

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU

Faculté de Génie électrique et informatique

Département d'électrotechnique



## Mémoire de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en électrotechnique  
Option : Réseaux électriques

Thème :

ÉTUDE ET SIMULATION D'UNE  
CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE  
ÉOLIENNE

Proposé et Dirigé par :

Mr: OTMANE-CHERIF TAHAR

Réalisé par :

Mr: LAKROUZ Madjid

Mr :SADI Tarik

2010/2011

# REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans le cadre de ce mémoire a été réalisé au département d'électrotechnique de l'université mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Nous exprimons notre profonde gratitude à monsieur **OTMAN-CHERIF Tahar**, pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, nous orienter et de nous conseiller tout au long de la réalisation de ce travail ainsi pour la confiance qu'il nous a accordé.

Nous remercions vivement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'être rapporteurs de notre mémoire.

Des remerciements vont également à tous ceux qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail

Nos vifs remerciements à tous nos enseignants du primaire à l'université, ainsi que les électrotechniciens de la promotion 2011.

Nous tenons à remercier toutes personnes qui nous ont aidés dans notre cursus.

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes très chers parents et ma grande famille.*

*A mes très chers frères et mes sœurs.*

*A tous mes amis.*

*A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.*

*A tous ceux pour qui je compte et qui comptent pour  
moi*

*A tous mes collègues de la promotion 2011.*

*A vous.*

# Sommaire

## NOMENCLATURE

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliennes.....</b>	<b>3</b>
I-1.Introduction .....	3
I-2.L'énergie éolienne .....	4
I-2-1.définition de l'énergie éolienne .....	4
I-2-2.les principaux composants d'une éolienne .....	4
I-2-3.emplacement des parcs éoliens.....	6
I-2-4.taille des aérogénérateurs .....	6
I-3.conception mécanique des éoliennes .....	7
I-3-1.éolienne à axe verticale .....	7
I-3-2.éolienne à axe horizontale.....	9
I-4.principe de fonctionnement d'une éolienne .....	11
I-4-1.bilan des forces sur une pale .....	11
I-4-2.système à décrochage aérodynamique.....	11
I-4-3.système d'orientation des pales .....	12
I-5.conversion de l'énergie cinétique de vent en énergie mécanique .....	13
I-5-1.énergie cinétique du vent .....	14
I-5-2.limite de betz/formule de betz .....	14
I.5.4. Production d'énergie mécanique .....	15
I-5-3.le coefficient de puissance.....	17
I-6.conversion mécanique⇒ électrique.....	18
I-6-1.conversion mécanique ⇒ électrique sans et avec multiplicateur.....	18
I-6-2.les différentes machines utilisées pour cette conversion .....	20
I-6-2-1.système utilisant la machine à courant continu .....	20

I-6-2-2.système utilisant la machine asynchrone .....	20
a)machine asynchrone à cage d'écureuil.....	20
b) machine asynchrone à double alimentation (MADA) .....	22
c) Machine asynchrone à rotor bobiné.....	23
I-6-2-3.système utilisant la machine synchrone.....	24
a) Machine synchrone à aimants permanents discoïde .....	24
b) Machine synchrone vernier à aimants .....	25
c) Alternateur synchrone à rotor bobiné où à aimants.....	27
I-7.stockage d'énergie .....	28
I-7-1.stockage à court terme .....	28
I-7-2.stockage à long terme .....	28
I-8.conclusion.....	<b>29</b>
<b>Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone .....</b>	<b>30</b>
II-1.introduction .....	30
II.2.constitution et principe de fonctionnement de la machine asynchrone .....	31
II.3. Modélisation de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire .....	32
II.3.1. Hypothèses simplificatrices.....	32
II.3.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire.....	34
II.3.2.1 Equations générales de la machine .....	34
a) Equations des tensions.....	34
b) Equations des flux .....	35
II.3.2.2. Modèle diphasé « modèle de Park » de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire .....	36
a) Transformation de Park.....	37
b) Application aux équations des tensions .....	39
c) Application aux équations des flux.....	40
II.3.2.3 Choix du référentiel.....	41
a) Equations des tensions .....	41

b) Equations des flux.....	42
• Référentiel lié au stator.....	42
• Référentiel lié au rotor.....	42
• Référentiel lié au synchronisme .....	42
II.3.2.4. expressions des puissances et du Couple électromagnétique .....	43
II.5. Conclusion.....	<b>44</b>
<b>Chapitre III : simulation de la chaine de conversion .....</b>	<b>45</b>
III-1.introduction.....	45
III.2. Outil de simulation MATLAB/SIMULINK .....	45
III.2.1. MATLAB .....	45
III.2.2.Présentation de SIMULINK.....	45
III.3. Modèle d'éolienne avec Machine Asynchrone .....	46
III-3-1.Partie mécanique .....	47
III.3.1.1 Modèle de la Turbine .....	47
III.3.1.2.Modèle de multiplicateur .....	52
III.3.1.3. Modèle de l'arbre.....	53
III.3.2 Partie Électrique .....	54
III.4.Conclusion .....	<b>62</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>63</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	

N°	Symbole	Signification	Unité
01	$\vec{F}_{ax}$	Composante de la force axiale sur la pale	/
02	$\vec{F}_{rot}$	Composante de la force directionnelle	/
03	$\vec{V}_{res}$	Composante de la force du vent sur la pale	/
04	$\vec{V}_{rot}$	Composante du vent due à la rotation de la turbine	/
05	$\vec{V}$	Composante de la vitesse du vent face à la pale	/
06	[Ir]	Matrice des courants rotoriques	/
07	[Is]	Matrice des courants statoriques	/
08	[Rss]	Matrice des résistances statoriques	/
09	[Rrr]	Matrice des résistances rotoriques	/
10	[Vr]	Matrice des tensions rotoriques	/
11	[Vs]	Matrice des tensions statoriques	/
12	$[\Phi_r]$	Matrice des flux rotoriques	/
13	$[\Phi_s]$	Matrice des flux statoriques	/
14	ids	Courant statorique dans l'axe d	A
15	iqs	Courant statorique dans l'axe q	A
16	Cem	Couple électromagnétique	N.m
17	Cmec	Couple mécanique	N.m
18	Cp	Coefficient de puissance	/
19	Cr	Couple résistant	N.m
20	D	Diamètre des pales	M
21	f	Fréquence	Hz
22	F	Frottement	/
23	g	Glissement	/
24	Io	Courant homopolaire	A
25	Id	Courant direct	A
26	Iq	Courant inverse	A
27	J	Inertie	Kg. M2
28	lr	Inductance propre rotorique	H
29	ls	Inductance propre statorique	H
30	Lr	Inductance cyclique rotorique	H
31	Ls	Inductance cyclique statorique	H
32	m	Masse d'air	Kg
33	M	Inductance cyclique mutuelle	H
34	Mr	Inductance mutuelle entre phases rotoriques	H
35	Mrs	Maximum de l'inductance mutuelle entre phase statorique et celle correspondante au rotor	H
36	Ms	Inductance mutuelle entre phases statoriques	H
37	Msr	Maximum de l'inductance mutuelle entre phase statorique et celle correspondante au rotor	H
38	Nr	Nombre de spires de bobinages rotoriques	/
39	Ns	Nombre de spires de bobinages statoriques	/
40	P	Nombre de paire de pôles	/
41	P(θ)	Transformé de Park	/
42	P(θ) <sup>-1</sup>	Transformé inverse de Park	/

43	$P_{mec}$	Pertes mécaniques	W
44	$P_t$	Puissance mécanique de la turbine	W
45	$P_{mg}$	Puissance disponible sur l'arbre de la génératrice	N.m
46	$P_{mt}$	Puissance mécanique théorique	W
47	$P_n$	Puissance nominale	W
48	R	Rayon des pales	m
49	$R_r$	Résistance rotorique	$\Omega$
50	$R_s$	Résistance statorique	$\Omega$
51	S	Surface des pales	m <sup>2</sup>
52	$\beta$	Angle de calage des pales	Degré
53	$T_s$	Constante de temps statorique	s
54	$T_r$	Constante de temps rotorique	s
55	$U_n$	Un Tension nominale	V
56	$V_1$	Vitesse de vent en amont	m/s
57	$V_2$	Vitesse de vent en aval	m/s
58	$\omega_{mec}$	Pulsation mécanique	rad/s
59	$\omega_s$	Pulsation statorique	rad/s
60	$\theta_r$	Angle entre deux phases rotoriques	rad
61	$\theta_s$	Angle entre deux phases statoriques	rad
62	$\lambda$	Vitesse spécifique	/
63	$\lambda_{opt}$	Vitesse spécifique optimale	/
64	$\rho$	Densité volumique de l'air	Kg/m <sup>3</sup>
65	$\sigma$	Coefficient de dispersion	/
66	$\phi_r$	Flux rotorique	Wb
67	$\phi_s$	Flux statorique	Wb
68	$\Omega_1$	Vitesse de rotation avant le multiplicateur	rad/s
69	$\Omega_2$	Vitesse de rotation après le multiplicateur	rad/s
70	$\Omega_{opt}$	Vitesse de rotation optimale	rad/s
71	$\omega_r$	Pulsation rotorique	rad/s
72	[L <sub>ss</sub> ]	Matrice inductance statorique	/
73	[L <sub>rr</sub> ]	Matrice inductance rotorique	/
74	$P_{em}$	Puissance électromagnétique	W
75	$P_j$	Puissance dissipée en perte joule	W
76	$P_e$	Puissance électrique instantanée	W

# Introduction générale

---

L'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui serait bien en peine si elle devait s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie en font un élément désormais indispensable.

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité que ce soit pour faire de l'éclairage, du chauffage, des mouvements de rotation ou de translation, de la transmission des signaux, de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore ... la liste est presque infinie en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais d'une manière plus propre et plus durable.

Des solutions alternatives aux énergies fossiles que sont le charbon, le pétrole et l'uranium sont donc des voies vers lesquelles notre société toute entière doit s'engager. De plus, la consommation d'énergie toujours en augmentation fait réduire les réserves en énergie fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou du moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformation avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie.

Cet exemple montre qu'un jour viendra où les solutions à base d'énergies renouvelables et alternatives qui sont en ce moment trop coûteuses et peu rentables, se révéleront moins chères que les énergies fossiles. Espérons toutefois que nous saurons développer ces énergies renouvelables avant ce jour [1].

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne.

Plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Les plus avancés dans le domaine sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, l'Espagne 6202 MW, le Danemark 3110 MW, la Hollande 912 MW et l'Amérique du nord 6677 MW. Avec certains projets d'énergie éolienne développés ("offshore", au large des côtes) de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon). Par contre en Afrique, le développement de l'énergie éolienne n'a connu aucune évolution et pourtant les ressources n'y manquent pas et la technologie accessible sauf la volonté et le manque de prise de conscience de la majorité des autorités africaines [2].

Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs, tout ceci en regardant aussi ce qui freine leur développement afin de pouvoir envisager des solutions permettant de faciliter d'insertion de tel dispositif dans la production électrique [1].

# Introduction générale

---

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [2]. C'est dans ce cadre que le présent mémoire que nous vous présentons décrit l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion à base d'une machine asynchrone dans un système éolien.

Le but de ce travail est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur asynchrone à cage d'écurieul, et des stratégies de contrôle permettant à la fois d'optimiser la puissance produite. Tous les systèmes développés au cours de cette étude sont modélisés et simulés par le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Dans le premier chapitre, des rappels sur les systèmes éoliens tout en se basant sur les différentes équations et les concepts physiques régissant leur fonctionnement. Ces rappels sont suivis par un état d'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de générateurs utilisés et les convertisseurs qui leur sont associés, en outre, les différents types de stockage d'énergie.

Le second chapitre présente une étude sur la modélisation de la machine asynchrone en régime dynamique et linéaire à travers les équations électriques, de flux et de couple à l'aide de la transformation de R H Park et certaines hypothèses.

Dans le dernier chapitre, il s'agit de d'évaluer sous SIMULINK et de mettre en valeur le fonctionnement de la machine asynchrone à cage en mode générateur ; ainsi que le modèle de la turbine éolienne, et nous présentons aussi la structure globale de système de l'éolienne utilisé dans cette étude, et enfin l'interprétation des résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolien.

## I-1.Introduction :

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. En effet, il existe deux types d'éoliennes à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [2]. Ainsi dans ce qui suit, nous allons énoncer en première partie une généralité sur les différents types d'éoliennes, ensuite nous allons nous intéresser plus particulièrement aux éoliennes à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces.

## I-2.L'énergie éolienne :

### I-2-1.définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" i.e. (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie fossile (Centrale thermique ou à cycle combiné) sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles [3].

### I-2-2.les principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique ou mécanique. Elle se compose des éléments suivants (figure.1.1):

- Ø **Le mât :** généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très

légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur).

- Ø **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 synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pâles (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.
- Ø **Le rotor** : formé par les pâles 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 (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

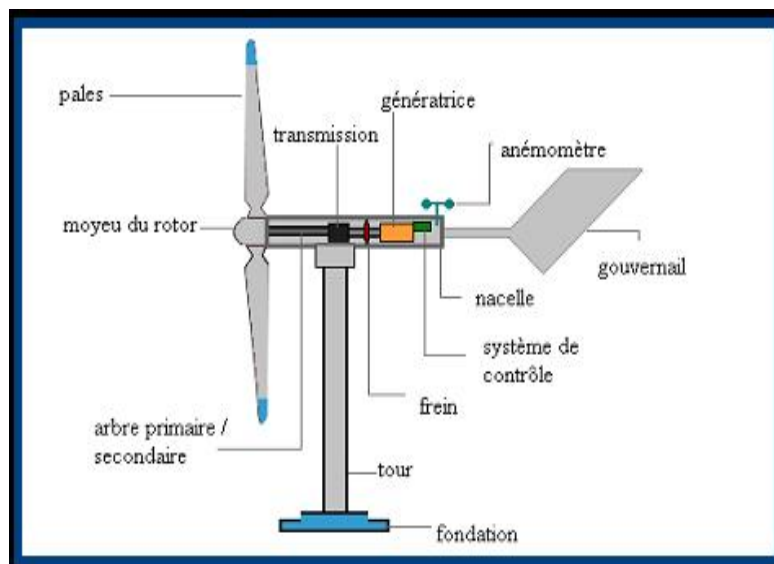


Figure 1-1 : schéma représentatif des principaux composants de l'éolienne

## I-2-3.emplacement des parcs éoliens :

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits. Ces dernières comportent des dizaines d'éoliennes comme on peut le voir sur la (figure1-2). [1]



Figure1-2.Installation d'éolienne offshore en mer de nord (photo GUNNAR BRITSE)

## I-2-4.taille des aérogénérateurs :

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes (figure1-3). Pour utiliser le maximum de la force du vent, on cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

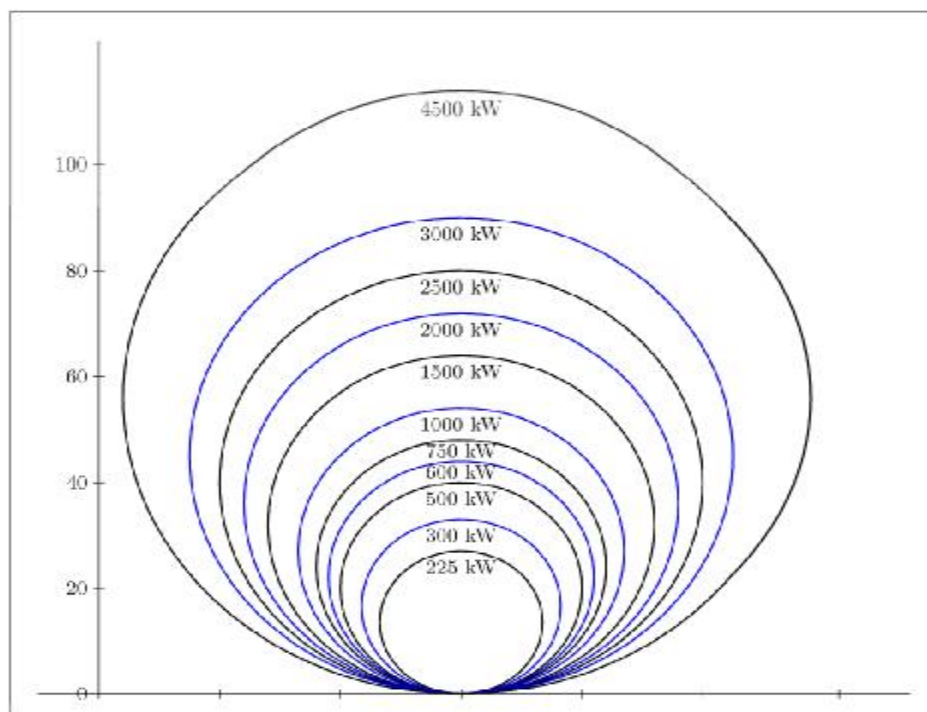


figure1-3. Taille des hélices en m et puissances en KW

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 m de diamètre. Cette hélice est perchée à plus de 100m de hauteur pour produire jusqu'à 4.5MW [1].

### **I-3.conception mécanique des éoliennes :**

Il existe différents profils d'éoliennes. On distingue deux grands types : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Que l'éolienne soit du premier ou du 2eme type, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice.

#### **I-3-1.éolienne à axe verticale :**

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe

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

### Ø Le rotor de Savonius :

Dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble (figure1.4).

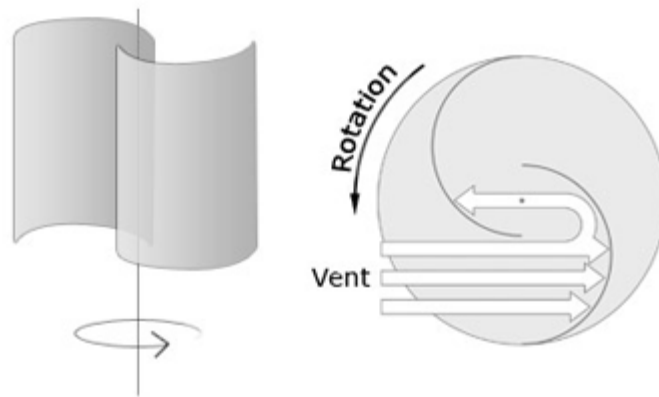


Figure1-4.éolienne de savonius [5].

### Ø Le rotor de Darrieus :

Est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (figure1.5) [5].



Figure1-5. Eolienne de Darrieus.

### **I-3-2.éolienne à axe horizontale :**

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent : l'hélice contient deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Il existe également des éoliennes horizontales mono-pales mais celles-ci sont très rares. Les éoliennes à deux pales et les éoliennes à trois pales fonctionnent sur le même principe. Le rendement des éoliennes à axe horizontal est supérieures à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication. Notre étude se limiter uniquement au cas des éoliennes à axe horizontale (figure1.6)[5].



Figure1-6. Eolienne à axe horizontale.

Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes "amont" et les éoliennes "aval".

### Ø Eolienne amont (fasse au vent):

Dans le fonctionnement des éoliennes "amont", le vent souffle directement sur les pâles de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pâles rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000kW fonctionnent avec ce principe (figure1.7).

### Ø Eolienne aval (sous le vent) :

Dans le fonctionnement des éoliennes à axe horizontal "aval", le vent souffle sur l'arrière des pâles. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles (figure1.7) [4].

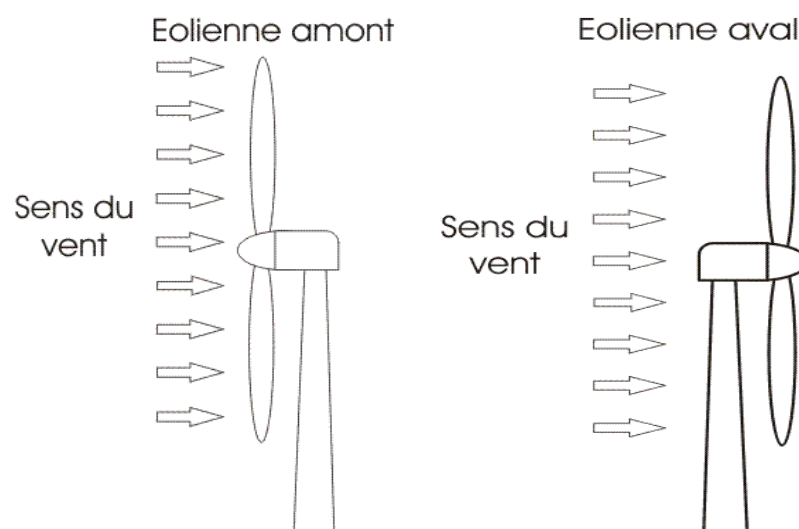


Figure 1-7. Types d'éoliennes à axe horizontal [6].

