

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou  
Faculté de Génie électrique et informatique  
Département d'électrotechnique**

## **Mémoire de fin d'études**

**En vue de l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'État en  
Électrotechnique**

**Option : Machines électriques**

# **THEME**

## **ÉTUDE ET SIMULATION D'UN AÉROGÉNÉRATEUR ÉOLIEN**

**Proposé et Dirigé par :**

**M<sup>r</sup>: OTMANE-CHERIF TAHAR**

**M<sup>r</sup>: HOUASSINE HAMZA**

**Réalisé par :**

**M<sup>r</sup>: SIAM RABAH**

**M<sup>r</sup>: BENMESLI SAAD**

*Promotion 2010*

# Remerciements

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Mr OTMANE-CHERIF TAHAR, qui a assuré la direction scientifique de ce travail. Au cours de cette année, nous avons pu apprécier, d'un encadrement scientifique de qualité. Nous le remercions pour ses conseils pertinents et éclairés, son aide était pour nous d'une importance capitale dans la réalisation de ce travail. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nous tenons aussi à remercier Mr HOUASSINE HAMZA, qui a Co-encadré et animé l'élaboration de ce mémoire. Il a été toujours disponible pour répondre à nos questions, à nous encourager et à nous aider à résoudre les problèmes rencontrés dans ce travail. Qu'il trouve ici, tout notre respect et notre profonde reconnaissance.

Nous adressons aussi nos plus vifs remerciements à :

- Mr HADAD SALAH, enseignant et chef du département.
- Mr SEDIKI HAMID, enseignant au département.
- Melle KACHNOURA RAHMA, enseignante au département.
- Mr BECHOUCHE ALI, Doctorant au département.
- Mr BOUKAIS BOUSSAD, enseignant au département.

Pour leurs aides et leurs encouragements, ont été toujours disponibles pour répondre à nos questions. Qu'ils trouvent ici, tout notre respect et notre profonde reconnaissance.

Nos remerciements vont de même aux membres de jury examinateurs qui nous ont fait l'honneur de participer au jury pour pouvoir évaluer ce mémoire.

## *Dédicace*

*Je dédie ce travail avant tous à mes chers parents qui ne cessent pas de m'encourager durant toutes mes études.*

*À mes chers frères et sœurs.*

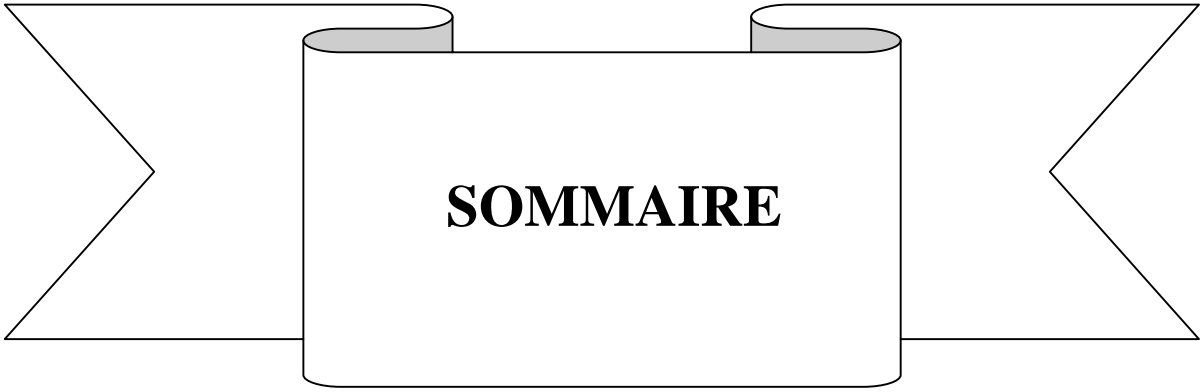
*À mes neveux.*

*À ma chère fiancée « OUIZA ».*

*À tous mes amis en particulier «MHEENA, AKLI, SAMIRA, BOUSSAD, SABRINA, MALHA, ALI... »*

*À tous ceux qui nous ont aidés à réaliser ce mémoire.*

*RABAH*

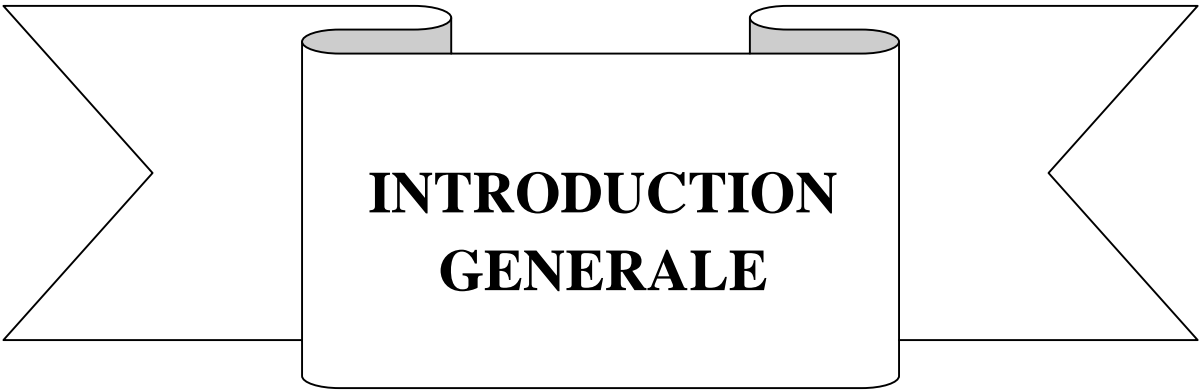


# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	4
<b><u>CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes éoliens</u></b>	6
<b>1.1. Introduction</b>	6
<b>1.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne</b>	6
1.2.1. Définition de l'énergie éolienne	6
1.2.2. Principaux composants d'une éolienne	7
<b>1.3. Les différents types d'éolienne</b>	8
1.3.1. Éolienne à axe vertical	8
1.3.2. Éolienne à axe horizontal	9
<b>1.4. Énergie cinétique du vent-conversion en énergie mécanique</b>	11
1.4.1. Loi de Betz	11
1.4.2. Production d'énergie mécanique	13
<b>1.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne</b>	15
1.5.1. Bilan des forces sur une pale	15
1.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	15
1.5.2.1. Système d'orientation des pales « pitch »	16
1.5.2.2. Système à découpage aérodynamique « stall »	16
1.5.3. Production optimale de l'énergie	16
<b>1.6. État de l'art sur la conversion électromécanique</b>	18
1.6.1. Système utilisant la machine asynchrone	18
1.6.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil	18
1.6.1.2. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	21
1.6.1.3. Machine asynchrone à rotor bobiné	21
1.6.2. Système utilisant la machine synchrone	22
1.6.2.1. Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants	22
1.6.2.2. Machine synchrone à aimant permanents discoïde	23
1.6.2.3. Machine synchrone vernier à aimants	24
1.6.3. Avantages et inconvénients de chacune des génératrices	25
1.6.4. Processus de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique	27
<b>1.7. Les différents types de multiplicateurs de vitesse utilisés dans les aérogénérateurs</b>	28
<b>1.8. Conclusion</b>	30

