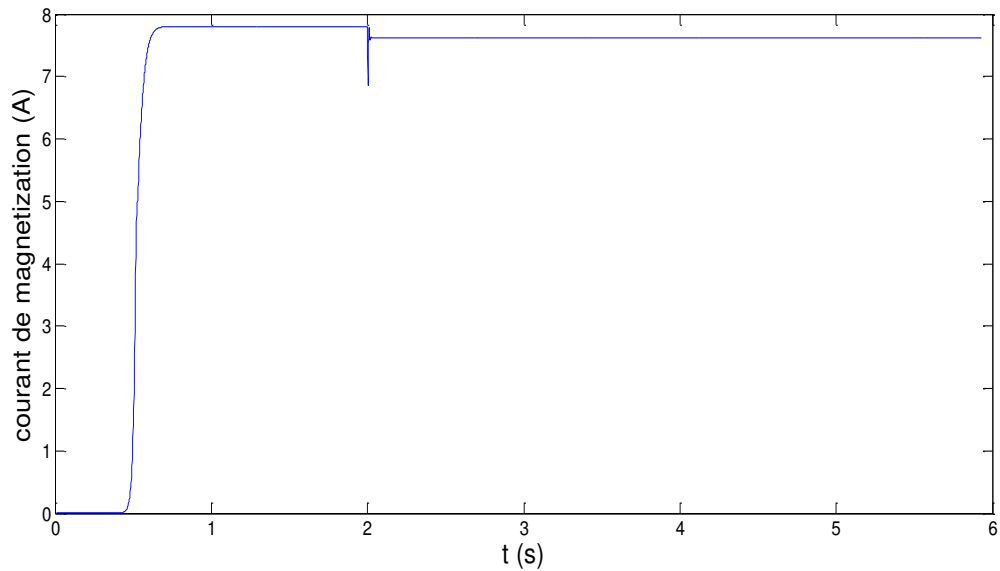
**Figure (III.7):** Allure des tensions statoriques.



**Figure (III.8):** Allure des courants de ligne.



**Figure (III.9):** Allure des courants charge.



**Figure (III.10):** Allure du courant de magnétisation.

#### III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons observés les allures des courants et tensions statoriques d'une génératrice asynchrone soit en fonctionnement à vide ou en charge. La génératrice asynchrone a montrée son efficacité pour un fonctionnement sur une charge résistive.

Généralement la génératrice asynchrone est utilisée pour les grandes éoliennes (pour les grandes puissances).

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne un système de conversion éolienne basé sur une génératrice asynchrone auto-excitée. Beaucoup d'aspects importants et intéressants sur cette génératrice ont été discutés et présentés.

Dans le premier chapitre, on a rappelé les concepts fondamentaux de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Nous avons développé dans le deuxième chapitre une modélisation consistant à établir un bilan des performances de la génératrice asynchrone auto-excitée. L'inconvénient majeur de l'utilisation de la machine asynchrone auto-excitée dans un système éolien est que ces grandeurs statoriques sont directement influencées par la charge, la vitesse et les capacités d'excitation.

Dans le troisième chapitre, nous avons observés les allures des courants et tensions statoriques d'une génératrice asynchrone soit en fonctionnement à vide ou en charge. La génératrice asynchrone a montrée son efficacité pour un fonctionnement sur une charge résistive. Généralement la génératrice asynchrone est utilisée pour les grandes éoliennes (pour les grandes puissances).

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de la chaîne de conversion éolienne. Parmi les perspectives envisageables:

- ✓ Interactions avec les autres génératrices du réseau.
- ✓ Intégration éventuelle d'un système de stockage et optimisation technique et économique de la chaîne de conversion.
- ✓ Réactions du réseau vis à vis de l'intermittence et l'irrégularité de la production de l'énergie.

## Bibliographiques

- [1] G. Cuntly ; "Eoliennes et aérogénérateur, guide de l'enneiger éolienne.", Edisud-2011, pp, 11-13.
- [2] A. Davigny ; "Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie", Thèse de doctorat de l'université des sciences technologies de Lille, France, 2007.
- [3] [www.mem-algeria.org](http://www.mem-algeria.org), consulté le 01/03/2011.
- [4] P.W. Carlin; "The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology ", NREL/TP-500-28607, February 2001.
- [5] O. Gergaud ; " Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Docteur de l'école Normale Supérieure de Cachan 2002.
- [6] [www.neal-dz.net](http://www.neal-dz.net), consulté le 01/03/2011.
- [7] B. Multon ; " Production d'énergie électrique par sources renouvelables", Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [8] A.Tounzi ; "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.
- [9] E.Hau; "Wind-turbines, Fundamentals, technologies, application, economics, "Editions Springer, 2000.
- [10] J.M. Jonkman, "Modeling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST\_AD ", Technical Report, National Renewable Energy Laboratory, USA 2003.
- [11] S. El Aimani, "Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension", Thèse de Doctorat de L'Université des Sciences et Technologies de Lille1 (USTL).
- [12] Thomas Ackermann, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.