I-4.principe de fonctionnement d'une éolienne :

I-4-1.bilan des forces sur une pale :

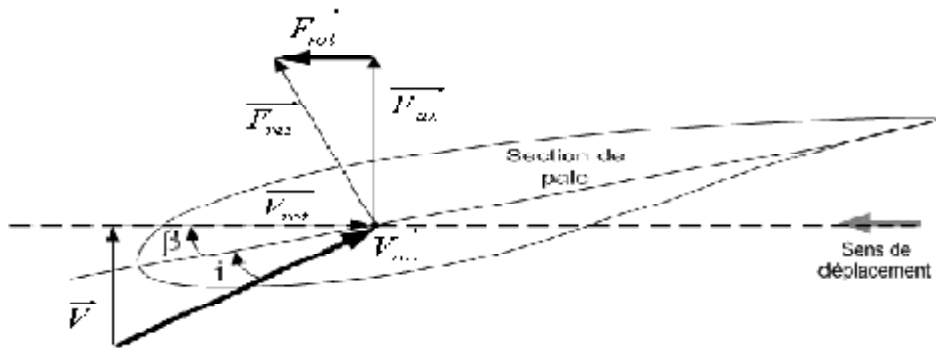


Figure. 1-8 : Bilan des forces sur une pale.

La Figure 1-8 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $\vec{V}$ . Le vecteur  $\vec{V}_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $\vec{V}_{res}$ . L'action du vent sur la pale produit une force  $\vec{F}_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $\vec{F}_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $\vec{F}_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement. Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale [7].

I-4-2.système à décrochage aérodynamique :

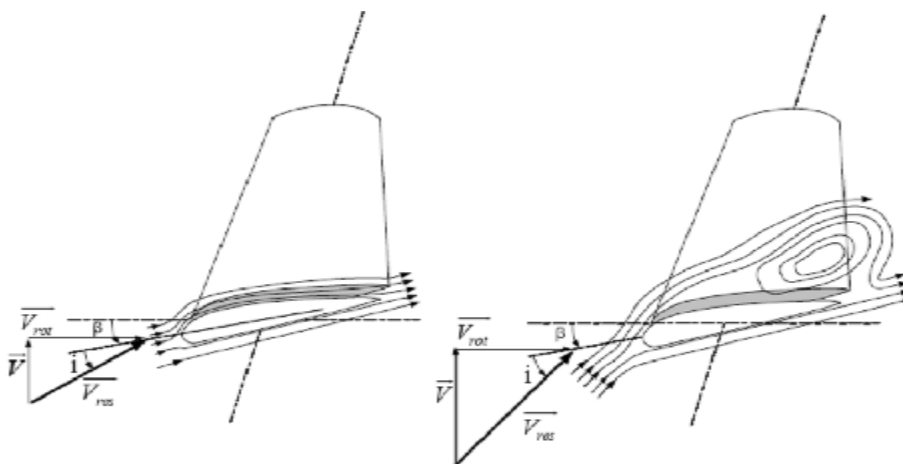


Figure.1-9.Flux d'air sur un profile de pale (stall).

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale  $V_n$ , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 1-9) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage  $\beta$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de la vitesse du vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [2].

#### I-4-3. système d'orientation des pales :

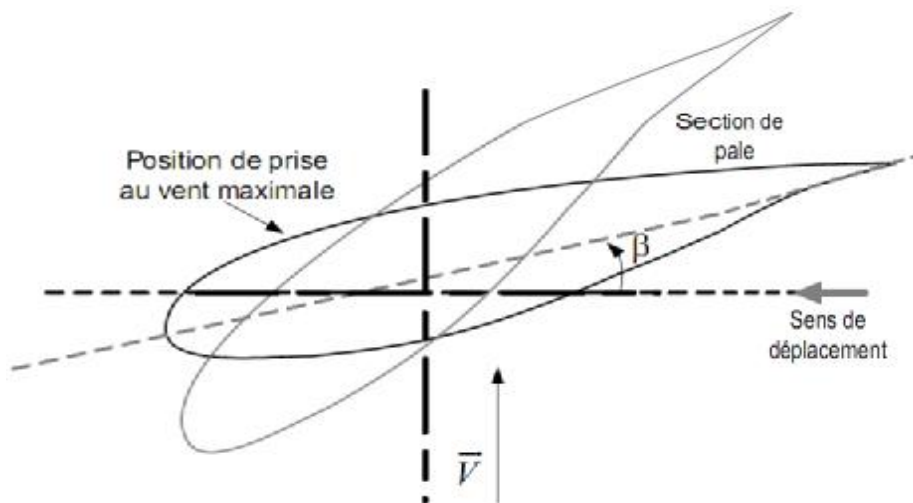


Figure.1-10. variation de l'angle de calage d'une pale.

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (figure 1-10). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage.

L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible. En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

- ∅ le démarrage à une vitesse du vent  $V_d$  plus faible ;
- ∅ l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites  $[V_d, V_n]$  en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite (1 à 2 voire 1 à 3 pour un rapport  $V_n/V_d$  de l'ordre de 4 à 5) ;
- ∅ la régulation par limitation de la puissance pour  $V > V_n$  ;
- ∅ la protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice. On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage  $\beta$ , de manière prépondérante depuis le démarrage (figure 1-11)

(Zone I) et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone IV) de la turbine [2].

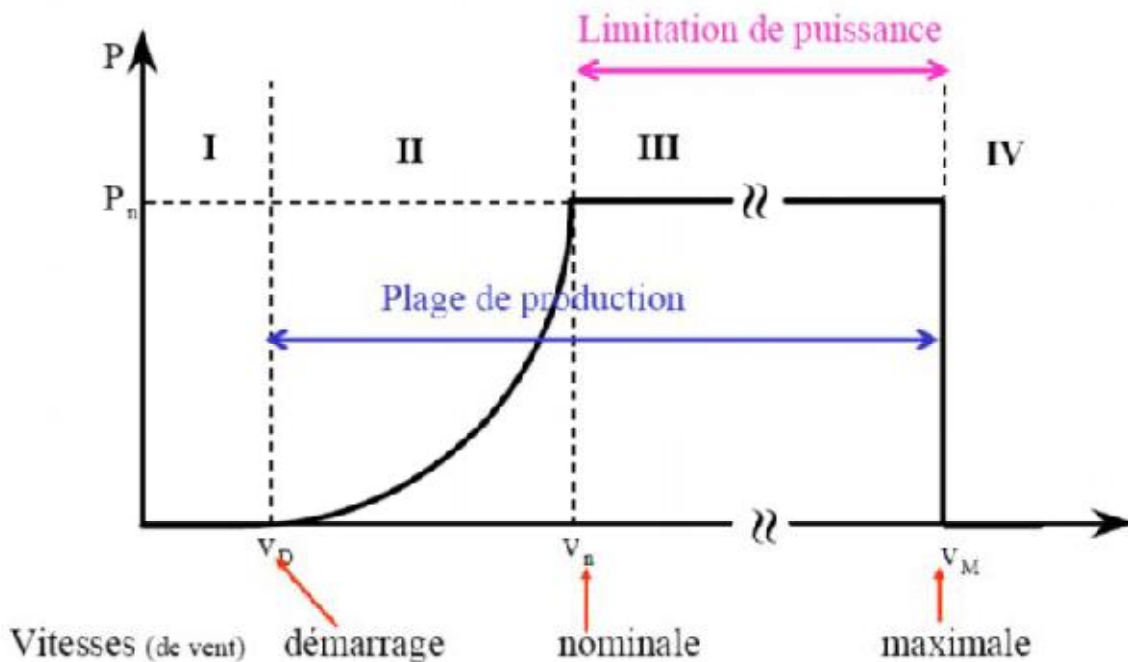


Figure.1-11. Régulation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [17].

**I-5.conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :**

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse :

**I-5-1.l'énergie cinétique du vent :**

On peut déterminer la puissance qu'il est possible d'extraire du vent en utilisant le calcul basé sur l'énergie cinétique de la masse d'air déplacé [1], dans le cas général cette énergie cinétique est donnée par la relation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} . m . V^2 \quad (1.1)$$

m: masse du volume d'air (en kg)

V: vitesse instantanée du vent (en m/s)

$E_C$ : énergie cinétique (en joules)

**I-5-2.Limite de Betz/Formule de Betz :**

Si l'on considère une éolienne à axe horizontal, la masse d'air qui arrive devant l'hélice avec la vitesse  $V_1$  repart, après avoir entraîné l'hélice, avec la vitesse  $V_2$  , plus faible (figure.1.12).

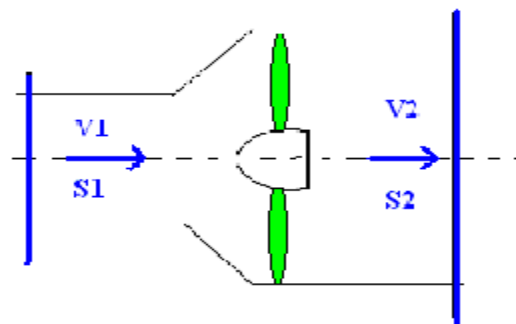


Figure1.12 : tube de courant d'air autour d'une hélice [2].

Considérant que la vitesse de la masse d'air au niveau de l'hélice corresponde à la moyenne entre la vitesse amont et la vitesse aval. On peut alors déterminer la masse d'air  $m$  qui traverse l'hélice à chaque seconde par la formule [1] [2]:

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad (1.2)$$

D'après la loi de Newton, la puissance extraite  $P_{ext}$  peut alors s'exprimer par :

$$P_{ext} = \frac{m(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.3)$$

Si l'on compare cette puissance à la puissance de la masse d'air en amont :

$$P_{amont} = \frac{\rho S(V_1^3)}{2} \quad (1.4)$$

On obtient le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance disponible dans le vent [1] :

$$\frac{P_{ext}}{P_{amont}} = \frac{\left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \quad (1.5)$$

### **I.5.3. Production d'énergie mécanique :**

On combinant les équations (1.2), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime par :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{amont}} \cdot P_{amont} = C_p \cdot P_{amont} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.6)$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1}$$

$\lambda$  : Vitesse Spécifique de L'éolienne ; dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent [17].

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant le multiplicateur.

$R$  : rayon de l'aérogénérateur.

Ainsi le couple mécanique s'obtient comme suite :

$$C_m = \frac{P_m}{\Omega_1} \tag{1.7}$$

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \cdot \left( \frac{\Omega_2 \cdot R}{K \cdot V_1} \right) \cdot \rho \pi R^2 V_1^3 \tag{1.8}$$

Avec :

$\Omega_2$  : vitesse de rotation après le multiplicateur.

On obtient une courbe qui définit le coefficient de puissance  $C_p$ , représenté en figure (1.13) cette courbe à un maximum théorique de  $\frac{16}{27} = 0.59$  qui est appelée limite de Betz et qui correspond à la puissance maximale que l'on peut extraire du vent. Cette limite, théorique, n'est jamais atteinte par les éoliennes qui ont un  $C_{pmax}$  de l'ordre de 0.5.

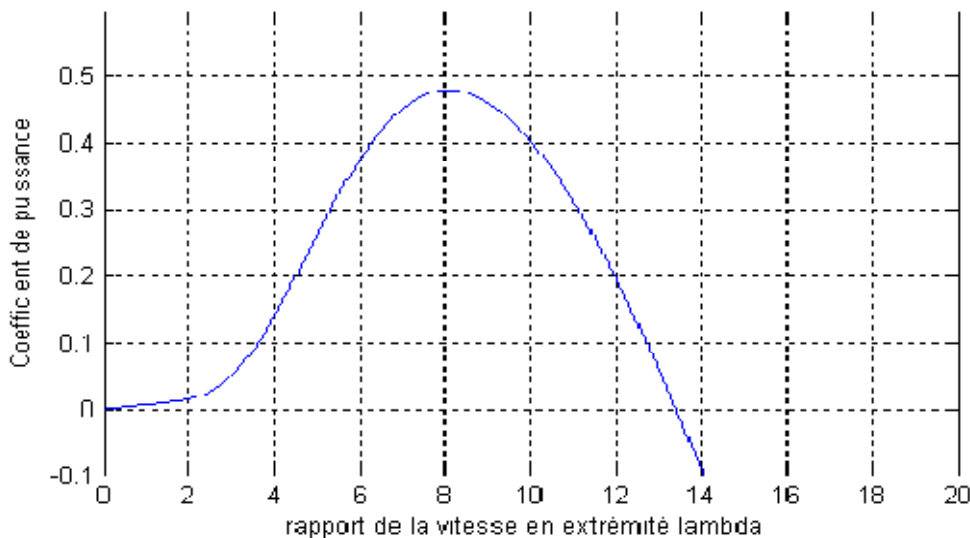


Figure1-13. Coefficient de puissance  $C_p$

Cette limite s'explique par le fait que pour tourner, l'hélice a besoin d'être traversée par l'air et cet air ne doit pas rester accumulé derrière l'hélice mais doit être évacué, ceci nécessite une vitesse d'écoulement aval non nul [1].

#### I-5-4. Le coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La (Fig 1-14) représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse  $\lambda$  et de l'angle d'orientation de la pale  $\beta$ . Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

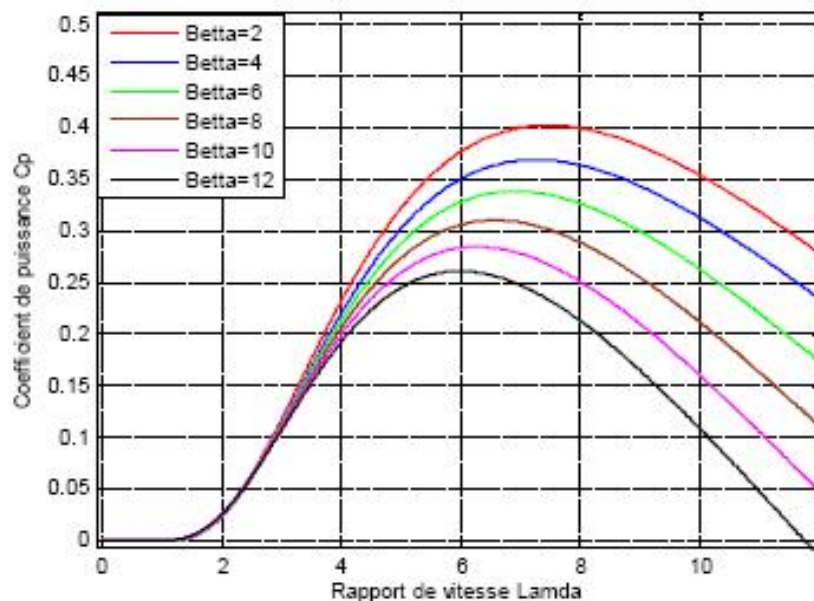


Figure.1-14.coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du rapport de vitesse lamda [20].

**I-6.conversion mécanique  $\rightarrow$  électrique :****I-6-1.conversion mécanique  $\rightarrow$  électrique avec et sans multiplicateur :**

La vitesse d'une turbine éolienne est relativement lente. Une première technologie d'éoliennes repose sur des machines tournantes synchrones (plutôt à rotor bobiné pour les éoliennes connectées en moyenne tension) de petite vitesse, comportant donc un grand nombre de pôles, et par suite ayant un grand diamètre. Les éoliennes basées sur des machines à réluctance variable s'inscrivent également sous cette catégorie de génératrices. Ces génératrices rendent impossible une connexion directe au réseau de distribution fonctionnant à 50 Hz. Elles sont nécessairement alimentées par un ensemble constitué de deux convertisseurs de puissance : l'un fonctionnant sous fréquence variable et permettant le fonctionnement à vitesse variable et l'autre fonctionnant à 50Hz et permettant une connexion sur le réseau. Cependant, cette technologie de machine a actuellement une puissance inférieure au mégawatt.

Une seconde technologie repose sur l'utilisation d'une machine asynchrone. D'une manière générale, cette dernière tourne à une vitesse beaucoup plus importante que la turbine éolienne. Il est alors nécessaire d'adapter celle-ci à la vitesse de la turbine en intercalant un multiplicateur mécanique. Ces multiplicateurs mécaniques ont l'inconvénient de nécessiter une maintenance accrue et de nuire à la fiabilité de l'éolienne. Cependant pour la génération de forte puissance, c'est la technologie qui est retenue par les constructeurs pour une connexion sur un réseau de moyenne tension [9].

Le diagramme suivant représente le processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique pour les différentes configurations des machines électriques à vitesse variable utilisées dans les systèmes éoliens (figure.1.15).

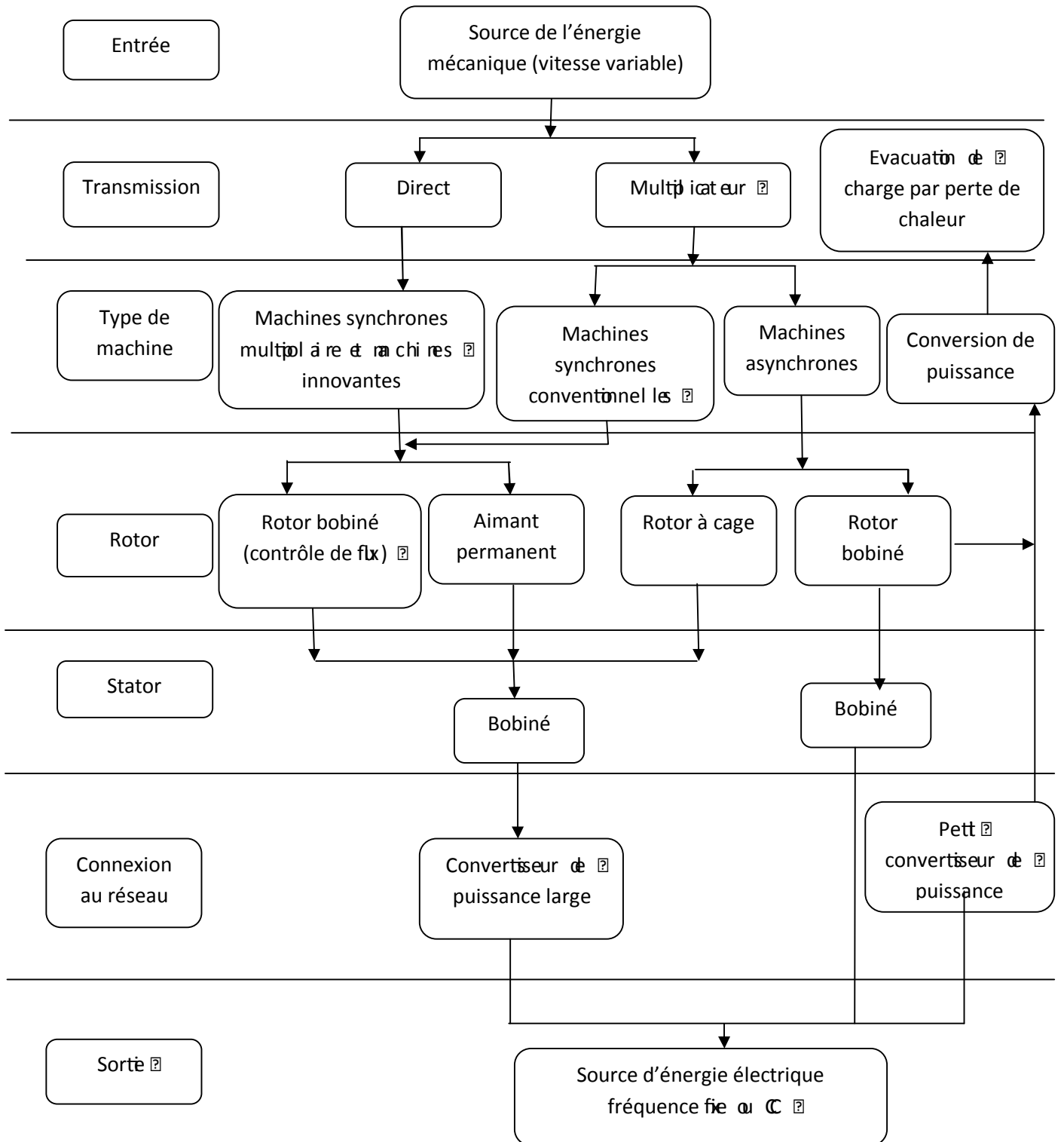


Figure1-15. Processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique [10]

**1-6-2.les différentes machines utilisées pour cette conversion :****1-6-2-1.système utilisant la machine à courant continu :**

Ce type de machine n'est utilisé que sur les éoliennes de très faible puissance (inférieure à 500W) pour charger des batteries et alimenter des installations de type station de mesure. Elles sont également utilisées sur les bateaux, en association avec des panneaux solaire.

Pour une telle machine, les équations de fonctionnement sont simples. Elles comportent un stator portant le circuit inducteur (bobinages alimentés ou aimants permanents) excitation et un rotor constituant le circuit induit connecté aux bornes de sortie, via le système balais collecteurs.

La tension est proportionnelle à la vitesse de rotation de l'éolienne et à la valeur du courant d'excitation [1].