<b>CHAPITRE II : MODELISATION DE L'AEROGENERATEUR</b>	31
<b>2.1. Introduction</b>	31
<b>2.2. Représentation schématique d'une machine asynchrone</b>	31
<b>2.3. Hypothèses simplificatrices</b>	32
2.3.1. Équation électrique de la machine dans les axes a,b,c.	32
2.3.2. La notation matricielle	32
<b>2.4. Transformation de Park</b>	36
2.4.1. Transformation d'un système triphasé en un système diphasé équivalent	37
2.4.2. Transformation initial de Park	37
2.4.3. Transformation de Park modifiée	38
2.4.4. Équation de la machine asynchrone dans les axes d et q	38
2.4.4.1. Équation électrique	38
2.4.4.2. Équation magnétique	39
2.4.4.3. Équation mécanique et le couple électromagnétique	40
<b>2.5. Choix du référentiel</b>	40
2.5.1. Référentiel immobile par rapport au stator	40
2.5.2. Référentiel immobile par rapport au rotor	41
2.5.3. Référentiel immobile par rapport au champ tournant	42
<b>2.6. Modèle de la machine en représentation d'état</b>	43
<b>2.7. Modélisation de la turbine</b>	46
<b>2.8. Conclusion</b>	46
<b>CHAPITRE III : DEVELOPPEMENT DU MODELE SIMULINK DE L'AEROGENERATEUR</b>	47
<b>3.1. Introduction</b>	47
<b>3.2. Outil de simulation Matlab Simulink</b>	47
3.2.1. Matlab	47
3.2.2. Simulink	48
<b>3.3. Développement du modèle simulink de l'aérogénérateur</b>	49
3.3.1. Modèle simulink de la turbine	49
3.3.2. Modèle simulink de la génératrice asynchrone	50
➤ Bloc Simulink de la transformation de Park.	50
➤ Bloc Simulink de la transformation de Park inverse.	50
➤ Bloc Simulink de circuit d'alimentation.	50

➤ Bloc simulink de la machine asynchrone en mode hyposynchrone (moteur)	51
➤ Bloc simulink de la machine asynchrone en mode hypersynchrone (génératrice).	51
<b>3.4. Conclusion</b>	<b>52</b>
<b><u>CHAPITRE IV : RESULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS</u></b>	
<b>RESULTATS OBTENUS</b>	<b>53</b>
<b>4.1. Introduction</b>	<b>53</b>
<b>4.2. Résultats de la simulation</b>	<b>53</b>
4.2.1. La turbine éolienne	53
4.2.2. La machine asynchrone en mode hyposynchrone (moteur)	54
4.2.3. La machine asynchrone en mode hypersynchrone (génératrice)	56
<b>4.3. Interprétation des résultats</b>	<b>59</b>
4.3.1. La turbine	59
4.3.2. La machine asynchrone en mode hyposynchrone (moteur)	59
4.3.3. La machine asynchrone en mode hypersynchrone (génératrice)	60
<b>4.4. Étude de glissement</b>	<b>61</b>
<b>4.5. Bilan de puissance de la génératrice</b>	<b>62</b>
<b>4.6. Détermination de la vitesse du vent de compensation des pertes</b>	<b>63</b>
<b>4.7. Conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique</b>	<b>65</b>
4.7.1. Compensation d'énergie réactive	65
4.7.2. Détermination de la valeur des capacités	66
<b>4.8. Conclusion</b>	<b>67</b>
<b>CONCLUSION GENERALE</b>	<b>68</b>
<b>NOMENCLATURE</b>	
<b>ANNEXES</b>	
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	



**INTRODUCTION  
GENERALE**

## Introduction générale

La production d'énergie électrique est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie électrique est assurée à partir des sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet serre et donc une augmentation de pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures, c'est pour cela que plusieurs directives ont été adoptées pour la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables.

Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude portant sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels, la nature motivante de cette énergie, le développement de l'industrie des éoliennes, et l'évolution de la technologie, ainsi que les nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables. Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice d'une part, et l'instabilité de la vitesse du vent d'une autre part.

Le but de ce travail est de présenter un modèle global d'un aérogénérateur asynchrone à cage d'écureuil, 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.

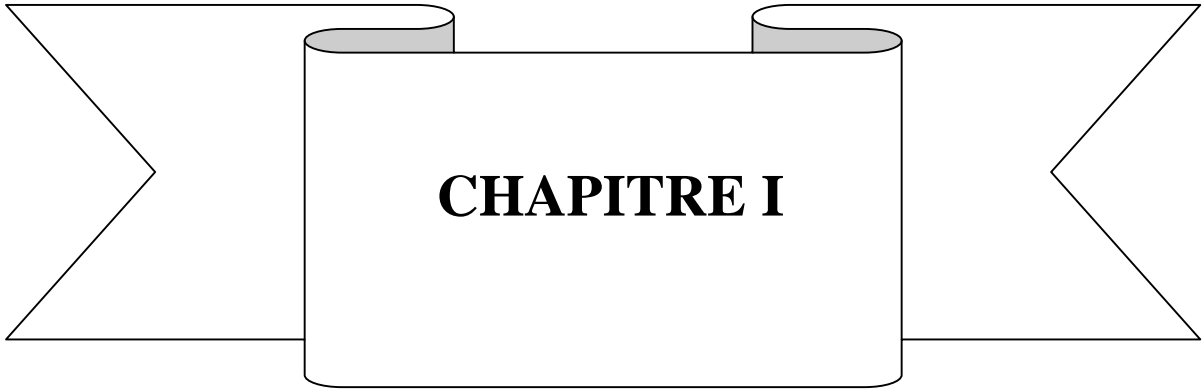
Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les systèmes éoliens et un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de machines utilisées dans les systèmes éoliens.