## Bibliographiques

---

- [13] Jean Chatelain, Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X, Presse Polytechniques romandes, édition Georgi, 1983.
- [14] Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.
- [15] Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003
- [16] Matlab-Simulink, Version 7.0.
- [17] H. Amimeur, "Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement", mémoire de magister, université de Batna, Algérie 2008.
- [18] A. L. Nemmour, "Contribution à la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation", mémoire de magister, université de Batna, Algérie 2002.
- [19] A. Massoum, M. K. Fellah, A. Meroufel and A. Bendaoud, "Input output linearization and sliding mode control of a permanent magnet synchronous machine fed by a three levels inverter", Journal of Electrical Engineering, Vol. 57, No. 4, pp. 205-210, 2006.
- [20] R. Abdessemed, A. L. Nemmour and V. F. Tomachevitch, "Cascade sliding mode control of a stator field oriented double fed induction motor drive", Archives of Electrical Engineering, Vol. LI, No. 4, pp. 371-387, 2002.
- [21] M. R. Fbarzadeh, G. Faezian, H. Tabatabaei and N.Sargolzael, "A New Variable Structure Control Methodology for Electrical/Mechanical Parameter Estimation of Induction Motor", Proceedings of the American Control Conference, Denver, Colorado 2003.
- [22] B. Boukezzar and M. M'Saad, "Robust sliding mode control of a DFIG variable speed wind turbine for power production optimization", 16th Mediterranean Conference on Control and Automation Congress Centre, Ajaccio, France, pp. 795-800, June 2008.
- [23] D. T. H. Tham and D. H. Nghia, "Sliding mode control of induction motor", International Symposium on Electrical & Electronics Engineering 2007, HCM City, Vietnam, pp. 42-47, October 2007.

- [24] D. Lee, G. M. Lee and K. D. Lee, "DC-Bus Voltage Control of Three Phase AC/DCPWM Converters using feedback linearization", IEEE/IAS Trans. On industry applications, Vol. 36, No. 03, May/June, 2000.
- [25] A. Bellini, G. Figalli and F. Tosti, "Linearized model of induction motor drives via non linear state feedback decoupling", EPE, Firenze, Vol. 03, pp. 36-41, 1991.
- [26] A. Mullane, G. Lightbody and R. Yacamini, "Comparison of a Cascade and Feedback Linearisation Scheme for DC Link Voltage Control in a Grid Connected Wind Turbine", Rev. Energ. Ren. Power Engineering, pp. 29-38, 2001.
- [27] A. F. Payam, B. M. Dehkordi and M. Moallem, "Adaptive Input-Output Feedback Linearization Controller for Doubly-Fed Induction Machine Drive", ACEMP'07 Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, Bodrum, Turkey, pp. 830-835, Sep. 2007.
- [28] A. Daoud, " Maximum power point Tracking techniques for Solari water pumping system Revue des Energies Renouvelables 2010, Vol. 13, N°3, pp. 497 – 507.
- [29] Guy Starters Eddie Smig el, " Modélisation et commande des moteurs triphasés "Ellipses édition marketing S.A. 2000.
- [30] Site Internet " L'éolien, un gisement d'énergie renouvelable exploitable en Ile- de France "Agence Régionale de l'environnement et de nouvelles énergies,  
<http://www.areneidf.org>
- [31] J.W. Smith ; " Interconnection studies for wind generation ", conference papers IEEE2004, paper N° 04, pp. 3-8.
- [32] R. Ramakumar ;" Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas ", IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June, pp6-12, 2004.
- [33] R. Ramakumar ; " Distributed generation and renewable energy systems ", 2002 37<sup>th</sup> intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002 paper N° 20027, pp. 716-724.



**A- Profile de vent**

$$V(t)=(10+0.5\sin((0.2\pi/10)t)+0.5\sin(\pi/10)t-0.75((\sin 2\pi/10)t$$

**B- Paramètre de turbine éolienne**

Rayon Pale :  $R = 2.5\text{m}$

Coefficient de puissance maximale :  $C_{P\max} = 0.4950$

Ratio de vitesse optimal :  $\lambda = 6.41$

**C- Paramètres de la génératrice asynchrone: [64]**

Puissance nominale :  $P_n = 5000 \text{ W}$ .

Tension nominale :  $V_S = 220\text{V}$ .

Inductance propre cyclique statorique :  $L_S = 0.115\text{H}$ .

Inductance propre cyclique rotorique :  $L_r = 0.115\text{H}$ .

Résistance statorique  $R_S = 1.8 \text{ } \Omega$ .

Résistance rotorique  $R_r = 1.2 \text{ } \Omega$ .

Coefficient de frottement :  $f = 0.06 \text{ N.m.s/rad}$ .

Inertie :  $J = 0.2 \text{ N.m}$ .

Condensateur d'auto-amorçage:  $C = 44\mu\text{F}$

**D- Bus continu**

La capacité :  $C = 1000\mu\text{F}$ .