**1-6-2-2.système utilisant la machine asynchrone :**

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

*a)machine asynchrone à cage d'écureuil :*

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), 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. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure (1-16)

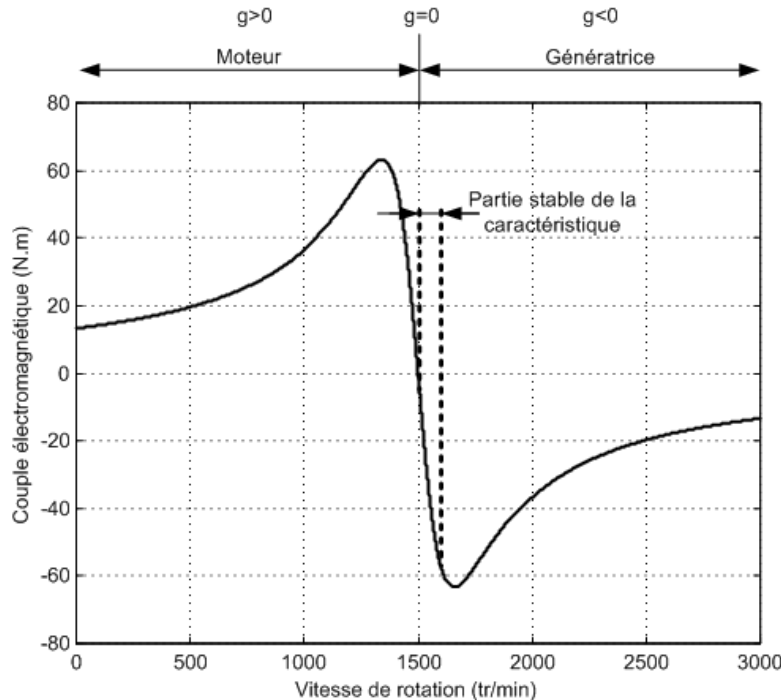


Figure.1-16.Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min. Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure 1-17). La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 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 de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure 1-17 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

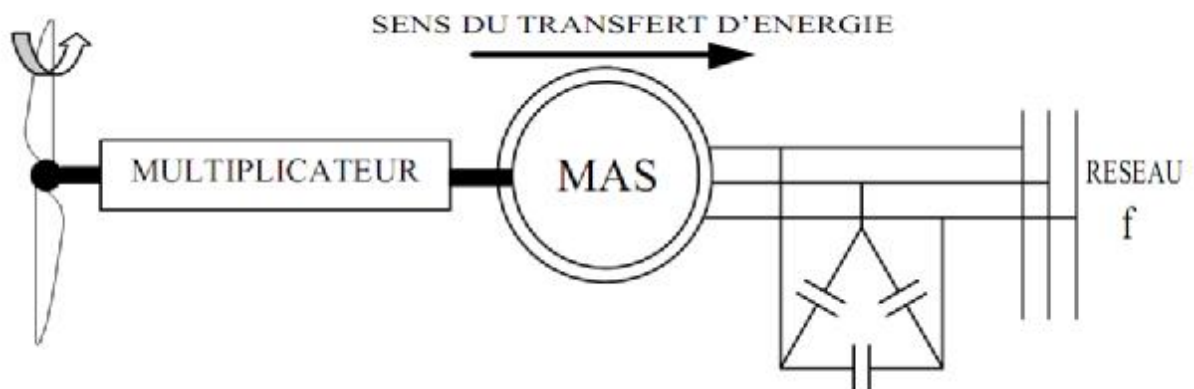


Figure.1-17. Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées. La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations [7].

*b) machine asynchrone à double alimentation (MADA) :*

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulements. Le stator est identique à celui d'une machine asynchrone à cage (figure1.18).

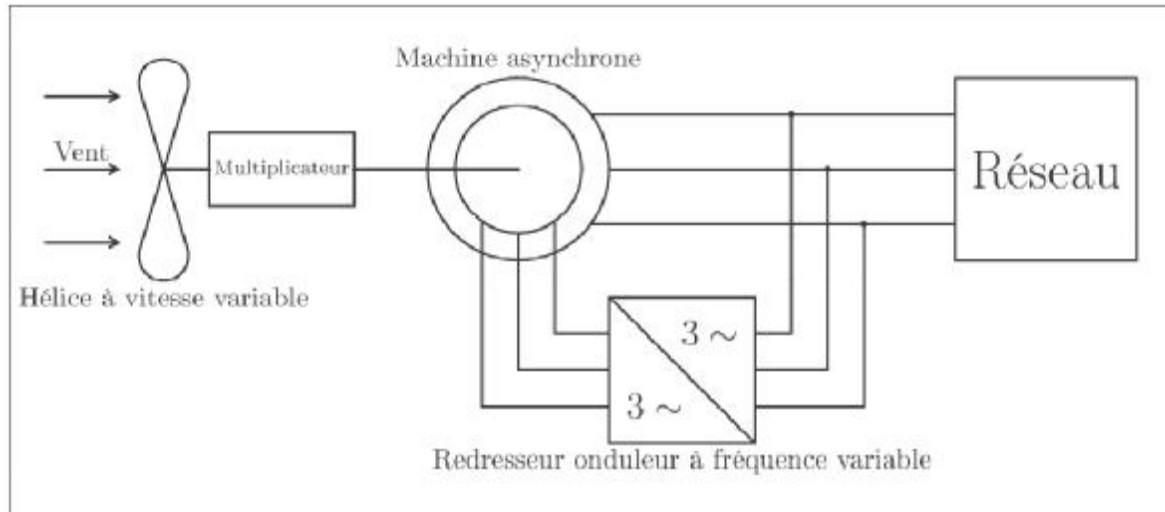


Figure.1-18.schéma de principe de la double alimentation.

On connecte toujours le stator au réseaux mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotorique, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir du réseau via un onduleur de taille réduite (fig.1-18) la puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator.

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc de glissement  $g$  [1].

### c) Machine asynchrone à rotor bobiné:

En, effet le rotor de cette machine comporte un bobinage triphasé semblable à celui du stator. Ces trois bobinage sont couplés en étoile et court-circuités sur eux-mêmes.

Principe de fonctionnement:

- Cas d'un fonctionnement hypo synchrone (moteur):

Les trois bobinages du secondaire (rotor), sont court-circuités et le rotor tourne à une vitesse ( $\Omega_r$ ) différente de celle du champ tournant (vitesse de synchronisme)  $\Omega_s$ .

Le rotor perçoit donc un champ glissant qui résulte donc la création d'une f.m.m induite dans les bobinages rotoriques. La f.m.m induite est court-circuitée sur l'enroulement ce qui va donner naissance à un courant induit dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier.

L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exercent sur le rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine.

- ∅ Ce couple n'existe que si la f.m.m est non nulle, c'est-à-dire si  $f_r$  est non nulle.
- ∅ Le rotor ne doit pas tourner au synchronisme pour qu'il y ait couple d'où le nom de machine asynchrone.
- ∅ La valeur efficace de la f.m.m est  $E_r = \left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right) \cdot K_{br} \cdot N_r \cdot f_r \cdot \phi_p$  (1.9)

Avec :

$K_{br}$  : Facteur de bobinage d'un enroulement rotorique.

$N_r$  : nombre de spires de chaque enroulement rotorique

$\phi_p$  : Le flux sous un pôle du champ glissant

On appelle un glissement la grandeur

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \quad (1.10)$$

Cette grandeur sans dimension s'exprime en %

- Cas d'un fonctionnement hyper synchrone (génératrice) :

Dans ce fonctionnement le rotor tourne à une vitesse ( $\Omega_r$ ) plus grande que celle de synchronisme ( $\Omega_s$ ). dans ce cas  $\Omega > \Omega_s$ , c'est-à-dire  $g < 0$  [10].

### **1-6-2-3. système utilisant la machine synchrone :**

#### *a) Machine synchrone à aimants permanents discoïde :*

Certaines éoliennes sont constituées de génératrices dites discoïdes. Leur conception est telle que le stator et le rotor sont des disques empilés les uns à côté des autres, le long de l'arbre de l'hélice. Il y a alternance de disques stator, comportant les enroulements, et de disques rotor, équipés d'aimants permanents. Il s'agit toujours d'une conception multipolaire

et de grand diamètre. Dans ces machines, le flux magnétique crée par les aimants est parallèle à l'axe de rotation, contrairement aux machines classique où le flux était radial (figure1.19) [1].

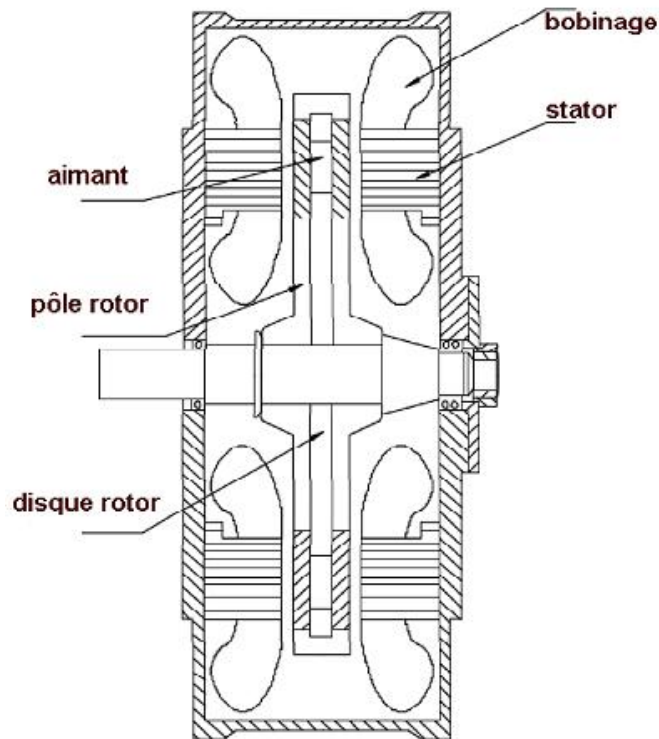


Figure.1-19.schéma de principe d'une génératrice discoïde [1].

*b) Machine synchrone vernier à aimants :*

Cette structure fait usage de motifs dérivés de ceux utilisés dans les machines à réluctance variable à double denture Figure 1-20. Des paires de petits aimants alternés, à la périphérie du rotor, constituant l'inducteur, interagissent sous l'effet du champ d'induit avec des petites dents statoriques. L'induit, encoché, reçoit un bobinage polyphasé à champ tournant. La dimension des pôles (ou le nombre) et celles des aimants sont deux paramètres essentiels dans le dimensionnement et les performances, mais ils sont totalement découplés dans la structure vernier.

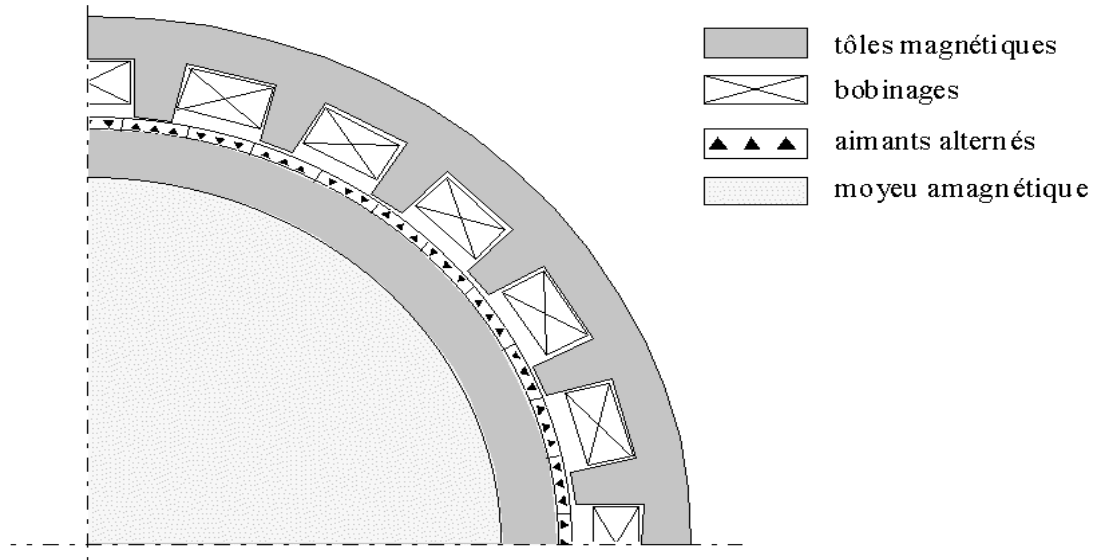


Figure 1-20 : Machine synchrone Vernier à aimants.

L'effet vernier provient de ce que le nombre de paires d'aimants alternés,  $N_r$  est différent du nombre de dents,  $N_s$ . Il s'ensuit que l'onde d'induction due aux aimants a une périodicité égale à  $2\pi/|N_s - N_r|$ . Une condition de bon fonctionnement est alors d'avoir une périodicité des pôles de bobinage identique, ce qui implique  $N_s - N_r = p$ . Il est possible alors d'établir la relation entre la vitesse de rotation,  $\Omega$ , et la pulsation d'alimentation  $\omega$  :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r}$$

Nous voyons que seule  $N_r$  impose la fréquence d'alimentation. Ceci est un avantage considérable pour le dimensionnement des machines très lentes, le niveau de performance étant intrinsèquement plus élevé que pour la machine classique à grand nombre de pôles, sachant qu'il est plus facile, pour des raisons de faisabilité mécanique, de diminuer la taille des dents que des pôles[7].

c) Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants :

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Figure 1-21) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation.

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu (roue polaire) par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor, c'est pourquoi on remplace souvent ce bobinage par des aimants permanents. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tend à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie.

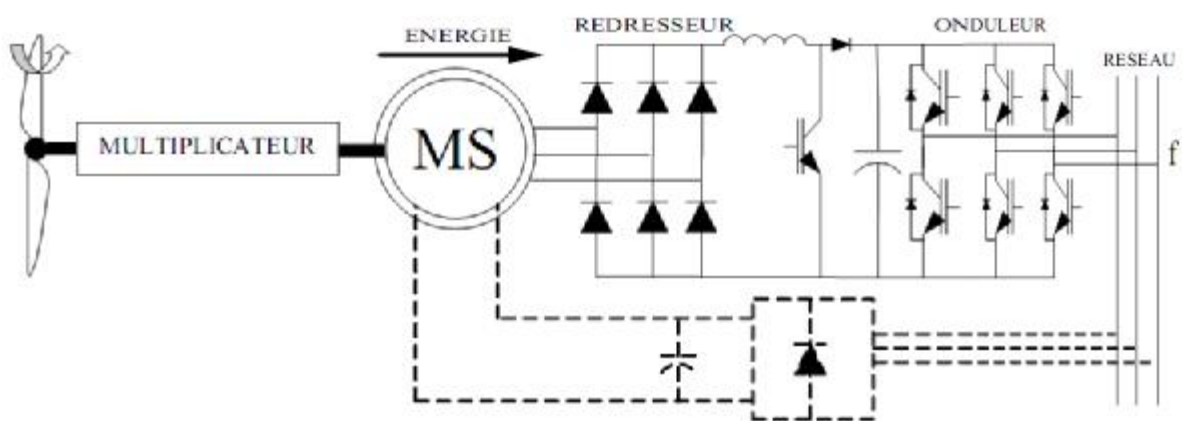


Figure.1-21. Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur- hacheur - onduleur MLI.

L'exemple de la Figure 1-21 présente une configuration classique d'interface de connexion d'une machine synchrone au réseau. Le convertisseur connecté au stator de la machine est un simple redresseur puisqu'elle n'absorbe pas de puissance réactive, ce qui permet d'éviter les  $dv/dt$  importants sur les enroulements statoriques. Ce redresseur est classiquement suivi d'un hacheur élévateur permettant de délivrer une tension suffisante à l'onduleur MLI pour les faibles vitesses de rotation. La présence de l'onduleur MLI permet de contrôler le facteur de puissance coté réseau. Ces convertisseurs sont toutefois dimensionnés pour la totalité de la puissance nominale de la machine et entraînent jusqu'à 3% de cette puissance de pertes. Notons que l'utilisation de machines synchrones à faible vitesse (grand nombre de paire de pôles) permet de supprimer le multiplicateur de vitesse, pièce mécanique complexe entraînant des pertes et des pannes fréquentes mais l'augmentation du nombre de pôles implique une machine de très grand diamètre représentant un barrage important pour l'écoulement du vent[7].

### **1-7.stockage d'énergie :**

Le stockage d'énergie permettrait d'obtenir un service réseau appréciable. Il y a deux types de stockage à envisager : d'une part le stockage à court terme permettant de faire face aux bourrasques de vent et aux turbulences, et d'autre part le stockage à longue durée qui permettrait de restituer l'énergie lorsqu'il n'y a plus de vent.

#### **1-7-1.Storage à court terme :**

Généralement dans l'inertie de l'hélice ou avec des accumulateurs cinétiques au pied de l'éolienne. Ces accumulateurs sont constitués de volants d'inerties entraînés par des machines asynchrones (figure1-22). On trouve aussi du stockage sous forme électrochimique dans des surcapacités. Ce stockage permet de lisser les fluctuations de puissance du vent.

#### **1-7-2. Stockage à long terme :**

Plusieurs solutions sont envisagées, notamment les batteries d'accumulateurs chimiques, l'air comprimé, la production d'hydrogène par électrolyse et la restitution avec une pile à combustible... Ce stockage permet de compenser les périodes où le vent est insuffisant et contribue ainsi à maintenir constante la puissance fournie au réseau.

Ce stockage d'énergie associé à une gestion adéquate permettrait de garantir une production constante tout au long de l'année pour les parcs éoliens. Ceci faciliterait leur insertion dans les réseaux et soulagerait les gestionnaires des réseaux (figure1.22) [1].

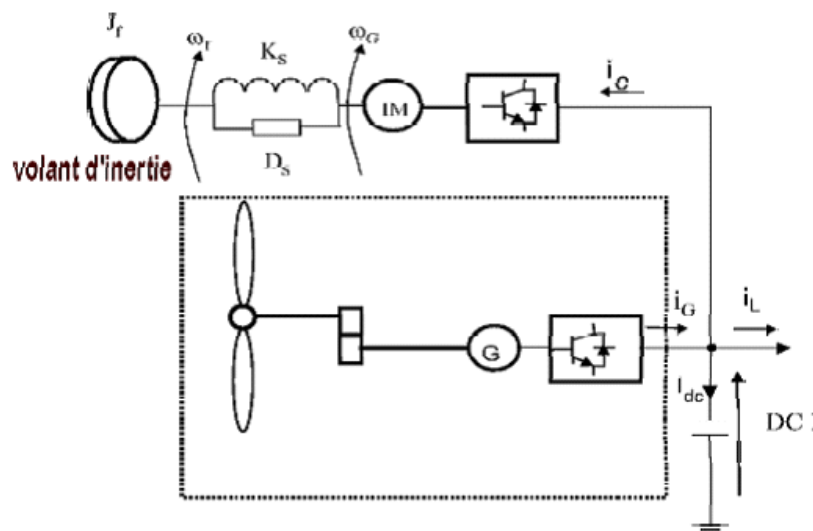


Figure.1-22. exemple de stockage à court terme avec volant d'inertie.

**1-8.conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de dresser un bilan des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes classées selon des critères bien précis (type d'axe, vitesse de rotation) et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits. La seconde partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien. Trois grandes familles de machines sont présentées : machine à courant continu, machines asynchrones et machine synchrones. Dans la fin de ce chapitre on a parlé sur les différents types de stockage d'énergie.

### II.1. Introduction :

La modélisation consiste à définir par un modèle mathématique le comportement électrique et dynamique d'un système quelconque, il est donc indispensable de passer par cette étape afin de concevoir des systèmes de commande performants [10].

Dans ce chapitre, nous présenterons la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.

Dans beaucoup d'application à vitesse variable, comme la traction ferroviaire par exemple, la machine asynchrone tend à se substituer à la machine à courant continu. Cette évolution, motivée par d'indéniables qualités de robustesse et de fiabilité, est permise grâce aux convertisseurs électroniques de puissance et aux processeurs numériques pour leur commande. Toutefois, un problème majeur se pose : le modèle de Park classique de la machine, indispensable à la conception de son dispositif de commande, dépend de paramètres variant fortement selon les conditions de fonctionnement de la machine.

Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et à rotor bobiné. La plupart des éoliennes du monde utilisent une génératrice asynchrone triphasée à cage d'écureuil (figure2.1), appelée aussi une génératrice à induction, pour produire du courant alternatif. Ce type de génératrice n'est en fait que très rarement utilisé, sauf dans l'industrie éolienne et dans les petites centrales hydrauliques [11] [2] [12].

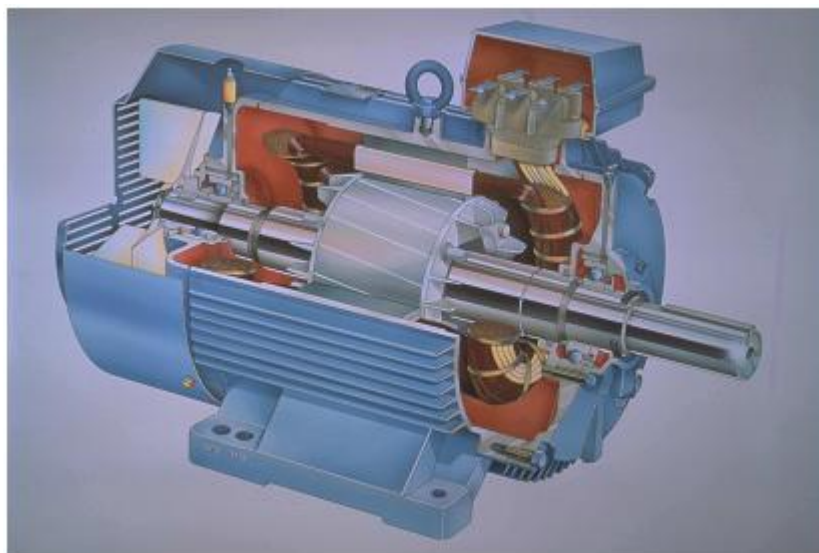


figure.2.1.générateur asynchrone à cage d'écureuil [15]

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à cage, La plus utilisée dans les éoliennes tournantes à une vitesse constante, en partant d'un certain nombre d'hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine.