Le second chapitre présente une étude sur la modélisation de la génératrice asynchrone et la turbine éolienne à travers des équations électriques, de flux et de couple à l'aide de la transformation de Park et certaines hypothèses simplificatrices, ainsi que le modèle de la machine en représentation d'état.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation sommaire du logiciel de calcul Matlab Simulink et à la réalisation du modèle de simulation de l'aérogénérateur (turbine, génératrice).

Le quatrième chapitre est relatif à une présentations et interprétation des résultats de simulation de l'aérogénérateur obtenus pour les différents régimes de fonctionnement.

En conclusion générale, nous présentons une synthèse des travaux effectuées, ainsi que des perspectives à entreprendre dans l'avenir.



**CHAPITRE I**

**1.1. Introduction**

Actuellement, l'énergie éolienne connaît un grand essor suite aux problèmes environnementaux posés par les sources d'énergies traditionnelles ainsi que leurs prix et aussi grâce au progrès technologique des aérogénérateurs. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (éoliennes à axe horizontal ou axe vertical) [1]. On remarque que la contribution de ce type d'énergie dans le réseau électrique est de plus en plus importante en Europe et en Amérique du nord.

Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique [1]. A travers le développement des éoliennes, celles de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite par rapport aux éoliennes à vitesse fixe [2].

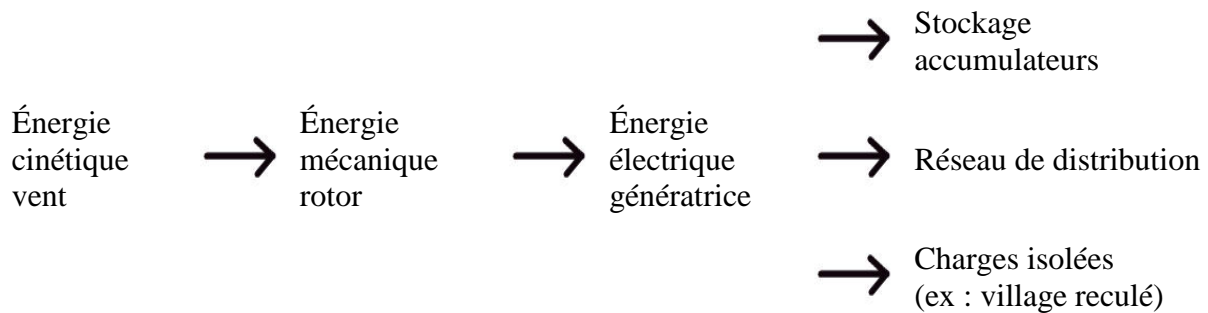
**1.2. Descriptif et qualité de l'énergie éolienne.****1.2.1. Définition de l'énergie éolienne :**

Une Éolienne est un dispositif qui utilise la force motrice du vent pour produire de l'électricité dans le cas d'un aérogénérateur, elle peut aussi être utilisée mécaniquement dans les éoliennes de pompage ou les moulins à vent [2].

La ressource éolienne provient, par conséquence, du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [3]. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui tire son nom d'Éole (en grec ancien / Aiolos), le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique. Elle est plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, car elle cause moins de pollution [3].

A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient depuis une dizaine d'années une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion allemande, scandinave et espagnole, on comptait en 2000 environ 15000 MW de puissance installée [4].

La figure ci-après représente le schéma de conversion d'énergie éolienne dans le cas d'un aérogénérateur.



**Figure 1.1** : Schéma de conversion d'énergie éolienne

### 1.2.2. Principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne classique est généralement constituée de trois parties principales (le rotor, la nacelle, le mât), mais il existe plusieurs configurations d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes.

- Le rotor est la partie qui tourne sous l'action du vent. Il est composé du nez, d'une hélice à plusieurs pales, d'un axe tournant à l'intérieur de la nacelle et d'un système de correction d'angle des pales (Pitch). Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et résistants (polyester renforcé de fibre de verre ou de carbone). Leur longueur atteint actuellement entre 30 et 55 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales. En augmentant la longueur des pales on augmente la surface balayée et donc la puissance de l'éolienne [2] [4].

- La nacelle abrite tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor au générateur électrique (arbre lent et rapide, multiplicateur, roulement, frein à disque), ce sont des équipements qui produisent l'électricité à partir de la rotation de l'axe du rotor, qu'on appelle aussi « arbre lent ». La rotation, uniquement provoquée par le vent est transmise par l'arbre lent à un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle du convertisseur électromécanique. Cette énergie mécanique est ensuite convertie en électricité par une génératrice asynchrone ou synchrone. Les éoliennes sont munies de freins à disques, car au-delà d'une certaine vitesse du vent, les forces que doit subir l'éolienne seraient trop grandes et pour mesure de sécurité il faut arrêter l'éolienne [4].

- Le mât supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est constitué de plusieurs tronçons métalliques fixés au sol sur une fondation en béton. Il doit être plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol, il peut ainsi atteindre des hauteurs 100 m pour les éoliennes les plus puissantes. Le rotor est placé à une hauteur importante car le vent y souffle plus fort qu'au sol [5].

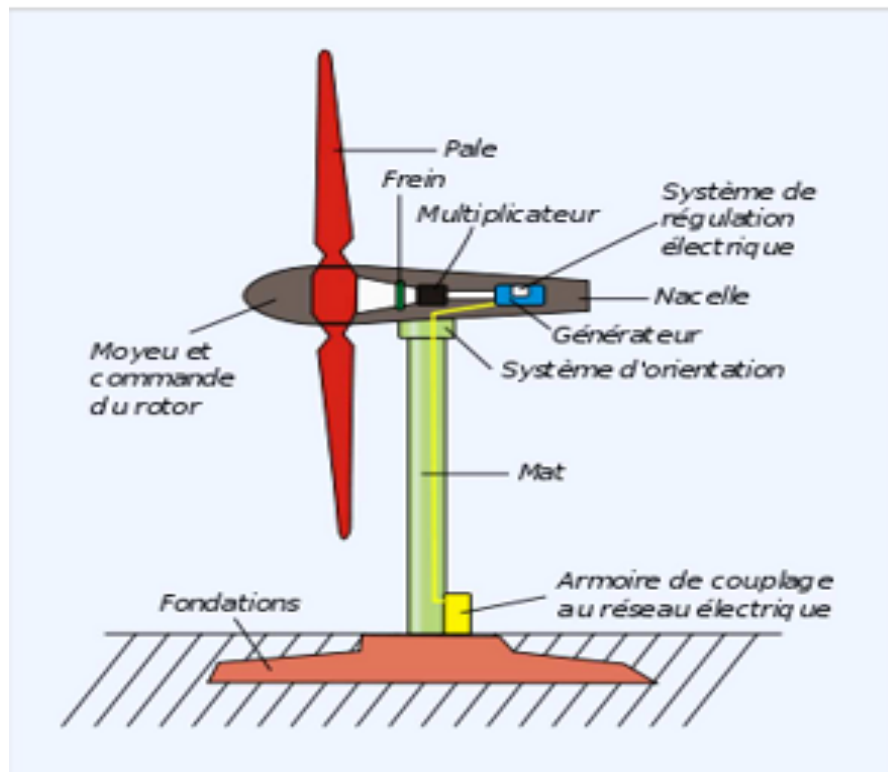


Figure I.2 : principaux composants d'une éolienne

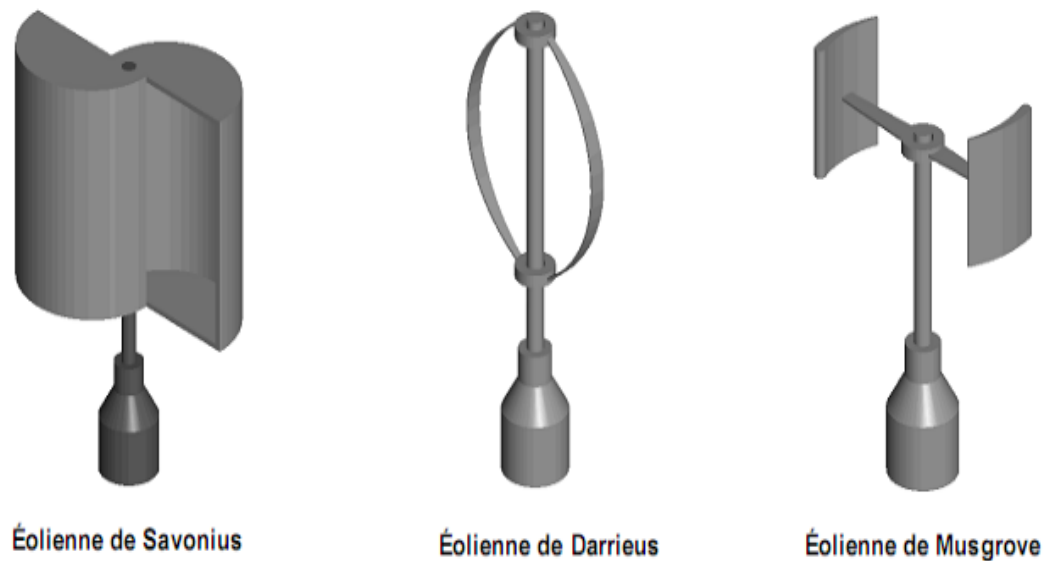
### 1.3. Les différents types d'éolienne

Les constructeurs ont développé différents types d'éoliennes qui peuvent s'adapter aux conditions particulières des zones urbaines [5]. En général, elles peuvent être classées selon deux catégories principales qui se différencient par la direction de leur axe. Ainsi nous pouvons distinguer deux catégories ; les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

#### 1.3.1. Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont probablement été les premières utilisées. Parmi celles-ci, une éolienne peu dispendieuse et facile à fabriquer est l'éolienne à rotor de SAVONIUS. Ce rotor a été inventé par le Finlandais Sigurd SAVONIUS en 1925. Il comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. C'est une sorte d'éolienne fabriquée à partir de matériaux peu coûteux tels qu'un baril d'essence coupé verticalement en deux et quelques pièces de bois pour former la structure. Les deux moitiés du baril sont glissées dans une tige qui sert d'axe de rotation. Quelque soit sa direction, le vent s'engouffre dans la moitié creuse du baril et la fait tourner. Une génératrice actionnée par la rotation de l'axe produit de l'électricité. L'éolienne à axe vertical n'a pas besoin d'être face au vent, elle est efficace quelque soit la direction du vent [6].

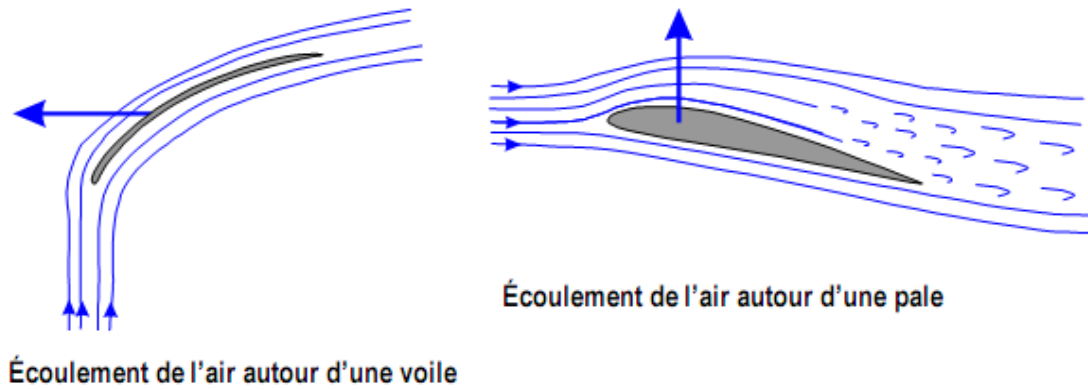
Un autre type d'éolienne à axe vertical est l'éolienne de DARRIEUS. Cette éolienne a été conçue par l'ingénieur français George DARRIEUS en 1925. Le rotor est constitué de plusieurs pales, de profils symétriques liés entre elle et qui tournent autour d'un axe vertical. Les formes adoptées pour les surfaces des pales sont cylindriques, coniques ou paraboliques. Comme l'éolienne de type Savonius, elle possède l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible [6].