## ***II.2. Constitution et principe de fonctionnement de la machine asynchrone :***

La Machine Asynchrone est constituée de principaux éléments suivants :

- Stator : c'est la partie fixe de la machine, constitué de disque en tôles magnétique portant les enroulements chargés de magnétisé l'entrefer.
- Rotor : c'est la partie tournant de la machine constitué de disque en tôles magnétique empilés sur l'arbre de la machine portant un enroulement injecté.
- Organes mécaniques : permettant la rotation du rotor et le maintien des différents sous-ensembles [13].

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens de champs tournant à une vitesse supérieur à la vitesse de synchronisme (vitesse de champs tournant) exprimée par l'équation suivante :

$$\Omega_s = \frac{60f}{P}$$

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Pour une augmentation limitée de la vitesse de rotation de l'éolienne, le couple et donc la puissance fournie sont proportionnels au glissement. Toutefois, à partir d'une certaine vitesse de rotation, une

diminution sensible du flux dans la génératrice se produit, ce qui nécessite plus de courant pour un couple équivalent. Passée à une valeur maximale de couple, une diminution du couple et donc de la puissance est observée (figure 1-16). Il est dangereux que l'éolienne soit amenée à fonctionner dans cette zone, car d'une part la diminution du couple résistant pourrait entraîner une survitesse de la machine et d'autre part la dissipation de puissance dans la génératrice risquerait d'endommager certains éléments par surchauffe. Il faut souligner l'intérêt de ce type de fonctionnement de la génératrice asynchrone car il permet à l'éolienne de subir de faibles variations ponctuelles de la vitesse du vent (rafales) sans solliciter exagérément la transmission (multiplicateur notamment). [2]

Le glissement «  $g$  » de la machine définie par : 
$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$$

Avec :

$\Omega_r$  : vitesse de rotation du rotor.

$f$  : Fréquence du champ tournant.

$P$  : Nombre de paires de pôles.

### ***II.3. Modélisation de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire:***

#### ***II.3.1. Hypothèse simplificatrice :***

La modélisation de la machine asynchrone est établie sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- Nous supposons que nous travaillons en régime non-saturé.
- Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température.

- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et de rotor.
- Les inductances propres sont constantes, Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer:

- l'additivité des flux.
- la constance des inductances propres.
- la loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques [2] [13].

Ainsi, nous pouvons schématiser la MAS comme la montre la figure (2.2). Elle est munie de six enroulements:

Le stator est formé de trois enroulements fixes décalés dans l'espace de  $120^\circ$  et traversés par trois courants variables.

Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de  $120^\circ$ .

Ces enroulements sont court-circuités et la tension à leurs bornes est nulle.

Nous posons  $\theta$  l'angle électrique entre la phase A statorique et la phase a rotorique.

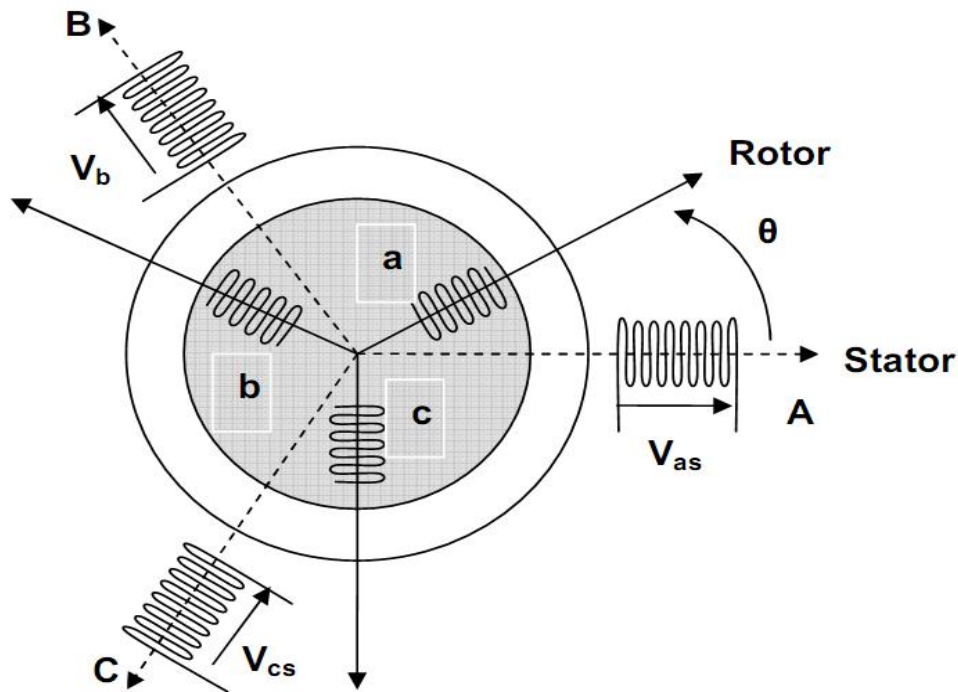


Figure.2.2. Représentation schématique d'une MAS triphasée [13].

### II.3.2. Modèle mathématique de la machine asynchrone linéaire :

#### II.3.2.1. L'équations générales de la machine :

##### a) Equations des tensions :

Les équations des tensions statoriques, écrites dans un référentiel stationnaire lié au stator, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle, par :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \quad (2.1)$$

Avec :

$[V_s]$  : Vecteur des tensions statoriques.

$[R_s]$  : Matrice des résistances statoriques.

$[I_s]$  : Vecteur des courants statoriques.

$[\Phi_s]$  : La matrice des flux statoriques.

$$\text{Où : } [V_S] = \begin{bmatrix} V_{AS} \\ V_{BS} \\ V_{CS} \end{bmatrix}; [R_S] = \begin{bmatrix} R_S & 0 & 0 \\ 0 & R_S & 0 \\ 0 & 0 & R_S \end{bmatrix}; [I_S] = \begin{bmatrix} I_{AS} \\ I_{BS} \\ I_{CS} \end{bmatrix}; [\Phi_S] = \begin{bmatrix} \Phi_{AS} \\ \Phi_{BS} \\ \Phi_{CS} \end{bmatrix}$$

Les équations des tensions rotoriques, écrites dans un référentiel tournant lié au rotor, peuvent être exprimées par :

$$[V_r] = [0] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (2.2)$$

Avec :

$[V_r]$  : Vecteur des tensions rotoriques.

$[R_r]$  : Matrice des résistances rotoriques.

$[I_r]$  : Vecteur des courants rotoriques.

$[\Phi_r]$  : La matrice des flux rotoriques.

$$\text{Où : } [V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

b) Equations des flux :

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$\begin{cases} [\Phi_S] = [L_{SS}] \cdot [I_S] + [M_{Sr}] \cdot [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{Sr}]^t \cdot [I_S] \end{cases} \quad (2.3)$$

Avec :  $[L_{SS}]$  et  $[L_{rr}]$  représentent respectivement les matrices inductances statoriques et rotoriques exprimées en fonction des inductances propres et mutuelles. [13]

Où :

$$[L_{SS}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$\text{Et : } [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

En mettant (2.3) dans (2.1) et (2.2) nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{SS}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (2.4)$$

$$[0] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (2.5)$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables ((2.4) (2.5)). L'étude analytique du comportement du système est alors relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé et qui reste valable pour la machine réelle. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de R.H.Park. [2][13][14]

### ***II.3.2.2. Modèle diphasé « modèle de Park » de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire :***

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe.

Pour mieux représenter le comportement d'une machine asynchrone et afin d'obtenir des coefficients constants dans les équations différentielles, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé.

Physiquement, on peut la comprendre comme une transformation des trois enroulements de la MAS à seulement deux enroulements, comme la montre la figure (2.3). [2][13]

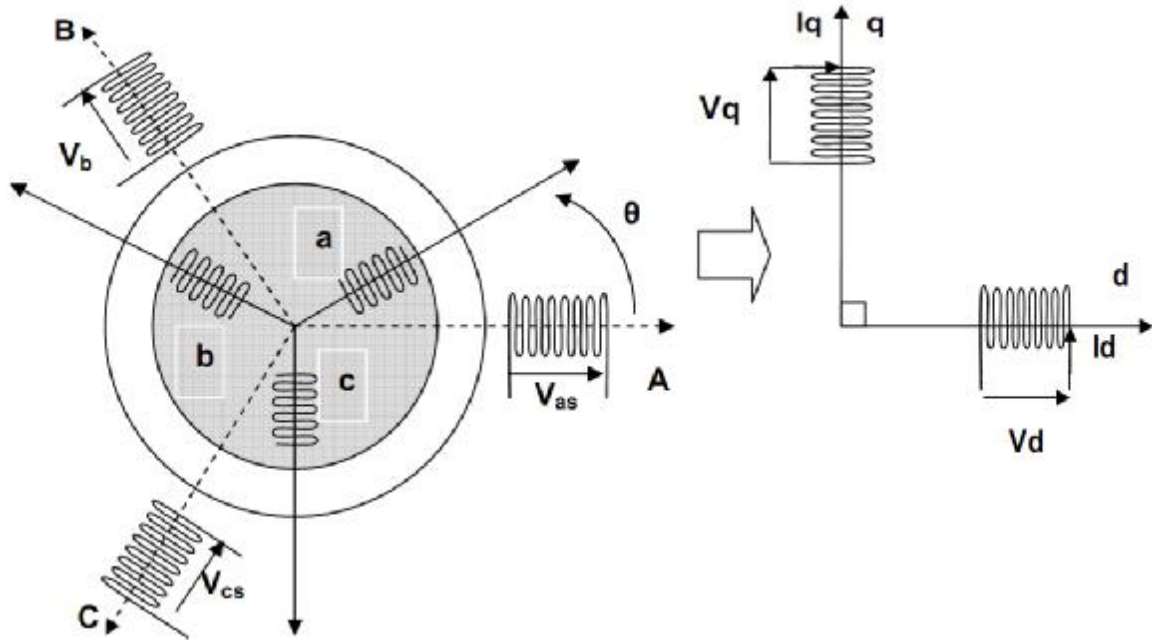


Figure.2.3 : modèle de Park de la machine asynchrone

**a) Transformation de Park :**

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère **abc** vers le repère mobile **dq**. Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park. Pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider. En effet, si l'on note par  $\theta_s$  (resp. par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (figure 2.4), ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation [13] :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \tag{2.6}$$

Il en est forcément de même entre les vitesses du référentiel dans chaque repère et la vitesse mécanique, soit :

$$\omega + \omega_r = \omega_s \tag{2.7}$$

Avec :  $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$  ;  $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$  ;  $\omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}$

$\Omega$  étant la vitesse mécanique, et  $\omega$  cette même vitesse vue dans l'espace électrique [14].

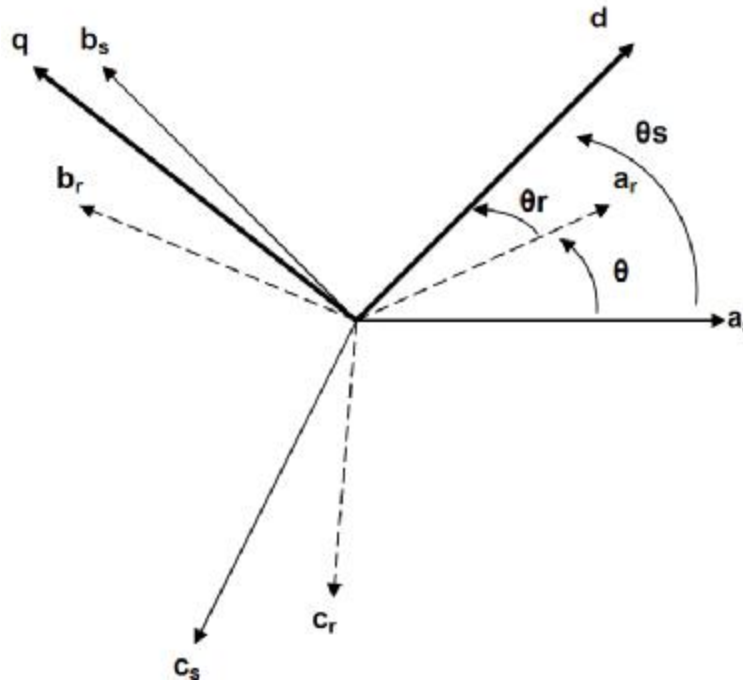


Figure 2.4. représentation angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

Les amplitudes directe (**d**) et en quadrature (**q**) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \cdot \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} = [P(\theta_s)]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_o \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Ces équations peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

### **b) Application aux équations des tensions :**

Appliquons la transformation de Park ((2.8) et (2.9)) à l'expression (2.1) :

$$[P^{-1}(\theta_s)] \cdot [V_{sdq}] = [R_s] [P^{-1}(\theta_s)] [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} \{ [P^{-1}(\theta_s)] [\Phi_{sdq}] \} \quad (2.10)$$

En multipliant les deux membres de l'égalité par  $[P(\theta_s)]$  et en simplifiant, nous trouvons :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (2.11)$$

Or:

$$\frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} -\sin(\theta_s) & -\cos(\theta_s) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Donc, après un calcul direct, nous trouvons :

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Et l'expression (2.11) devient alors :

$$[V_{sdq}] = [R_s][I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (2.14)$$

Ou encore :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

De manière similaire, et en suivant les mêmes étapes, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### **c) Application aux équations des flux :**

Appliquons la transformation de Park ((2.8) et (2.9)) à l'expression (2.3) :

$$[P^{-1}(\theta_s)][\Phi_{sdq}] = [L_{ss}] \cdot [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [I_{sdq}] + [M_{sr}] \cdot [P^{-1}(\theta_r)] \cdot [I_{rdq}] \quad (2.17)$$

Soit:

$$[\Phi_{sdq}] = [P(\theta_s)][L_{ss}][P^{-1}(\theta_s)] \cdot [I_{sdq}] + [P(\theta_s)] [M_{sr}] \cdot [P^{-1}(\theta_r)] \cdot [I_{rdq}] \quad (2.18)$$

Un calcul simple nous donne :

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P^{-1}(\theta_s)] = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2M_s \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\text{Et } [P(\theta_s)][M_{sr}][P^{-1}(\theta_r)] = \frac{3}{2} M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & \sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Or, d'après l'égalité (2.6), nous pouvons écrire :

$$[P(\theta_s)] \cdot [M_{sr}] \cdot [P^{-1}(\theta_r)] = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_m = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \end{cases} \quad (2.22)$$

L'expression (2.18) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'équation du flux rotorique, et en introduisant l'inductance cyclique:

$$L_r = l_r - M_r \quad (2.24)$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

### II.3.2.3. Choix du référentiel :

De manière générale, les équations des tensions et des flux de la MAS, écrites dans le plan  $\mathbf{dq}$ , d'après (2.15), (2.16), (2.23) et (2.25), sont les suivantes :

#### a) Equations des tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.26)$$

**b) Equations des flux :**

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + L_m \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + L_m \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (2.27)$$

Cependant, nous pouvons simplifier ces équations encore en choisissant un référentiel particulier pour  $\mathbf{dq}$ . En effet, trois types de référentiels peuvent être envisagés, à savoir :

Ø **Référentiel lié au stator** : caractérisé par  $\theta_s=0$ , et par conséquence  $\theta_r = -\theta$

Le système d'équations (2.26) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \omega \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.28)$$

Où  $\omega = \frac{d\theta}{dt}$  est la pulsation mécanique.

Ø **Référentiel lié au rotor** : caractérisé par  $\theta_r=0$ , et par conséquence  $\theta_s = \theta$

Le système d'équations (2.26) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (2.29)$$

Ø **Référentiel lié au synchronisme** : dans ce cas, la vitesse de repère  $\mathbf{dq}$  est la vitesse du synchronisme  $\omega_s$  (vitesse du champ tournant), donc :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad , \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega$$

Le système d'équations (2.26) devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.30)$$

C'est dans ce référentiel que nous allons travailler par la suite. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent.

#### II.3.2.4. Expressions des puissances et du couple électromagnétique :

La détermination du couple instantané dans une machine peut être effectuée de deux manières :

- Ø Par un bilan de puissance instantanée.
- Ø Par la méthode dite "des travaux virtuels".

Nous allons utiliser la première méthode. La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes d, q est donnée par l'expression suivante :

$$P_e = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} + V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} \quad (2.31)$$

En développant cette dernière expression, nous trouvons que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$P_e = P_J + P_{em} + P_{mec} \quad (2.32)$$

Où :

$$P_J = R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (2.33)$$

$$P_{em} = I_{ds} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \cdot \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + I_{dr} \cdot \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + I_{qr} \cdot \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \quad (2.34)$$

$$P_{mec} = \omega \cdot (I_{dr} \cdot \Phi_{qr} - I_{qr} \cdot \Phi_{dr}) \quad (2.35)$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{P_{mec}}{\Omega} = P \cdot \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (2.36)$$

En tenant compte des expressions (2.27), (2.35) et (2.36), nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_e = P \cdot (I_{dr} \cdot \Phi_{qr} - I_{qr} \cdot \Phi_{dr}) \\ C_e = P \cdot (I_{qs} \cdot \Phi_{ds} - I_{ds} \cdot \Phi_{qs}) \\ C_e = P \cdot L_m (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot \frac{L_m}{L_r} (I_{qs} \cdot \Phi_{dr} - I_{ds} \cdot \Phi_{qr}) \end{cases} \quad (2.37)$$

Il nous reste maintenant à décrire l'équation mécanique de la machine asynchrone sous la forme suivante :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f' W \quad (2.38)$$

Avec :

$C_e$  : Le couple électromagnétique.

$C_r$  : Le couple résistant.

$f'$  : Le coefficient de frottement visqueux de la MAS.

$W$  : La vitesse de rotation de l'axe de la MAS.

$J$  : L'inertie des parties tournantes.

### **II.5. Conclusion :**

Dans ce deuxième chapitre, nous avons modélisé la machine asynchrone en fonctionnement dynamique car elles constituent un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.



### III.1.introduction :

La simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires. Dans ce chapitre, nous présenterons le principe de simulation d'une machine asynchrone en mode moteur et le modèle de la turbine éolienne, ainsi que le modèle de couplage générale de tout le système éolienne.

### III.2. Outil de simulation MATLAB/SIMULINK :

#### III.2.1. MATLAB :

MATLAB est un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc. Il peut être utilisé de deux façons (interactive, programmation).

- En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique.
- En mode programmation, il est possible d'écrire des programmes comme avec d'autres langages [18].

#### III.2.2.Présentation de SIMULINK :

*SIMULINK* est un logiciel qui permet de modéliser, simuler et analyser des systèmes dynamiques. Ce logiciel a été produit par la société « *The Math Works Inc* ». C'est un outil totalement intégré au noyau de calcul de *MATLAB* qui procure un environnement de modélisation basé sur des schémas-blocs. *SIMULINK* possède une interface graphique qui facilite l'analyse de systèmes dans le domaine temporel et fréquentiel. Les systèmes *SIMULINK* ne sont plus décrits par des lignes de codes *MATLAB* mais simplement définis par des schémas-blocs dont tous les éléments sont prédéfinis dans des bibliothèques de blocs

élémentaires qu'il suffit d'assembler. Le schéma bloc de la (Fig.3-1) illustre la représentation d'un tel système.

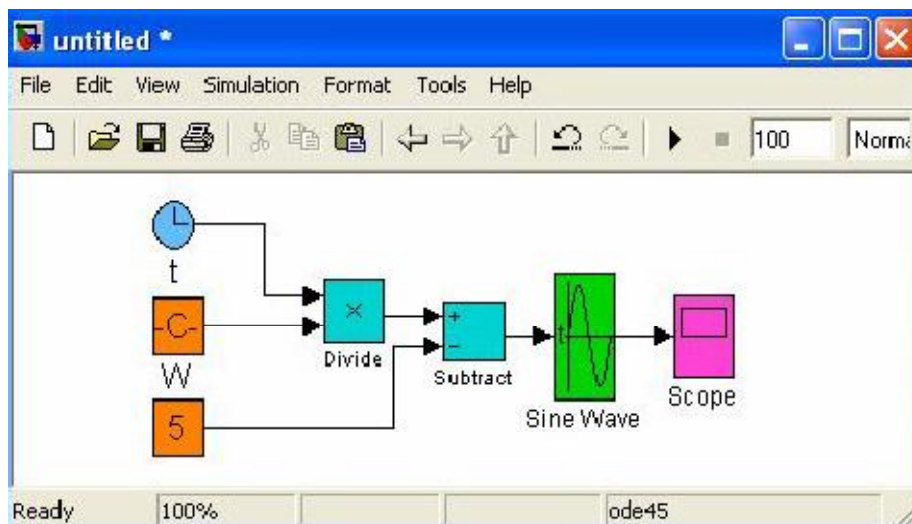


Figure .3.1. Représentation d'un système sous SIMULINK.