**Figure 1.3 :** principe d'éolienne à axe vertical

### 1.3.2. Éoliennes à axe horizontal

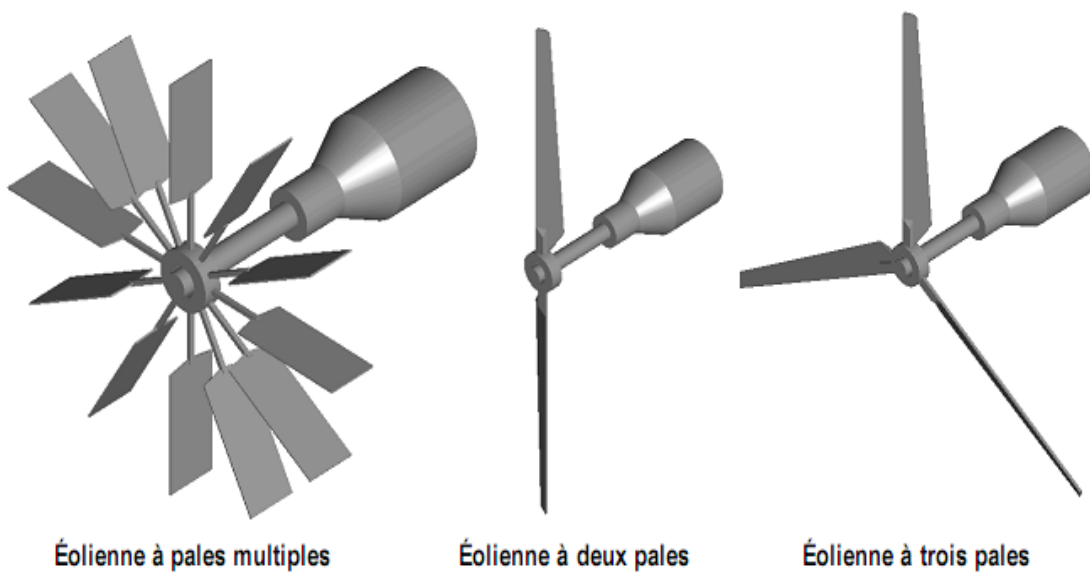
Une éolienne à axe horizontal est dotée de pales qui servent principalement à faire tourner le rotor. Des pales en forme de voile de bateau étaient couramment utilisées pour faire tourner les moulins à vent. La forme incurvée de la voile accélère la vitesse du vent et diminue la pression de l'air devant la voile. Cette baisse de pression a pour effet de faire tourner le rotor du moulin. Ce système a l'avantage d'être simple à fabriquer et efficace s'il est face au vent, il faut donc qu'il soit équipé d'un système permettant de l'orienter [6].



**Figure 1.4 :** écoulement de l'air autour d'une voile et d'une pale

Aujourd'hui, la forme des pales modernes est comparable à la forme des hélices d'avion. Ces pales sont planes sur un côté et profilées sur l'autre afin de tirer le maximum de profit de l'écoulement de l'air tout comme les ailes d'un avion. La courbure spéciale des surfaces des pales provoque un écoulement de l'air plus rapide sur le côté courbé de la pale. Il en résulte que la pression d'air est moindre sur le côté courbé que sur le côté plat, cette différence de pression fait tourner les pales [6].

Généralement, les éoliennes modernes ont trois pales longues et effilées. Le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.



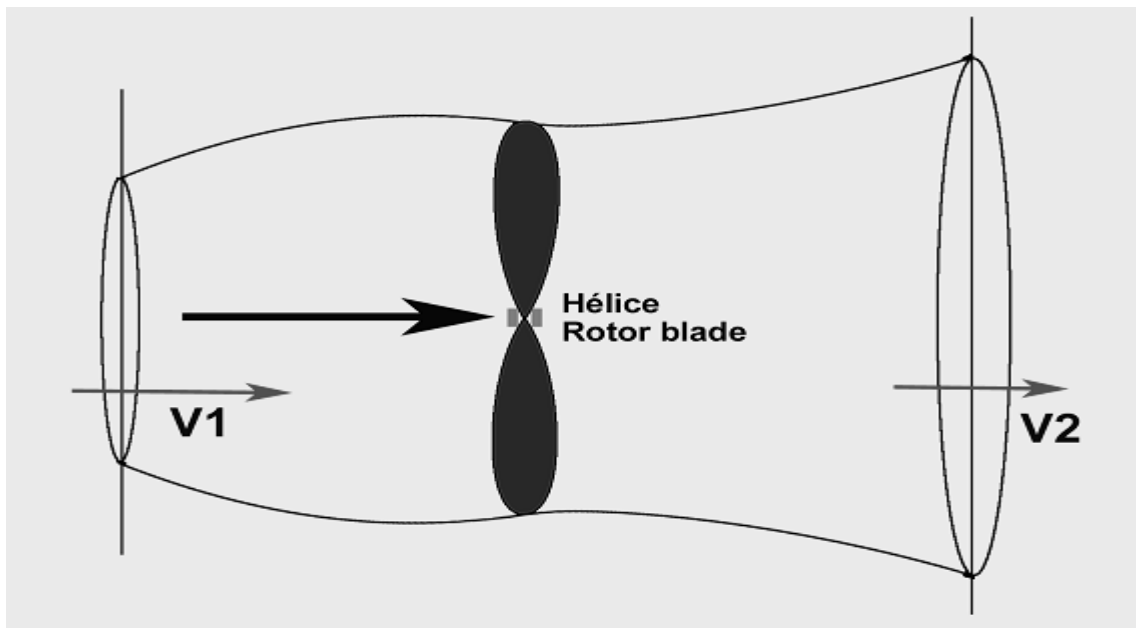
**Figure 1.5 :** principe d'éolienne à axe horizontal

## 1.4. Énergie cinétique du vent ; conversion en énergie mécanique

### 1.4.1. Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

Supposons que la vitesse moyenne du vent traversant la surface balayée par le rotor est égale à la valeur moyenne de la vitesse moyenne ( $V_1$ ) du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne et de sa vitesse ( $V_2$ ) après le passage à travers le plan du rotor, soit  $\frac{V_1+V_2}{2}$ .



**Figure 1.6 :** Tube de vent à la traversée de l'aéromoteur

La masse de l'air traversant la surface balayée par le rotor en une seconde est égale à :

$$m = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

Ou

$m$  : est la masse par seconde [Kg/s].

$\rho$  : est la densité de l'air.

$S$  : est la surface balayée par le rotor (pales) en  $m^2$ .

$V$  : vitesse du vent en m/s.

La puissance extraite du vent par le rotor est égale à la masse multipliée par le carré de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton) : « Dans un référentiel Galiléen, si le vecteur vitesse  $V_g$  du centre d'inertie d'un solide varie, la somme des forces qui agissent sur lui n'est pas nulle. Sa direction et son sens, sont ceux de la variation de  $V_g$  entre deux instants proches. »

$$\text{-----} \tag{1.2}$$

En substituant  $m$  de l'équation (1.1) dans cette expression, nous obtenons l'expression de la puissance extraite du vent :

$$\text{-----} \tag{1.3}$$

Comparons maintenant notre résultat avec la puissance totale d'un flux d'air non perturbé traversant une surface similaire  $S$  sans la présence d'un rotor qui ralentit le vent. Nous appelons cette puissance  $P_0$  :

$$\text{-----} \tag{1.4}$$

La relation entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$\text{---} \frac{\text{---}}{\text{---}} \tag{1.5}$$

Sur le plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines par leurs coefficients aérodynamiques de puissance et du couple en fonction de la vitesse normalisée .