Le système modélisé sous *SIMULINK* peut recevoir des données de l'espace de travail de *MATLAB* ou y envoyer des données de sortie. L'échange de données entre *SIMULINK* et l'espace de travail *MATLAB* peut se faire à l'aide de variables communes ou par l'intermédiaire de fichiers MAT.

Ø *Au niveau de la modélisation SIMULINK* met à disposition :

- un éditeur graphique dans lequel les blocs sont reliés entre eux avec des fils de connexion.
- des bibliothèques de blocs paramétrables.

Ø *Au niveau de simulation SIMULINK* permet :

- la simulation de systèmes en temps continu ; discret ou hybride ;
- la simulation de systèmes linéaires (définis sous forme matricielle) et non-linéaires [17].

### III.3. Modèle d'éolienne avec Machine Asynchrone :

La figure (3.2) montre les deux parties à modéliser :

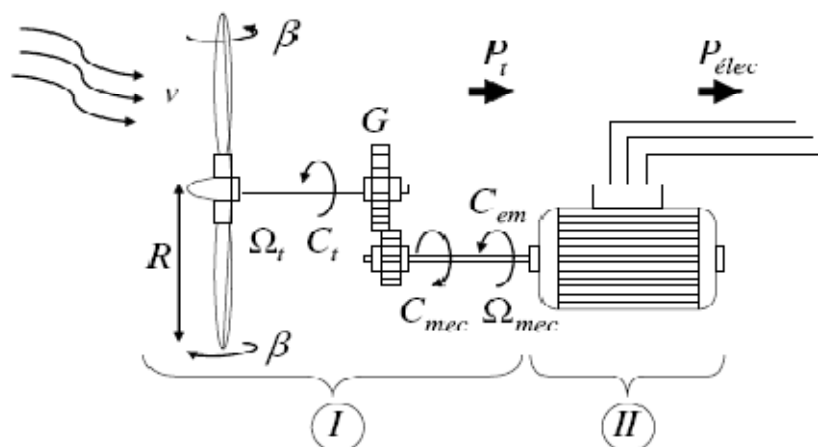


Figure.3.2 : configuration d'une éolienne.

**III-3-1.Partie mécanique :**

Sur l'arbre de l'éolienne il y a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor du générateur. La turbine éolienne se compose de plusieurs pales fixes ou orientables. 80% des fabricants fabriquent des turbines tripales pour des raisons de stabilité, de poids et de fluctuations mécaniques. La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 42 (tr / mn). Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique qui tourne à environ 1500 (tr / mn) [19].

**III.3.1.1 Modèle de la Turbine :**

L'équation mathématique suivante représente la relation entre la vitesse du vent et la puissance mécanique extraite.

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi R^2 V^3 \tag{3.1}$$

Où :

$\rho$  : La densité de l'air [Kg/m<sup>3</sup>]

$V$  : La vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance  $C_p$ ), la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 V^3 \quad (3.2)$$

Le rapport de vitesse périphérique  $\lambda$  est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{V} \quad (3.3)$$

Le couple exercé par le vent sur la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_t = \frac{P_{turbine}}{\Omega_T} \quad (3.4)$$

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient  $C_p$  et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous quatre formes déjà utilisées :

$$1) C_p(\lambda, \beta) = [0.5 - 0.167 \cdot (\beta - 2)] \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2)}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3)(\beta - 2)$$

$$2) C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3\beta - c_4 \right) e^{-c_5 \left( \frac{0.0035}{(\lambda + 0.08\beta)(\beta^3 + 1)} \right)} + c_6 \cdot \lambda$$

$$3) C_p(\lambda', \beta) = 0.22 \cdot \left( \frac{116}{\lambda'} - 0.4\beta - \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

$$4) C_p(\lambda) = 7.95633 \cdot 10^{-5} \cdot \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \cdot \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \cdot \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-2} \cdot \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-1} \lambda + 0.001$$

Où :

$$c_1 = 0.5109 \quad c_2 = 116 \quad c_3 = 0.4 \quad c_4 = 5 \quad c_5 = 21 \quad c_6 = 0.0068$$

Avec :

$\beta$  : Angle de calage (degré).

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

$\Omega_{turbine}$  : vitesse mécanique de la turbine (rad/s).

Pour notre exemple d'éolienne, le coefficient de puissance  $C_p$  est donné dans la référence [21] par la relation suivante :

$$C_p = 0.22 \cdot \left( \frac{116}{\lambda'} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) \cdot e^{-\frac{12.5}{\lambda'}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

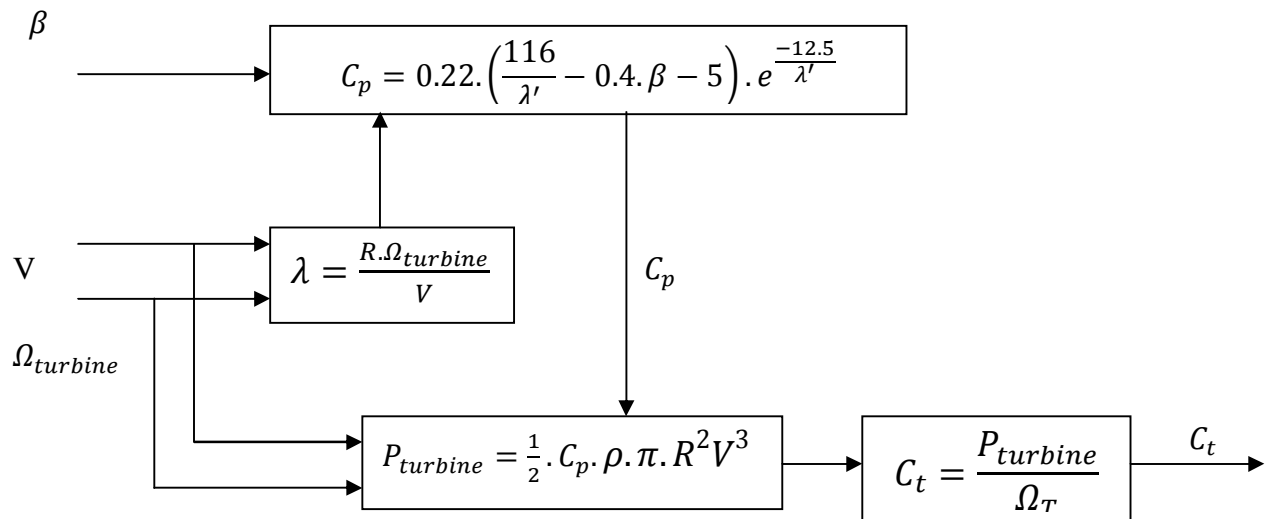


Figure3.3. modèle de la turbine éolienne [19].

Ø Schéma bloc du model de la turbine à vent :

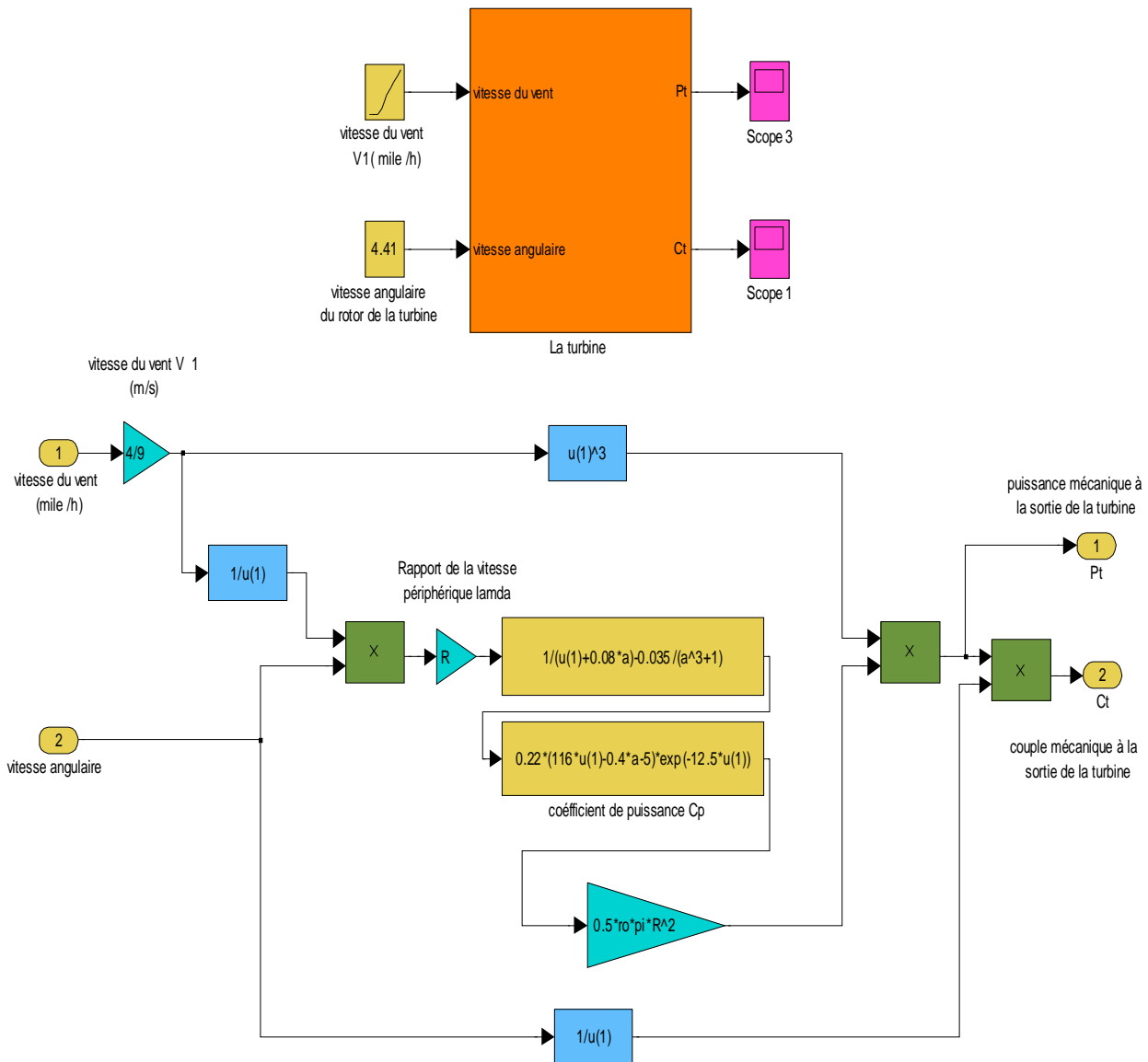
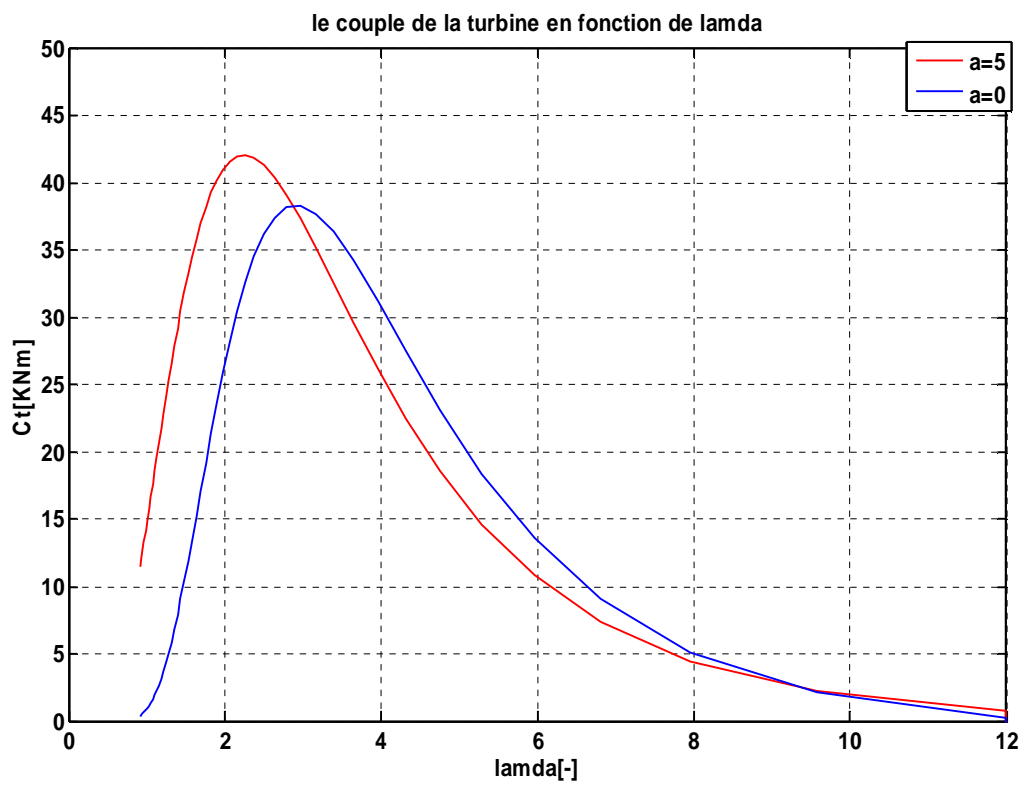
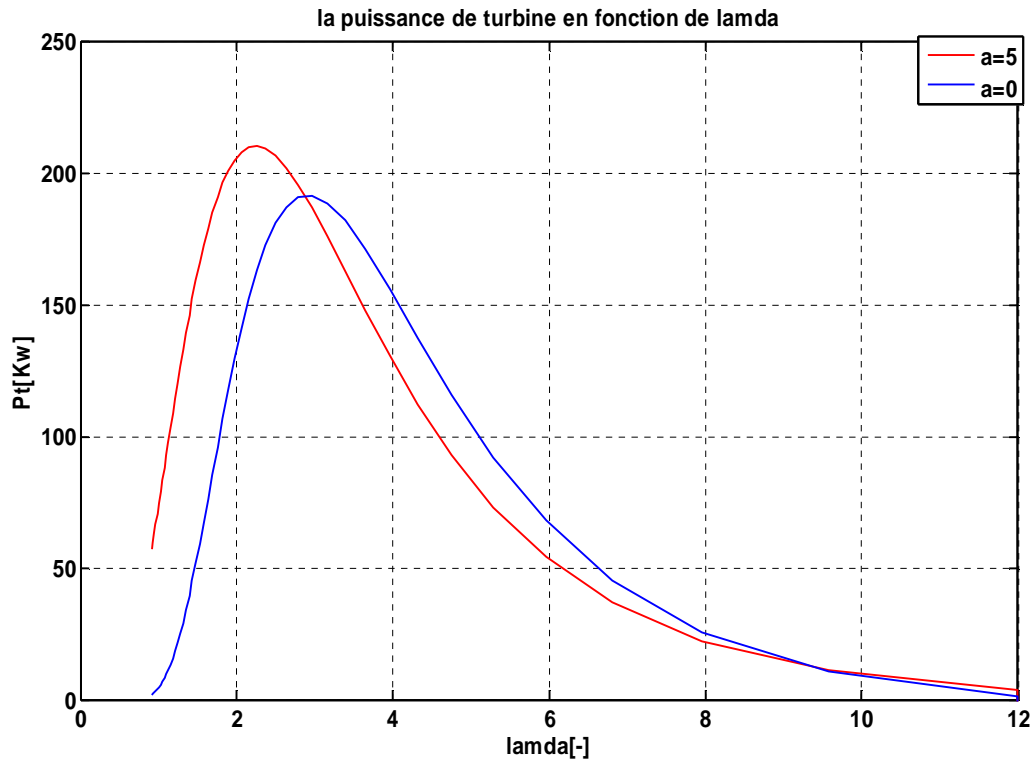


Figure.3.4. Modèle de la turbine développé sous MATLAB/SIMULINK

La turbine à vent est un système aérodynamique complexe à modéliser, dans un première temps nous allons analyser ce modèle séparément, nous considérons donc la variation de la vitesse du vent ainsi que la variation de l'angle de calage de l'éolienne ( $\beta$ ), la vitesse de rotor de la turbine est considérée constante et égale à  $\frac{2\pi f}{23.75.P} = 4.41(rad/s)$ , il s'agit d'une approximation car en réalité la vitesse en mode de fonctionnement générateur et légèrement supérieur à la vitesse de synchronisme[21].



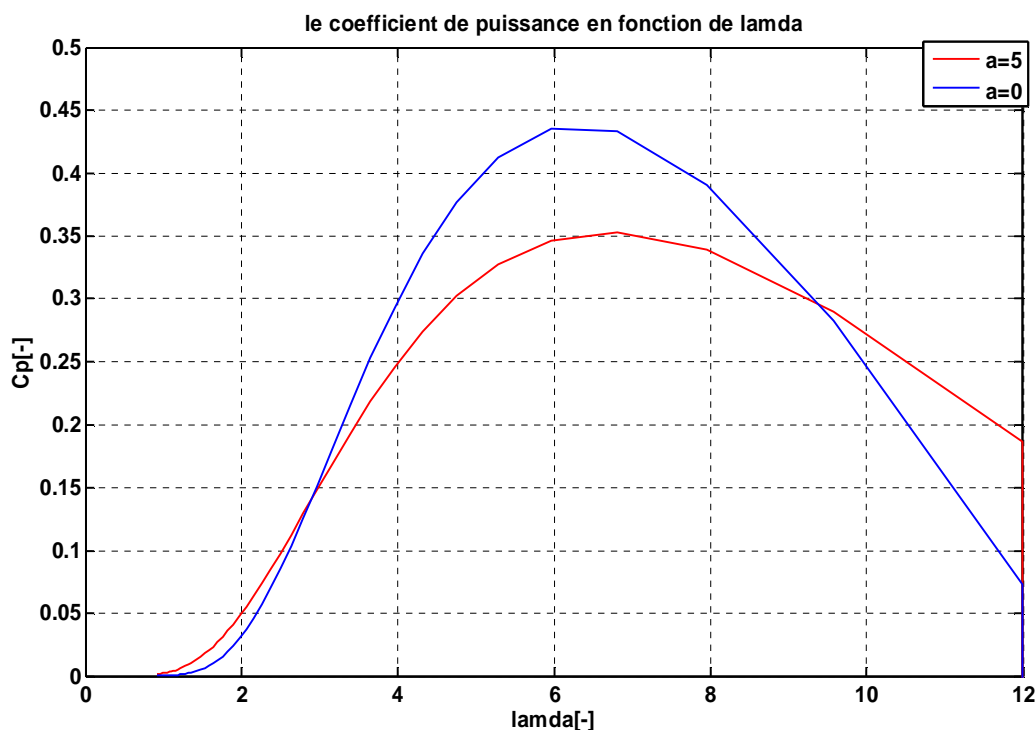


Figure.3.5.caractéristique de la puissance et du couple à la sortie de la turbine , ainsi que le coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse périphérique  $\lambda$ , pour différents valeurs de l'angle de calage des pales.

La figure (3.5) présente les courbes du couple, de la puissance ainsi que du coefficient de puissance de la turbine en fonction de  $\lambda$  qui est le rapport de vitesse périphérique pour différentes valeurs de l'angle de calage de l'éolienne. On constate que quand l'angle «  $\beta$  » augmente la puissance maximale et le couple maximal à la sortie de la turbine augmentent aussi, donc on peut dire que le couple mécanique est l'image de la puissance mécanique. Par contre la valeur maximale de la courbe du coefficient de puissance diminue quand l'angle «  $\beta$  » augmente. Pour un angle  $\beta = 0$  (valeur qu'on va utiliser par la suite, pour l'étude du système mécanique), le maximum de la puissance extraite du vent correspond à  $\lambda \approx 3$  et la valeur maximale du coefficient  $C_p$  correspond à  $\lambda \approx 6$  ; si nous choisissons de travailler initialement entre ces deux valeurs, c'est-à-dire avec  $\lambda \approx 5$ , sachant que  $\lambda = R \cdot W / V$  avec  $R = 11.6m$  et  $W \approx 4.41 \text{ rad/s}$ ; à la valeur  $\lambda = 5$  correspondra une vitesse de vent  $V = 10.23 \approx 10 \text{ m/s} \approx 23 \text{ Mile/h}$ .

### III-3-1-2.Modèle de multiplicateur :

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les

pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur, [19] [20].

$$C_{mec} = \frac{1}{K} C_t \quad (3.6)$$

Où :

$K$  : Rapport de multiplication (-).

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m).

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega_{mec} = K \cdot \Omega_t \quad (3.7)$$

Où :

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

### III.3.1.3. Modèle de l'arbre :

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \quad (3.8)$$

Où :

$J$  : Inertie totale des parties tournantes (turbine+génératrice) ( $Kg \cdot m^2$ ).

$f$  : Coefficient de frottements visqueux.

$C_T = C_{mec} + C_{em}$  : Couple total de l'éolienne (N.m).