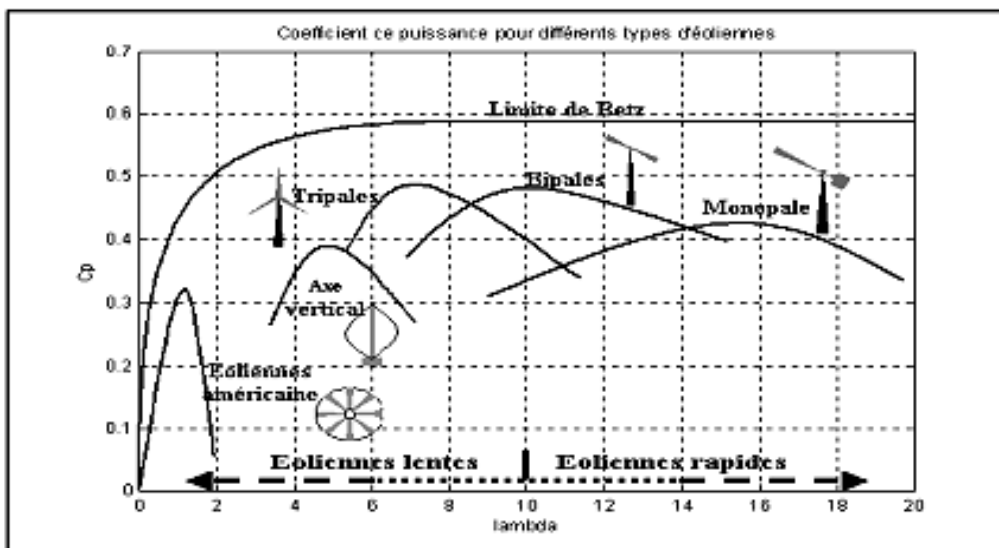


Figure 1.7 : coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

La figure suivante nous montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  pour des turbines réelles à axe horizontal à 1, 2, 3 et 4 pales, notons que sa valeur reste bien en dessous de la limite de Betz (0,59). Ces courbes dépendent pratiquement du profil des pales.

Si on considère la machine tripale, on peut dire que son coefficient de puissance est maximal pour  $\lambda = 7$ , c'est-à-dire une vitesse périphérique en bout de pale égale à 7 fois la vitesse du vent. C'est pour une telle vitesse normalisée que l'on maximise le rendement aérodynamique. A diamètre et vitesse de vent donnés, une bipale devra avoir une vitesse de rotation plus élevée qu'une tripale [7].

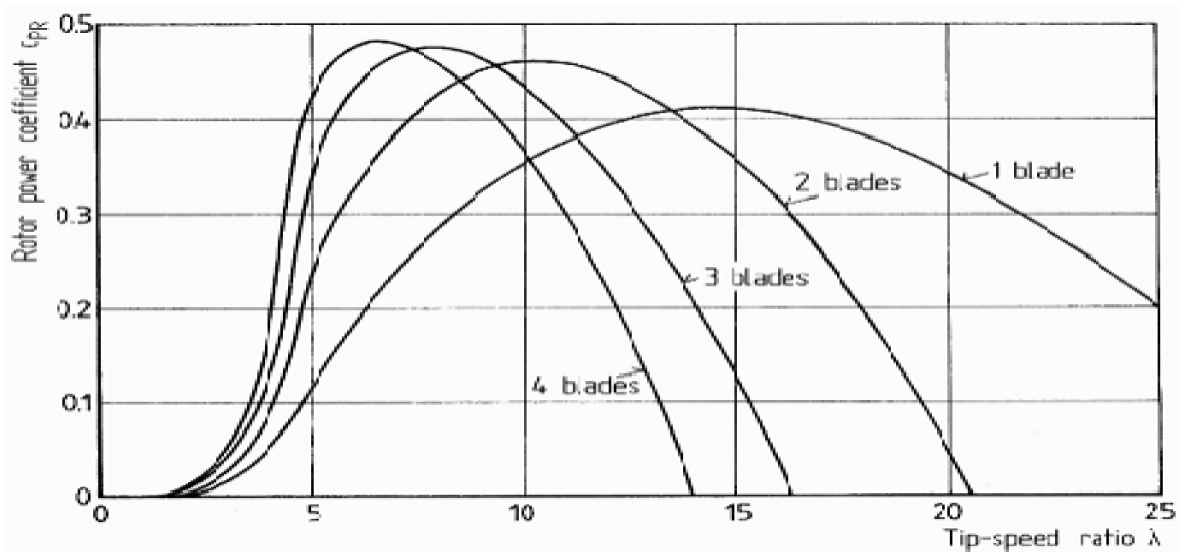


Figure 1.8 : coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$ . [7]

#### 1.4.2. Production de l'énergie mécanique :

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A R^3 \omega^3 C_p \quad (1.6)$$

Avec :  $\omega$  (1.6.a)

$\omega$  : est la vitesse angulaire de rotation de la turbine.

R : rayon de l'aérogénérateur.

La valeur du coefficient aérodynamique de puissance  $C_p(\ )$  dépend de la vitesse de rotation de la turbine et de la vitesse du vent.

Ainsi le couple mécanique s'obtient comme suit :

$$C_{mec} = \frac{P_m}{\omega_1} \tag{1.7}$$

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

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_P \left( \frac{\Omega_2 R}{KV_1} \right)^3 R^2 V_1^3 \tag{1.8}$$

Avec  $\Omega_2$  : vitesse de rotation de l'arbre après le multiplicateur

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent.

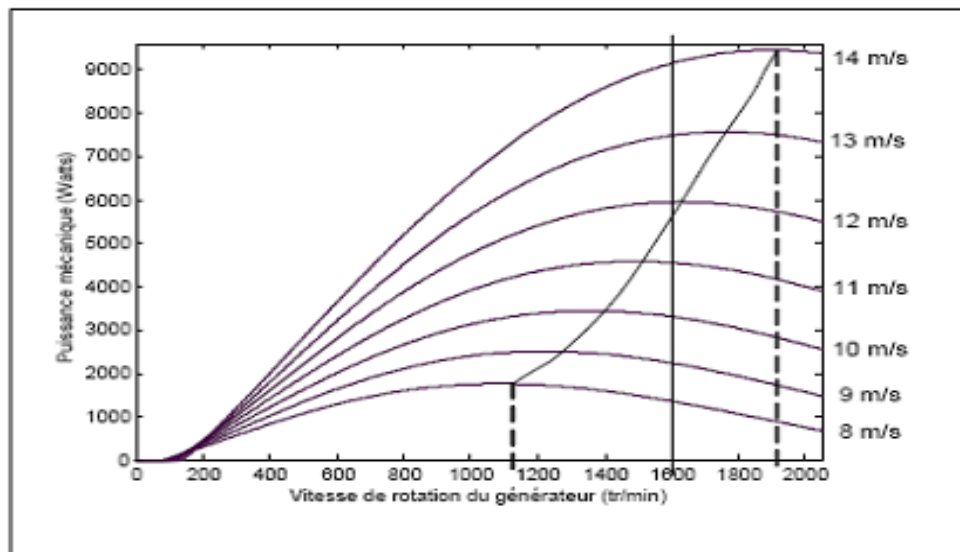


Figure 1.9 : puissance disponible pour un type d'éolienne donné [7].

## 1.5. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

### 1.5.1. Bilan des forces sur une pale

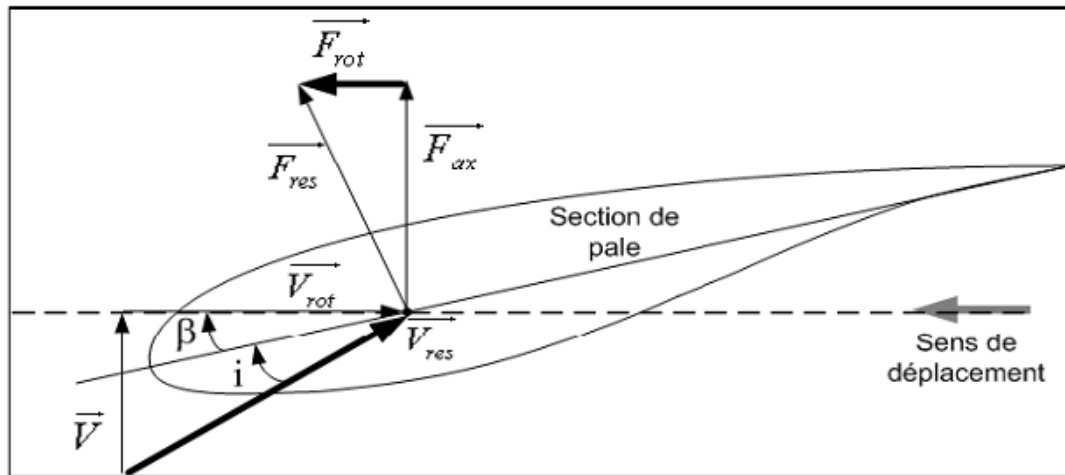


Figure 1.10 : Bilan des forces sur une pale

La figure (1.10) représente le bilan des forces exercées sur une pale, le vecteur  $\vec{V}$  représente la vitesse du vent arrivant face à cette pale, la composante du vent due à la rotation de l'aérogénérateur est représentée par le vecteur  $\vec{V}_{rot}$ , 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 le déplacement. Chaque turbine éolienne est dimensionnée de façon que cette force atteigne sa valeur maximale [8].

### 1.5.2. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

L'objectif de régulation de la vitesse de rotation est d'assurer la sécurité de l'éolienne contre les vents forts et de limiter la puissance.

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance dénommée puissance nominale  $P_n$ . cette puissance est obtenue à partir d'une vitesse du vent  $V_n$ , dénommée vitesse nominale. Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$  la turbine éolienne doit modifier ses paramètres afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilise deux principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice.

### 1.5.2.1. Système d'orientation des pales "pitch"

Le contrôle à pas variable "pitch" est une technique active assez coûteuse et complexe, contrôle le comportement aérodynamique de la turbine en modifiant l'angle de calage des pales autour de leur axe longitudinal. Ce système de régulation à l'avantage, de pouvoir effectuer un contrôle actif de la puissance sous toutes les conditions de vent et de freiner la turbine si nécessaire.

### 1.5.2.2. Système à découpage aérodynamique "stall"

Le contrôle à décrochage de charge est un système de contrôle passif qui réagit au-delà d'une certaine vitesse du vent. Les pales du rotor sont fixes et elles ne peuvent pas tourner autour de leur axe longitudinal. L'angle de calage est choisi afin de permettre le décrochage du flux d'air de la surface de la pale pour des vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale. Cela réduit la portance et augmente la force de traînage.

Certains aérogénérateurs combinent les avantages des deux systèmes en réalisant un contrôle "stall-actif".

## 1.5.3. Production optimale d'énergie

Si on considère les courbes des coefficients de puissance en fonction de  $\lambda$ , il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent ( $\lambda_{opt}$ ). Ce qui signifie que la puissance fournie soit maximale pour  $\lambda_{opt}$ . La vitesse de rotation optimale  $\Omega_{opt}$  est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot V \quad (1.9)$$

La figure suivante montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Un réglage de vitesse donc est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [9].

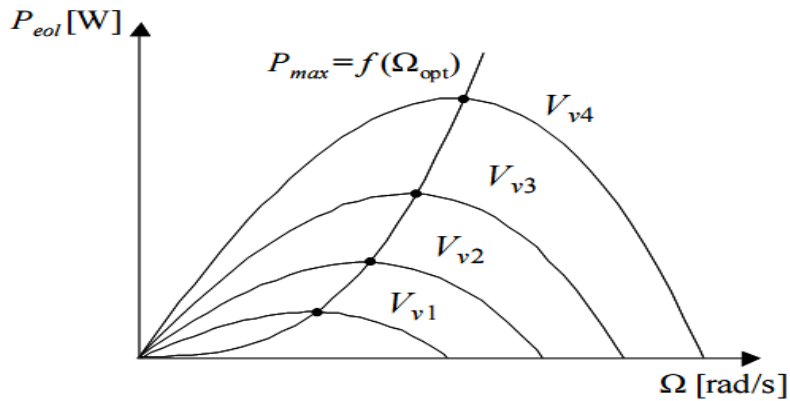


Figure 1.11 : Puissance de la turbine en fonction de sa vitesse de rotation [9].

Le dimensionnement en puissance de l'ensemble de la turbine, du générateur et de toute la mécanique de structure (nacelle, mât) associée est défini pour une vitesse du vent nominale au-delà de laquelle il est nécessaire d'écrêter la puissance [10]. Ainsi, la courbe idéale et typique d'un aérogénérateur a l'allure de celle présentée à la Figure (1.12).