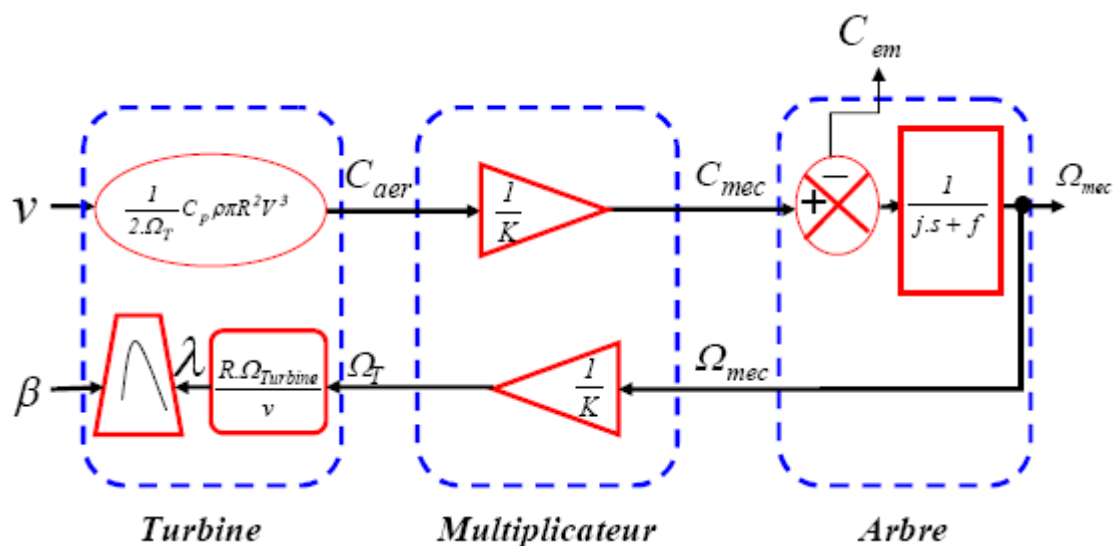
$C_{em}$  : Couple électromagnétique du générateur en (N.m).

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

L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire [19] [20]:

$$J = J_{Générateur} + \frac{J_{Turbine}}{K^2} \quad (3.9)$$

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine via un multiplicateur de vitesse [20] :



### III.3.2 Partie Électrique :

Le modèle de la génératrice asynchrone est déduit de la machine biphasée [21]; en supposant que les variables sont exprimées dans un référentiel tournant à la vitesse de synchronisme. D'après les équations (2.27), (2.30), (2.37) présentées dans le 2<sup>ème</sup> chapitre, les équations de la machine asynchrone s'écrivent ainsi :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = V_{ds} - R_s \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = V_{qs} - R_s \cdot I_{qs} - \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = -R_r \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{qr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = -R_r \cdot I_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{dr} \end{cases}$$

$$C_e = P \cdot L_{sr} (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{ds} \cdot I_{qr})$$

$$I_s = \frac{L_r \cdot \Phi_s - L_{sr} \Phi_r}{L_s \cdot I_r - L_{sr}^2}$$

$$I_r = \frac{L_s \cdot \Phi_r - L_{sr} \Phi_s}{L_s \cdot I_r - L_{sr}^2}$$

#### Ø Schéma bloc du model de la machine asynchrone :

Le schéma bloc de la machine asynchrone, qui n'est que l'image des équations déjà exposées, est illustré sur la figure (3.6), Les entrées sont les tensions statoriques, la pulsation



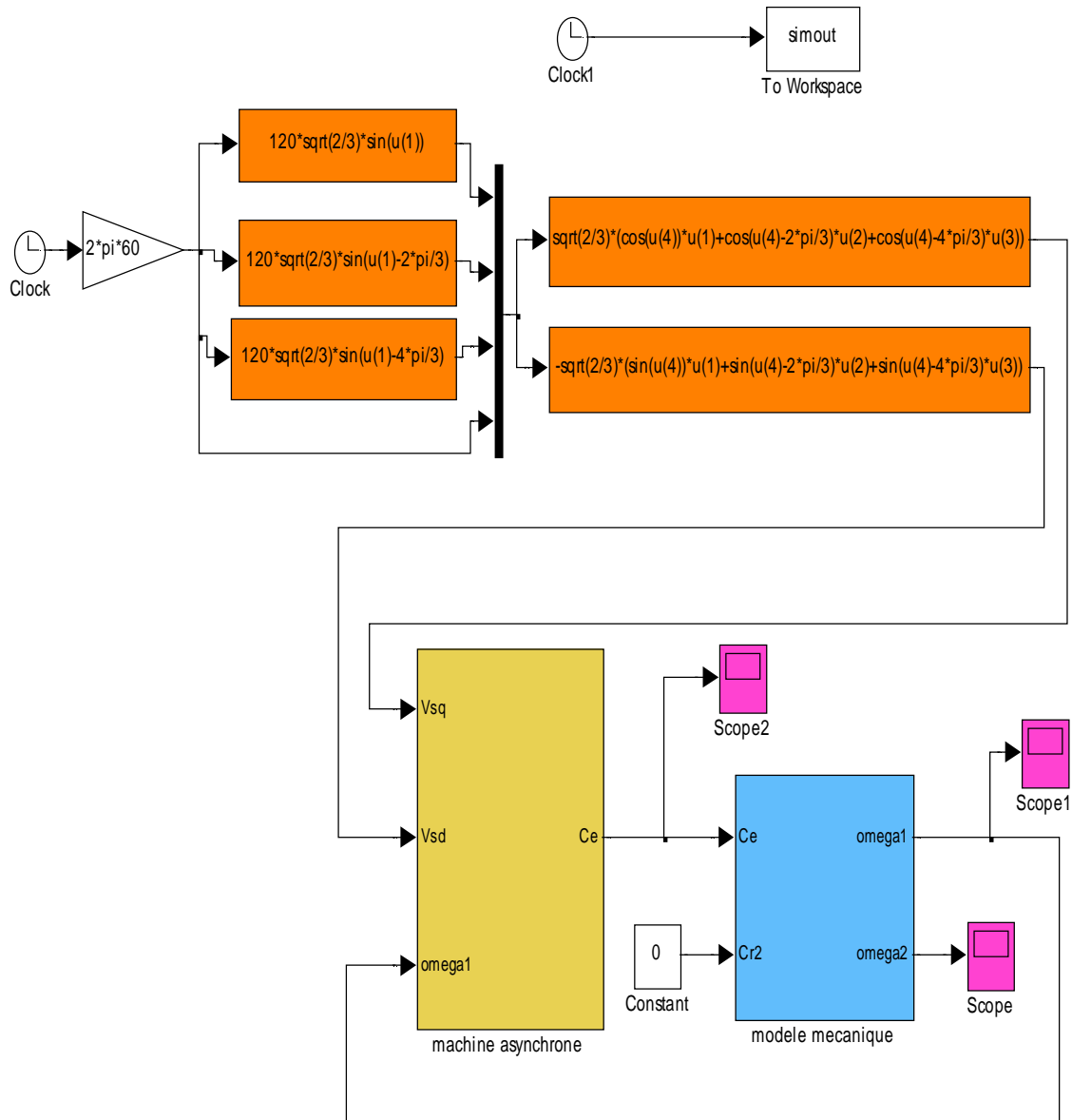


Figure .3.7 . Schémas de simulation d'un moteur asynchrone couplé avec le modèle mécanique

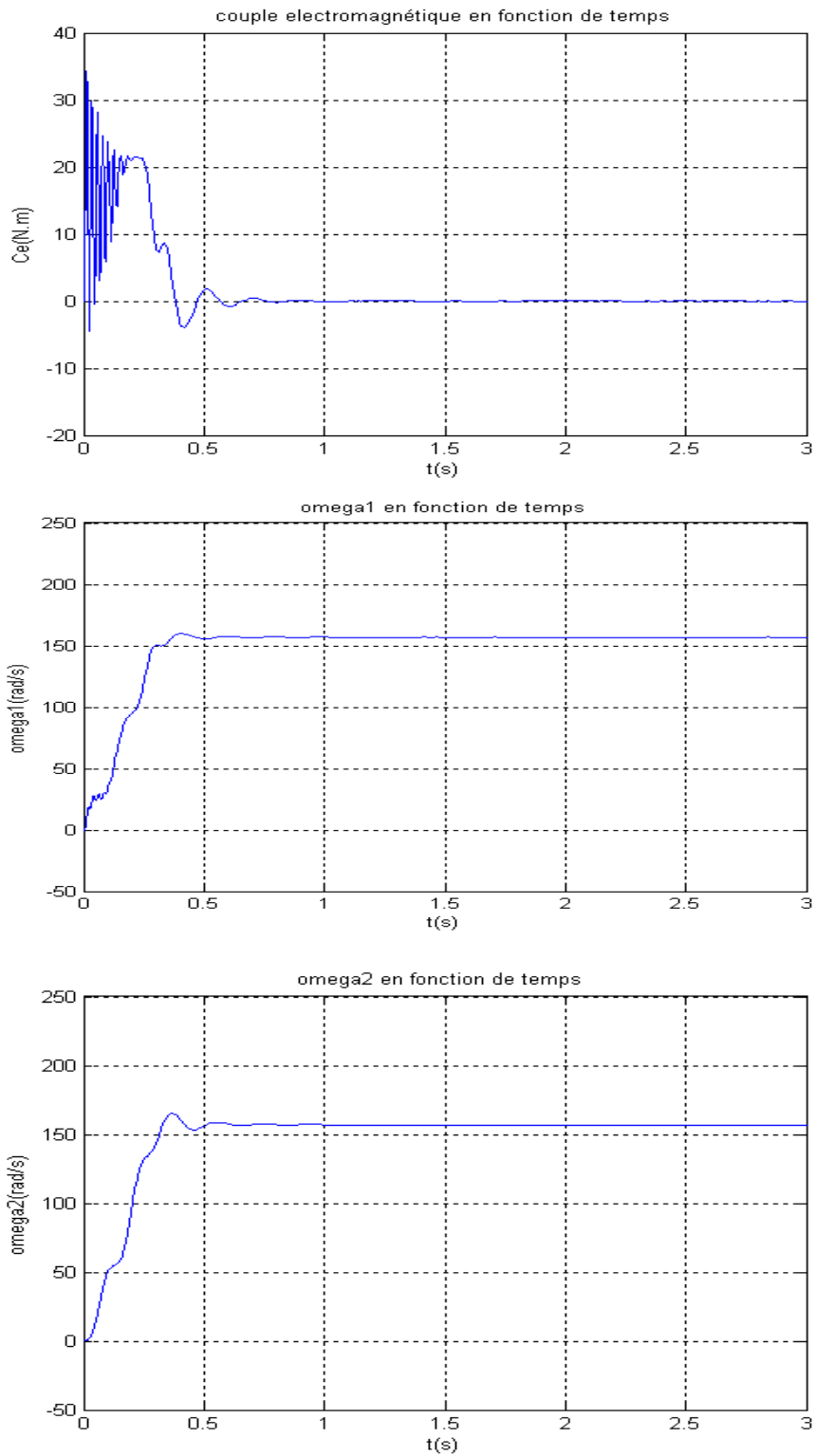


Figure.3.8.courbes au démarrage, du couple électromagnétique et de la vitesse de rotation (M. asynchrone/Matlab-Simulink).

Ø Évolution du couple électromagnétique

Les résultats de simulation présentés à la figure (3.8), montre l’allure du couple électromagnétique. Le couple subit des oscillations importantes dans le régime transitoire et à partir de  $t=0.7s$  elle tend vers zéro dans le régime permanent, et particulièrement la mise en valeur du phénomène oscillatoire lié à la structure du système mécanique dans un entrainement électrique à base de moteur asynchrone.

Ø Évolution de la vitesse de rotation

La figure (3.8) représente la courbe de la vitesse de rotation angulaire ( $\omega_1$ ) de la machine et la vitesse de rotation ( $\omega_2$ ) de la partie mécanique accouplée à la machine. Les oscillations de couple se font évidemment ressentir sur l’évolution de la vitesse qui se stabilise en régime permanent à 153 rad/s (1500 tr/min) puisque le moteur possède 2 paires de pôles.

Ø Schéma bloc du model de la machine asynchrone couplé avec la turbine via un système mécanique :

Le modèle de tout le système composé de la machine asynchrone, de la turbine à vent ainsi que du système mécanique, tel que développé sous Matlab-Simulink est le suivant :

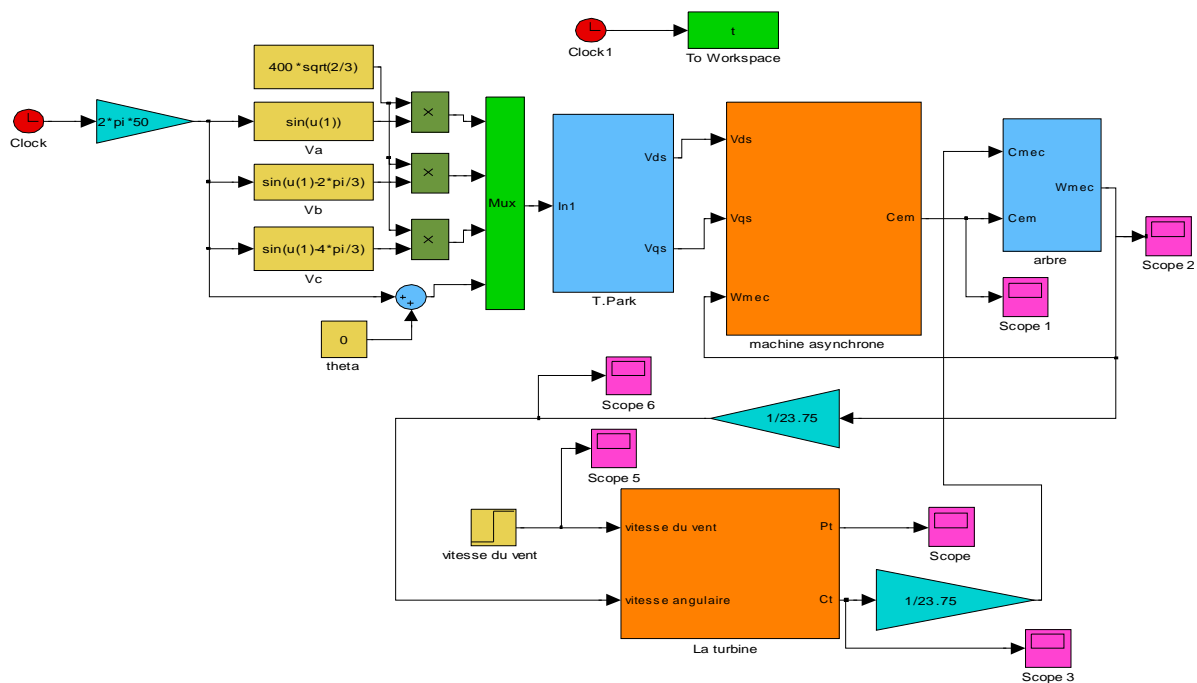
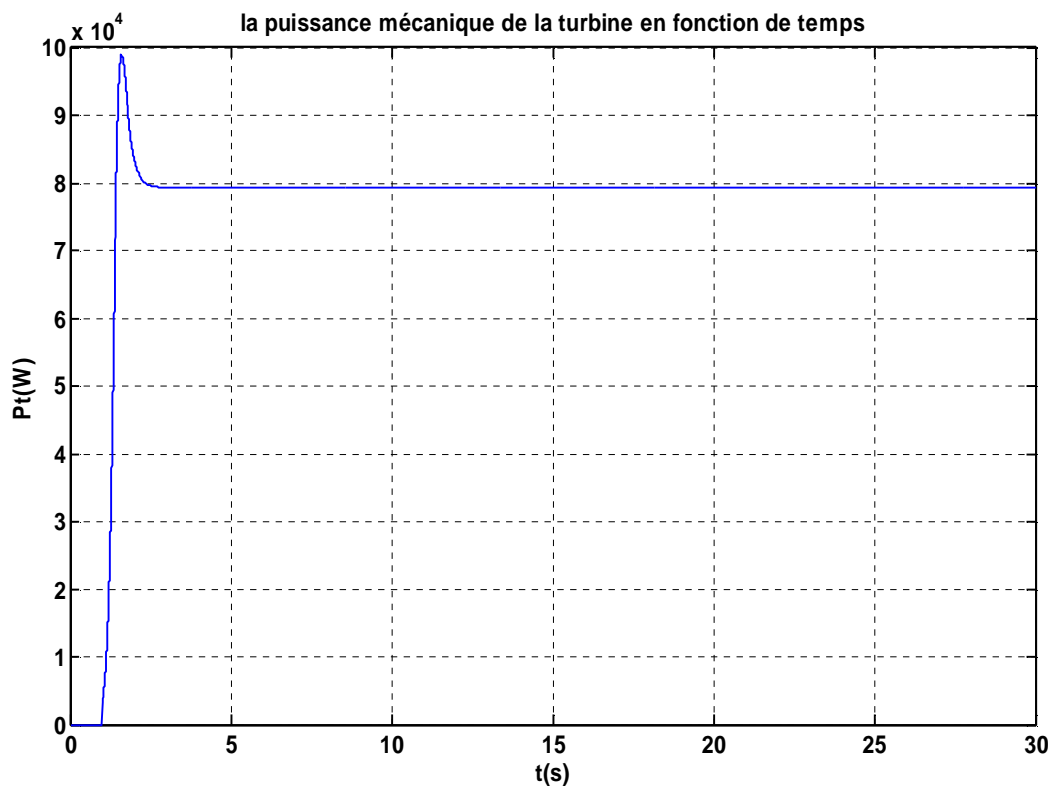
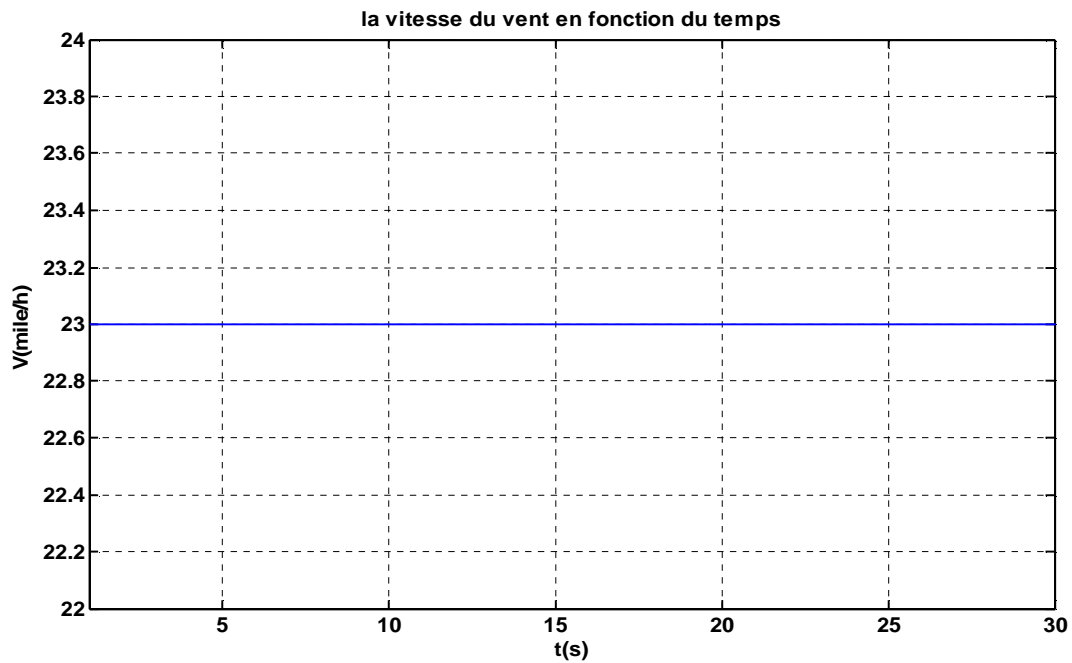
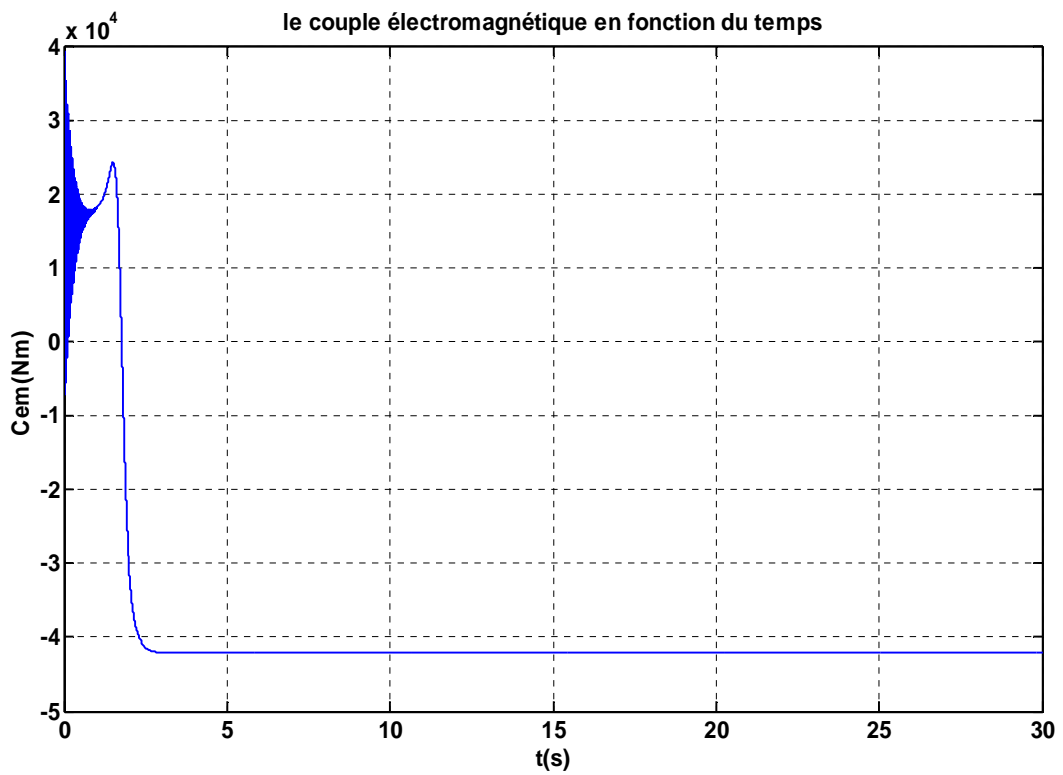
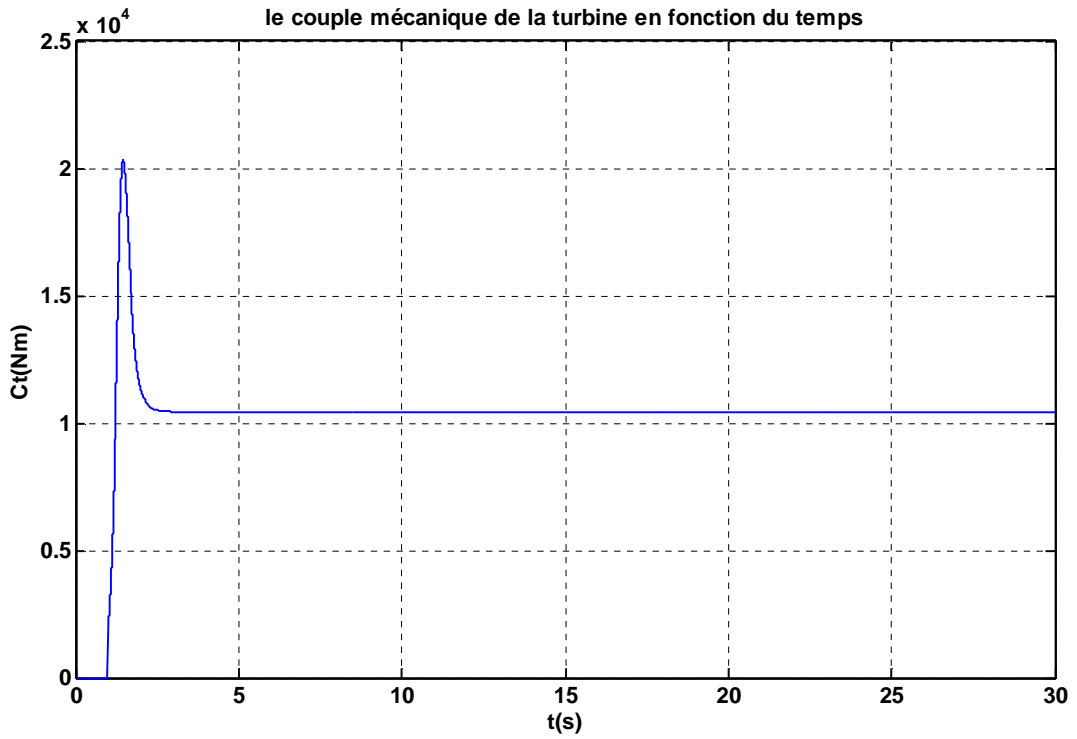


Figure.3.8. Schéma de simulation developpé sous Matlab-Simulink du système de l’éolienne composé de la machine asynchrone, de la turbine à vent et du système mécanique.

Les courbes obtenues par la simulation à l'aide du modèle de la figure (3.8) sont présentées ci-dessous.

Les paramètres de simulation de tout le système éolienne sans présentés dans l'annexeA.





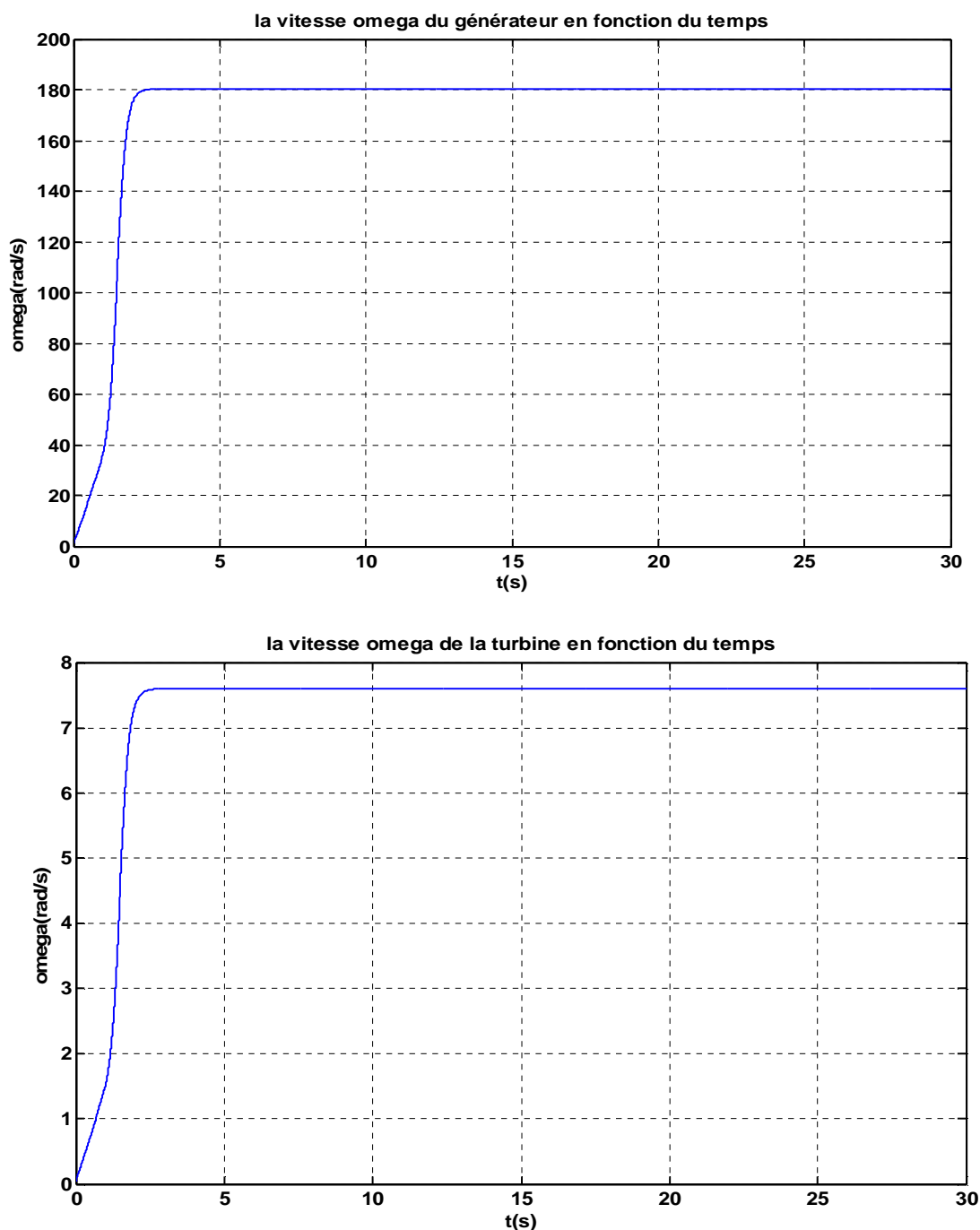


Figure.3.9. Courbes au démarrage de la puissance, du couple et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse de la génératrice pour une vitesse du vent constante  $V_{vent} = 23 \text{ mile/h}$ .

Les courbes de la Figure (3.9) présentent les résultats de la simulation du modèle général pour une vitesse de vent  $V_{vent} = 23 \text{ mile/h}$ . La 5<sup>ème</sup> et la 6<sup>ème</sup> courbe montre l'évolution de la vitesse de rotation de la machine et de la turbine qui est respectivement de  $180 \text{ rad/s}$  et  $7.6 \text{ rad/s}$  pour une vitesse du vent de  $23 \text{ mile/h}$ . La 2<sup>ème</sup> courbe présente

l'évolution de la puissance qui atteint alors sa puissance nominale qui correspond à 80 KW , Cette courbe est caractérisée par un régime transitoire au démarrage, et à partir de  $t=2.5s$  elle se stabilise en régime permanent. Cette puissance nominale correspond à un couple nominal de 10.5 KN.m.

L'évolution du couple électromagnétique est représentée sur la 4<sup>ème</sup> courbe, où le couple subit des oscillations au démarrage. À partir de l'instant  $t=2.5s$ , le couple passe subitement à une valeur de -42KN.m (il se stabilise au régime permanent) pour vaincre le couple de charge appliqué. Le signe négatif justifie sa qualité en tant que couple résistant correspond au fonctionnement génératrice.

La puissance du générateur éolien est limitée lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale ; à ce moment la puissance de l'éolienne est limitée. La limitation de puissance va tendre à faire accélérer la machine, cette vitesse sera limitée par l'intermédiaire de l'angle de calage.

Avec la comparaison des résultats que nous avons obtenus et interprétés aux résultats trouvées par l'école Polytechnique de Montréal (Canada) dans les même conditions, c'est-à-dire pour  $V_{vent} = 23 \text{ mile/h}$  et  $\beta = 0$  nous remarquons qu'ils sont des résultats très proches.

#### **III.4.Conclusion**

Dans ce chapitre, dans un premier temps, nous avons fait la simulation du modèle théorique de la turbine à vent pour analyser ce modèle séparément, en prenant en considération la variation de l'angle de calage  $\beta$  de l'éolienne ; une fois qu'on a confirmé que le block de la turbine fonctionne, nous avons composé le modèle de tout le système qui inclut la turbine à vent et la génératrice asynchrone, ainsi que le système mécanique.

Nous avons obtenu et interprété les courbes des puissances, des couples et de la vitesse de la turbine, ainsi que du couple électromagnétique et de la vitesse de la génératrice asynchrone.

## Conclusion générale et perspectives

---

### Conclusion générale et perspectives :

A la lumière de notre travail, nous avons pu aborder les différents problèmes liés à l'utilisation des machines asynchrones en fonctionnement génératrice, notamment leurs adaptations dans un système éolien. Dans ce mémoire, notre étude s'est portée essentiellement sur la machine asynchrone à cage d'écurie, qui est la plus utilisée dans l'industrie. Ainsi que la réalisation d'un simulateur physique de turbine éolienne.

Dans le premier chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation. Dans ce qui suit nous avons établi un modèle mathématique de la turbine à partir de ses équations caractéristiques. Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants. Enfin nous avons étudié les générateurs les plus utilisés dans la conversion de l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, notamment les génératrices asynchrones.

Et dans le deuxième chapitre nous avons présenté, la modélisation de la machine asynchrone triphasé à cage alimentée en tensions sous forme d'équations mathématiques (équations électriques et mécaniques), et le modèle de transformation de Park qui consiste à une transformation d'un système triphasé en un système diphasé équivalent.

Enfin, au troisième et dernier chapitre, nous avons modélisé et simulé la turbine éolienne. Dans un premier temps, on a fait la simulation du modèle théorique de la turbine pour analyser ce modèle séparément, une fois qu'on a confirmé que le block de la turbine fonctionne, on a composé le modèle de tout le système qui inclut la turbine et la génératrice asynchrone, Ce modèle de simulation a été développé sous environnement *SIMULINK* à partir de données (voir

## Conclusion générale et perspectives

---

annexe A). Les résultats de simulation obtenus à l'aide des deux logiciels (Matlab/Simulink) nous ont permis, en plus de la validation des deux modèles en mode générateur, de mettre en évidence le phénomène vibratoire du système éolien. Dans cette étude nous n'avons pas tenu compte l'analyse du comportement de l'éolienne de la variation continue et aléatoire du vent.

Suite à ces observations et résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de l'éolienne sont envisageables :

- Ø Un premier point qui nous paraît intéressant concerne la réalisation d'une plateforme expérimentale permettant de tester en temps réel le comportement d'un générateur éolien à vitesse variable débitant sur différents types de charges et de valider les résultats des simulations présentées dans ce mémoire.
- Ø Il serait aussi intéressant de développer un système de commande de l'aérogénérateur qui adapte les variations de l'angle de calage de la pale (*pitch control*) aux variations du vent pour pouvoir contrôler la puissance générée.
- Ø Étude des performances et les limites de l'utilisation d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil par une batterie de condensateurs.
- Ø Intégration éventuelle d'un système de stockage et optimisation technique et économique de la chaîne de conversion.

## ANNEXE A

Tableau A-1 : Les paramètres du système de l'éolienne.

Données de la turbine à vent	
Puissance nominale	$P_n = 180 \text{ kW}$
Diamètre du rotor	$D = 23,2 \text{ m}$
Vitesse du rotor	$\Omega = 42 \text{ tr/min}$
Rapport de la boîte de vitesse	23,75
Nombre de pales	3
<i>Données admises</i>	
Densité de l'air	$\rho = 1 \text{ kg/m}^3$
Données de l'entraînement mécanique à deux masses	
Moment d'inertie de la turbine	$J_T = 102,8 \text{ kgm}^2$
Moment d'inertie du générateur	$J_G = 4,5 \text{ kgm}^2$
Coefficient de rigidité	$K_{1,2} = 2700 \text{ Nm/rad}$
Coefficient d'amortissement	$\beta_{1,2} = 0.1 \text{ Nms/rad}$
<i>Toutes les données sont référées à la plus haute vitesse (vitesse du rotor du générateur)</i>	
Données du générateur asynchrone	
$3\phi, 400\text{-V}, 50\text{-Hz}$	
Nombre de paires de pôles	$p = 3$
Résistance du stator	$R_s = 0,0092\Omega$
Résistance du rotor <i>(référé au stator)</i>	$R_r = 0,0061\Omega$
Inductance de fuite du stator	$L_{ls} = 186\mu\text{H} \quad (L_s = L_{ls} + L_m)$
Inductance de fuite du rotor <i>(référé au stator)</i>	$L_{lr} = 427\mu\text{H} \quad (L_r = L_{lr} + L_m)$
Inductance de magnétisation	$L_m = 6,7 \text{ mH} \quad (L_{sr} = L_m)$

$V_W$ (m/s)	$C_p$ (-)	$\lambda$ (-)
5.3100	0.3200	9.5492
5.7700	0.3450	8.7879
6.2600	0.3790	8.1001
6.7500	0.4140	7.5121
7.2500	0.4360	6.9940
7.7500	0.4470	6.5428
8.2500	0.4470	6.1462
8.7400	0.4450	5.8016
9.2400	0.4380	5.4877
9.7400	0.4280	5.2060
10.2400	0.4150	4.9518
10.7400	0.3970	4.7213
11.2400	0.3750	4.5112
11.7300	0.3560	4.3228
12.2300	0.3340	4.1461
12.7300	0.3130	3.9832
13.2300	0.2910	3.8327
13.7300	0.2650	3.6931
14.0000	0.2518	3.6219
15.0000	0.2047	3.3804
16.0000	0.1687	3.1692
17.0000	0.1406	2.9827
18.0000	0.1185	2.8170
19.0000	0.1007	2.6688
20.0000	0.0864	2.5353
21.0000	0.0746	2.4146
22.0000	0.0649	2.3048
23.0000	0.0568	2.2046
24.0000	0.0500	2.1128

Tableau A-2 : donnée de la courbe de coefficient  $C_p$

□ □

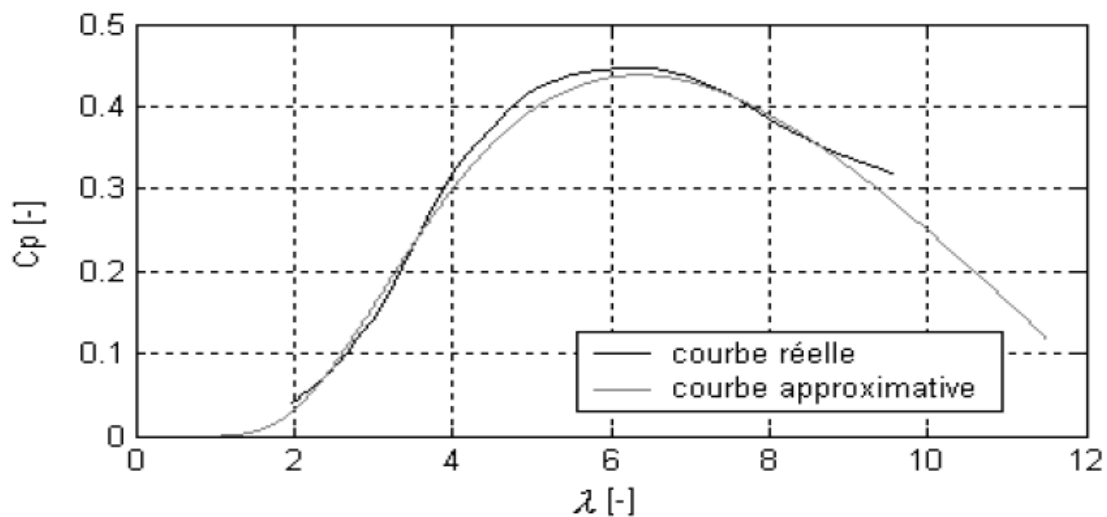


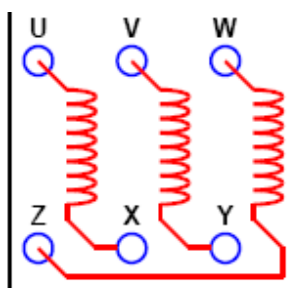
Figure A-3 courbe réelle et approximative de coefficient de puissance  $C_p$ . □ □ □

# ANNEXE B

## B. Constitution d'une machine asynchrone industrielle

### B.1. Le stator

Cette partie fixe (comme son nom l'indique !) de la machine crée le champ tournant. Elle est organisée en un circuit magnétique circulaire et creux. Sur la périphérie intérieure des encoches sont aménagées pour recevoir les enroulements du bobinage. Aucun élément n'est saillant, les pôles sont lisses. Son alimentation peut être effectuée directement par le réseau industriel triphasé ou par le biais d'un convertisseur d'énergie adapté pour permettre une variation de vitesse. Cette partie sera abordée ultérieurement. Les enroulements statoriques sont libres de couplage (Figure 1-B). Chacune est accessible par ses deux bornes de connexion.



*Figure 1-B : Plaque à bornes statorique.*

La disposition physique en deux rangées de trois bornes permet d'effectuer de manière aisée le couplage des enroulements : interconnexion de X, Y et Z et alimentation par U, V et W en étoile (Figure 2-B) ou interconnexion et alimentation par les liaisons U-Z, V-X et W-Y pour le couplage triangle (Figure 3-B).

C'est aussi ce repérage qui est noté sur le symbole de la machine (Figure 4-B).

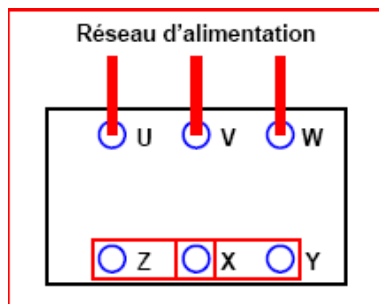


Figure 2-B : couplage étoile

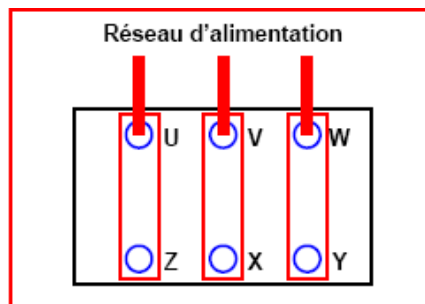


figure3-B: couplage triangle

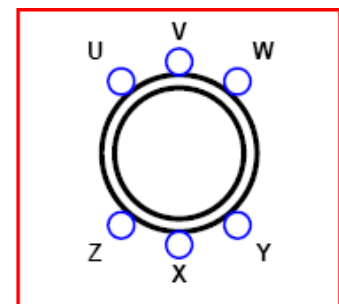


figure 4-B: symbole

Les grandeurs électriques sont variables, elles induisent donc des grandeurs magnétiques variables. Pour minimiser les pertes fer, le circuit magnétique est feuilleté par empilement de tôles d'acier au silicium laminées à chaud (Voir cours « les circuits magnétiques en régime sinusoïdal »). Le stator est fixé sur une carcasse moulée ou mécano-soudée dont les seules qualités retenues sont mécaniques (manutention, fixation, robustesse, etc.) et fonctionnelles (accessibilité des liaisons électriques).

### III.2. L'entrefer

Cette partie amagnétique (c'est de l'air !) est d'épaisseur la plus faible possible (de l'ordre du millimètre). Cette caractéristique appelle plusieurs remarques : • l'épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches. Pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. • sur les machines volumineuses, une si faible épaisseur impose peu de fléchissement de la partie centrale. Il doit en être tenu compte dans le dimensionnement mécanique.

### III.3. Le rotor

C'est par le rotor, la partie mobile, que la machine asynchrone se distingue de l'autre machine triphasée, la machine synchrone. De manière générale, le rotor est le siège de grandeurs électromagnétiques variables. Pour limiter les pertes, le circuit magnétique sera donc feuilleté. Les enroulements rotoriques sont toujours en court-circuit. Les différentes propriétés du circuit

électrique seront développées dans la partie relative à la modélisation de la MAS. Mais d'ores et déjà, suivant les caractéristiques électromécaniques que l'on souhaite obtenir, on développe des rotors à cage ou bobinés.

### III.3.1. Rotor de machine asynchrone à cage

La partie électrique du rotor est constituée de barres conductrices en cuivre placées dans les encoches rotoriques. Elles sont mises en court-circuit permanent par deux anneaux de court-circuit serties de part et d'autre du rotor (*Figure 5-B*). Un autre procédé de fabrication consiste à mouler le circuit électrique rotorique en coulant de l'aluminium dans les encoches fermées aménagées dans le circuit magnétique. L'intérêt essentiel de ce procédé est la grande robustesse du rotor, une fabrication aisée et un faible coût de réalisation pour des machines sans pratiquement aucun entretien. De plus, pour éviter les harmoniques d'encoches rotoriques, les conducteurs sont inclinés par rapport à l'axe du rotor (*Figure 6-B*).

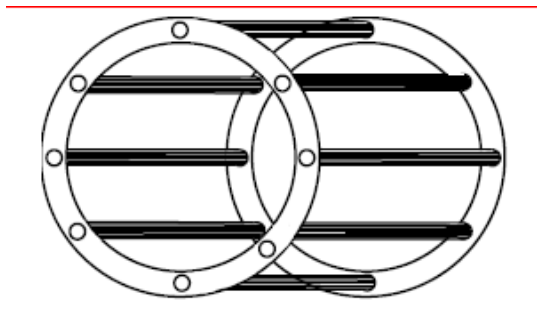


Figure 5-B : rotor à cage (*dite d'écureuil*).

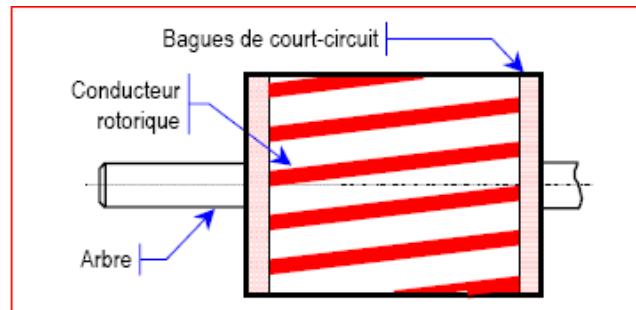


Figure 6-B : : Autre vue d'un rotor à cage.

La vue éclatée de la Figure 7-B permet d'apprécier l'organisation générale de la machine

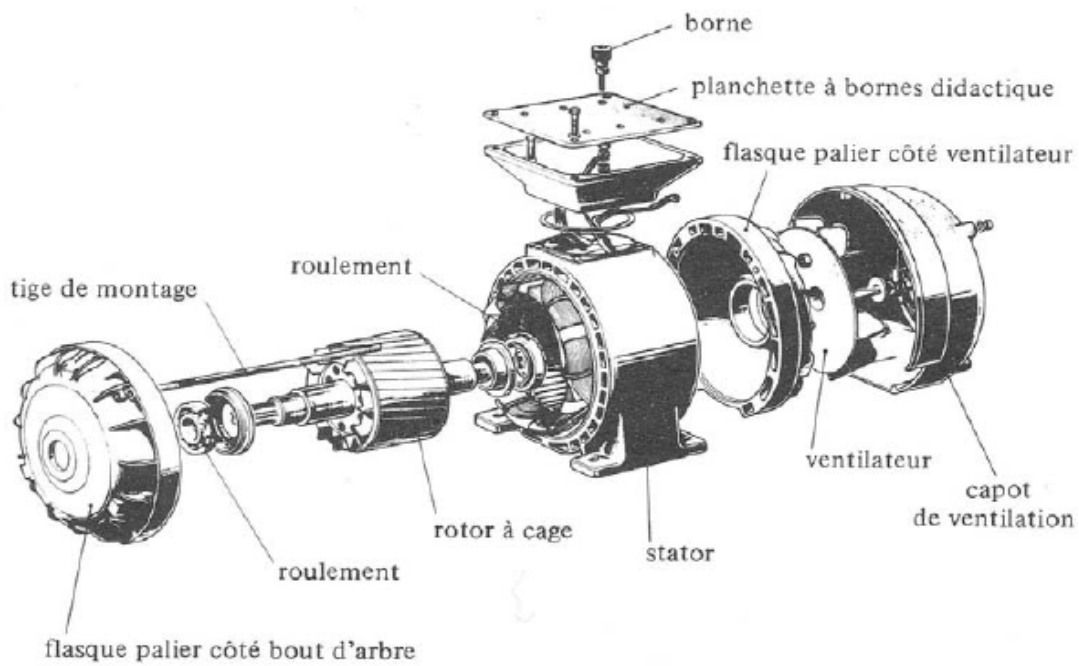


Figure 7-B : Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à cage.

### III.3.2. Machine asynchrone à rotor bobiné (ou à bagues)

Le rotor est bobiné de manière à obtenir aussi  $p$  paires de pôles. Mais à la différence du rotor à cage, il est facile de choisir un nombre de spires par enroulement différent (Figure 8-B)

Le rotor est mis en court-circuit par l'extérieur au travers de trois bornes liées électriquement par des contacts glissants appelés bagues réalisées en laiton sur lesquelles s'appliquent des balais de graphite.

Les trois enroulements rotoriques sont couplés en étoile à l'intérieur de la machine (Figure9-B).

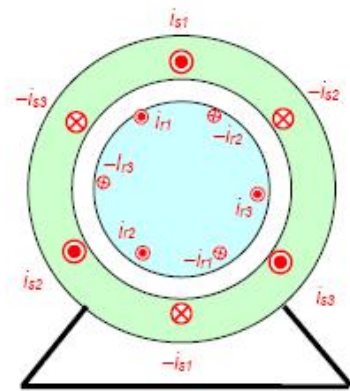


Figure 8-B : Enroulements ( $p = 1$ ).

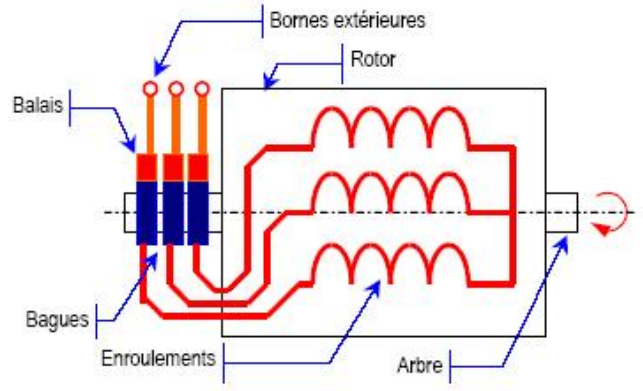


Figure 9-B : Constitution du rotor bobiné.

La vue éclatée de la Figure 10-B permet d'apprécier l'organisation générale de la machine.

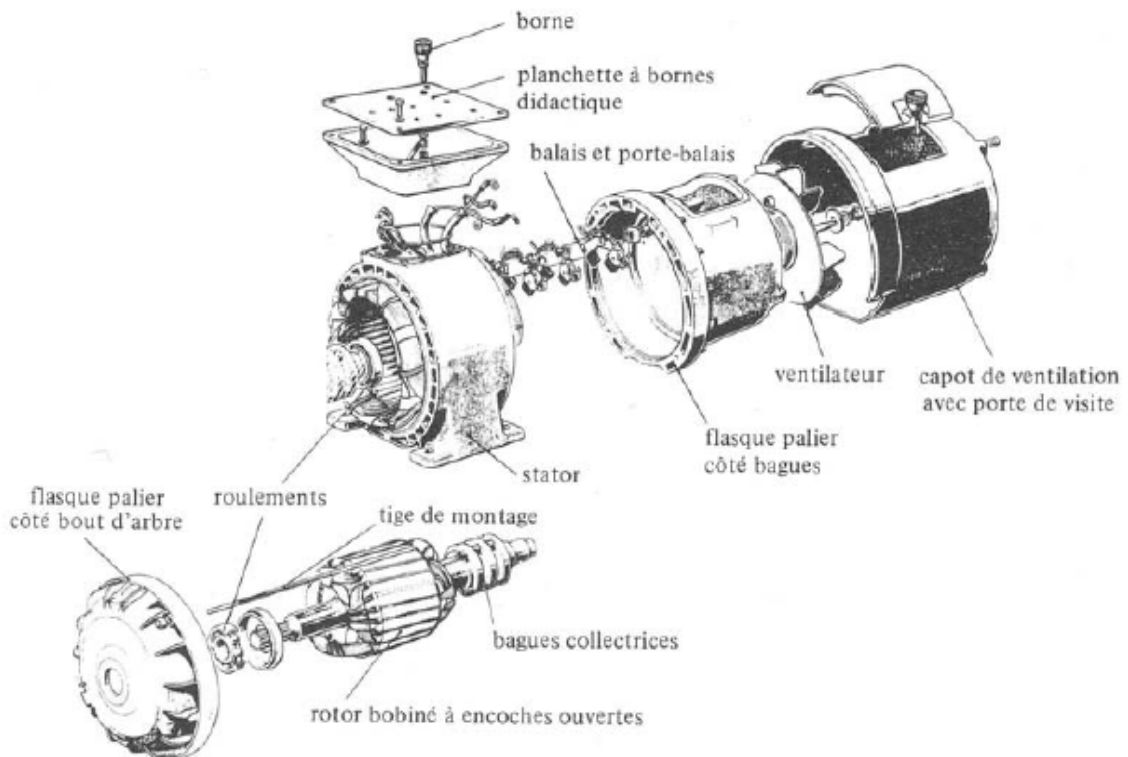


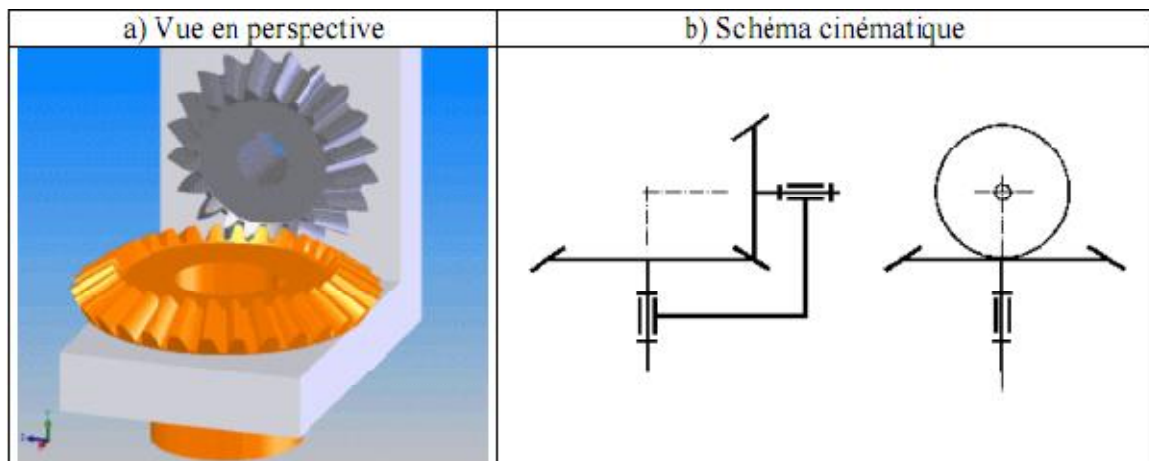
Figure 10-B : Vue éclatée d'une machine asynchrone triphasée à bagues.

# ANNEXE C

## C : Les différents types de multiplicateurs de vitesse utilisés dans les aérogénérateurs :

La transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine a celle du convertisseur Électromécanique. Parmi les différents types de multiplicateurs de vitesse qui existent, les Trois types les plus utilisés dans les aérogénérateurs sont :

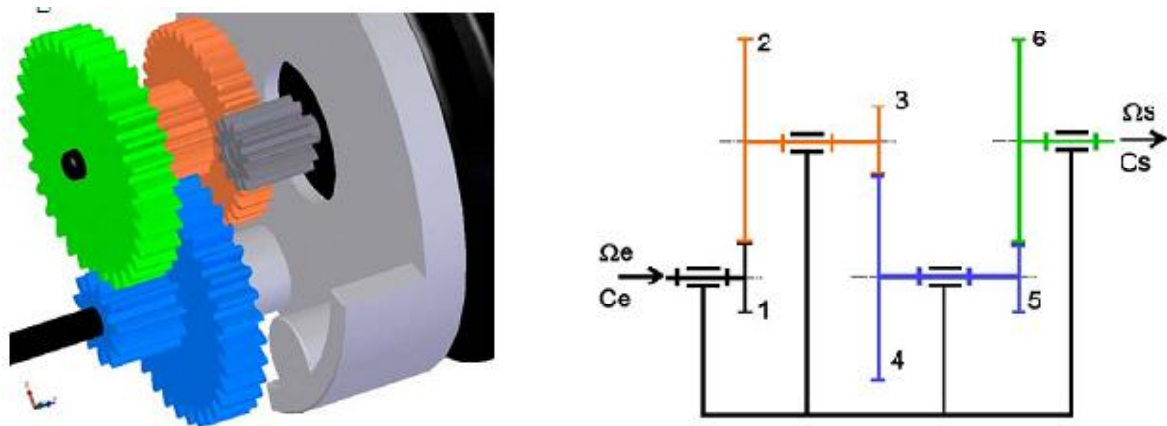
Ø **Multiplicateur à couple conique** : où l'arbre de sortie est perpendiculaire a l'arbre d'entrée( figure C-1).



**Figure C-1** : multiplicateur à couple conique

Ø **Multiplicateur à engrenages** :

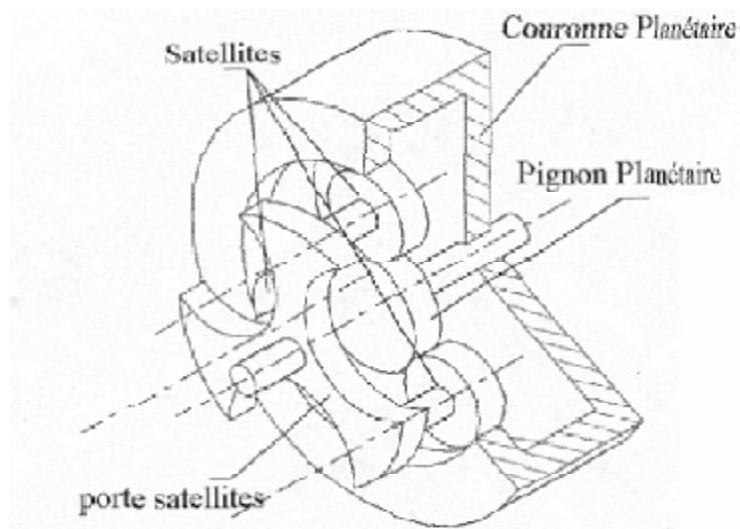
constitue d'un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques. La fonction d'un engrenage est de transmettre un mouvement de rotation entre deux arbres proches (figure :C-2).



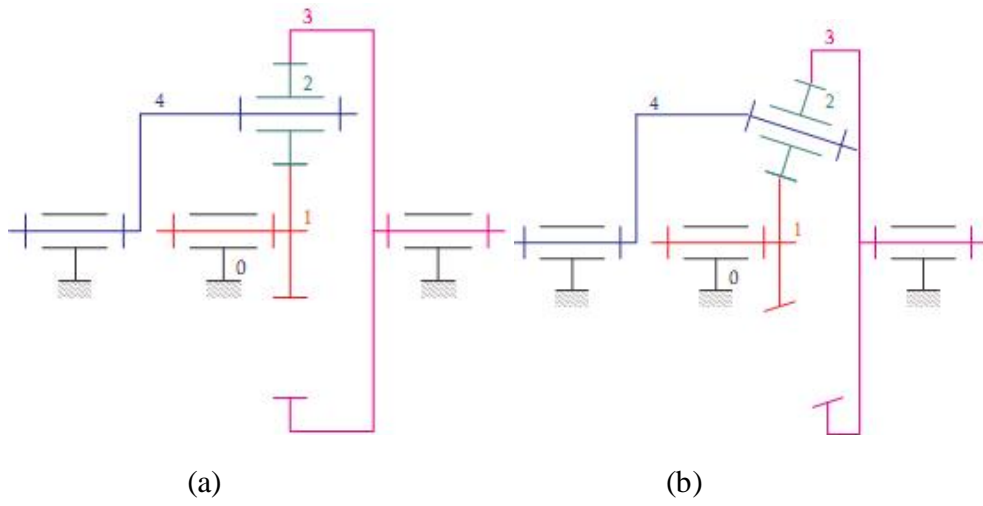
**Figure C-2:** Multiplicateur à engrenages cylindriques à trois étages.

### Ø Multiplicateur à satellite :

L'utilisation des trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées pour un encombrement réduit. Sous le nom de train épicycloïdal ou engrenage planétaire, on désigne un système de transmission de puissance entre deux ou plusieurs arbres dont certains tournent non seulement autour de leur propre axe, mais aussi avec leur axe autour d'un autre axe. Les engrenages peuvent être cylindriques ou coniques. Ceux dont l'axe coïncide avec un axe fixe dans l'espace s'appellent « planètes » et ceux qui tournent avec leur axe autour d'un autre s'appellent « satellites » (figure C-3) . Ces derniers sont généralement maintenus par un châssis mobile nommé « porte satellite ».



**Figure C-3 :** multiplicateur à satellite



**Figure C-4** : train plan (a), et train sphérique (b).

# Bibliographie

[1] : Par Armand BOYETTE « contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, le 11 décembre 2006.

[2] : MOUSSA SIDDO Abdoulaziz ; SOUMANA NOUHOU Ibrahim, « étude de générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Thèse d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, promotion 2007.

[3] : A. Tounzi, « Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité », Revue 3EI, Mars 2000, pp. 24-38.

[4] : J. Ancel, « Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.

[5] : P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Eoliennes », Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.

[6] : Ecole Mohammadia d'ingénieurs « Gestion de projets industriels »

[7] : 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.

[8] : Désiré Le Gourières, « Les Éoliennes - Théorie, Conception Et Calcul Pratique » Éditions Du Moulin Cadiou, Paris, 2008 - 306 p. ISBN13 : 978-2953004106.

[9] : FEYROUZ MESSAI , « Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable », Thèse de magister en Electrotechnique, soutenu 2009.

[10] : Mme DRICHE ; Mr DJEBRANI et DJEMAI : « modélisation et simulation d'un générateur asynchrone connecté au réseau », Thèse d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, promotion 2008.

[11] : Benoit ROBYNS, Bruno FRANCOIS, Philippe DEGOBERT, Jean-Paul HAUTIER : « commande vectorielle de la machine asynchrone », 14<sup>e</sup> électrotechnique.

[12] : Association Danoise de l'industrie éolienne, 1997-2003.

[13] : Présenté et étudié par : ACHOURI Radouane et HIDOUCHE Mohamed : « commande vectorielle de la machine asynchrone », Thèse d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, Ecole nationale polytechnique, Juin 2007.

[14] : J.P.CARON ET J.P.HAUTIER, « modélisation et commande de la machine asynchrone », 7<sup>e</sup> électrotechnique.

[15] : Fabrice Sincère : « Chapitre 7 sur la Machine asynchrone triphasée », Electrotechnique, version 3.0.3.

[16] : Mr : SIAM Rabah et BENMESLI Saad : « étude et simulation d'un aérogénérateur éolien », Thèse d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique, UMMTO, département d'électrotechnique, 2010.

[17] : Mr : KHALED FERKOUS : « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », Thèse de magister en Electrotechnique, Université MENTOURI Constantine, le 27 /05 / 2009.

[18] : Mamadou Lamine Doumbia, Ingénieur de Recherche, et Abdoulaye Traoré, Directeur adjoint : « Modélisation et Simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK».

[19] : Par : KHALED FERKOUS : « Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de Doctorat, L'école doctorale électronique, électrotechnique, automatique de Lyon, Année 2008.

[20] : Par: Khaled FERKOUS : «Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », Thèse de magister en Electrotechnique, Université MENTOURI Constantine, le 27 /05 / 2009.

[21] : Sanae Rechka, GILLES Roy, Sébastien Denetiere et Jean Mahseredjian : « Modélisation de systèmes électromécanique Multi-Masses à Base de machines asynchrones, à laide des outils MATLAB et EMTP avec application aux éoliennes », juillet 2004.

Les sites utilisés :

<http://pagesperso-orange.fr/fabrice.sincere/>.

<http://electronique1.blogspot.com/2011/02/definition-de-lenergie-eolienne.html>.

<http://www.info-eolien.com/eoliennes-horizontales.html>.

[www.ikonet.com/.../eolienne-a-axe-vertical.php](http://www.ikonet.com/.../eolienne-a-axe-vertical.php).