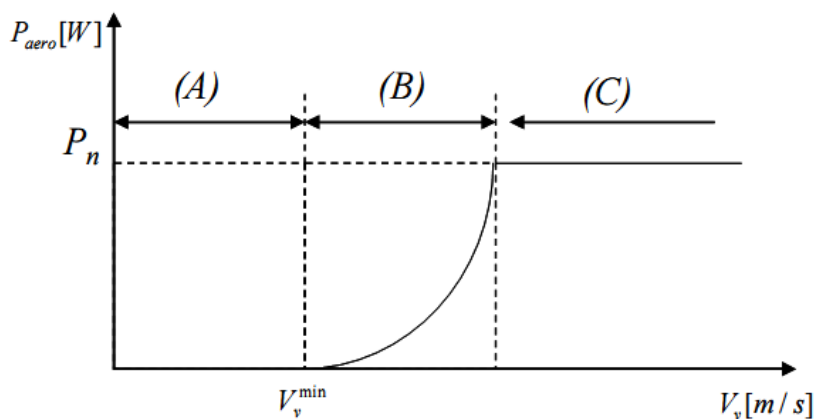


Figure 1.12 : Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent [10].

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte trois zones distinctes.

- Zone A, la phase où  $P_{\text{turbine}} = 0$ , la turbine ne fournit pas de puissance.
- Zone B : la phase dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- Zone C : la phase où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance  $P_{\text{turbine}}$  fournie reste sensiblement égale à la puissance nominale  $P_n$ .

## 1.6. État de l'art sur la conversion électromécanique

Un convertisseur électromécanique n'est qu'une bobine de fils qui tourne à l'intérieur d'un champ magnétique. Par conséquent, il produit de l'électricité par l'effet de l'induction magnétique. En règle générale pour les éoliennes de forte puissance, il s'agit d'une génératrice synchrone ou asynchrone. Mais pour un aérogénérateur servant à la charge de batteries par exemple, on peut utiliser une génératrice à courant continu [11].

Il existe diverses chaînes de production d'électricité par aérogénérateurs. Elles peuvent être classées selon leur fonctionnement ; à vitesse fixe ou à vitesse variable, couplées ou non couplées au réseau.

### 1.6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

#### 1.6.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

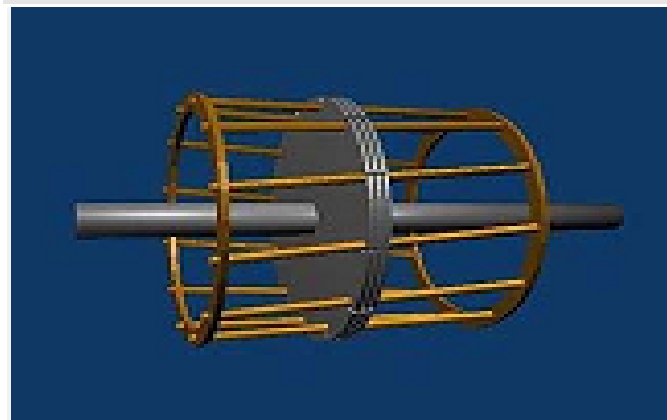
La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est souvent utilisée pour produire de l'électricité à l'aide des éoliennes dans des sites isolés. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables [11].

##### ➤ Présentation

La machine se compose de deux pièces principales :

- ❖ **Le stator** : Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôle afin de limiter les courants de Foucault.

- ❖ **Le rotor :** Ce type de rotor a été inventé par Michail Ossipowitsch Doliwo-Dobrowolski au début des années 1890. Ce rotor est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit (voir figure ci-dessous). Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants induits.



**Figure 1.13 :** Structure d'un rotor en cage d'écureuil

### ➤ Principes généraux

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée "vitesse de synchronisme".

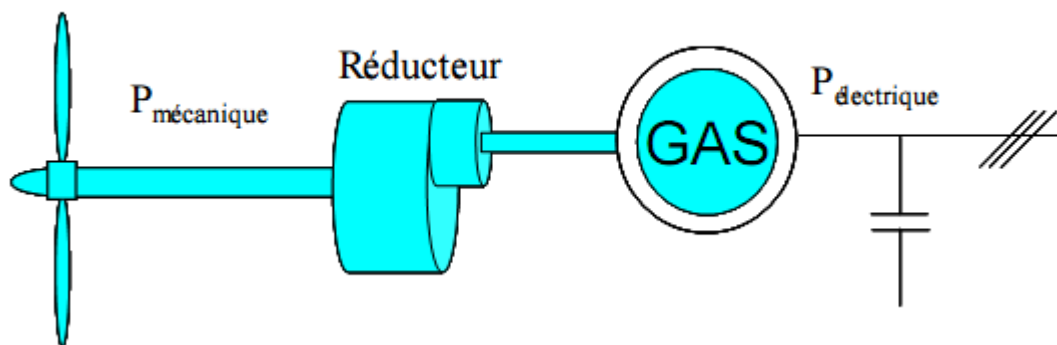
L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité d'atteindre la même vitesse que le champ statorique sans la présence d'un entraînement extérieur. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée "vitesse de glissement".

Lorsque le rotor est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme (fonctionnement hypersynchrone), la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être

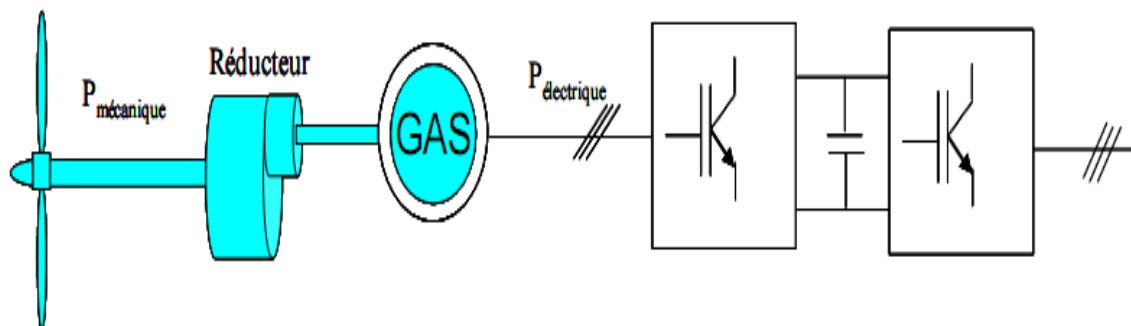
forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les courants rotoriques.

Le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance), elles peuvent même atteindre des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire [11]. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la Figure (1.14) [11].



**Figure 1.14 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Figure 1.15) [11].



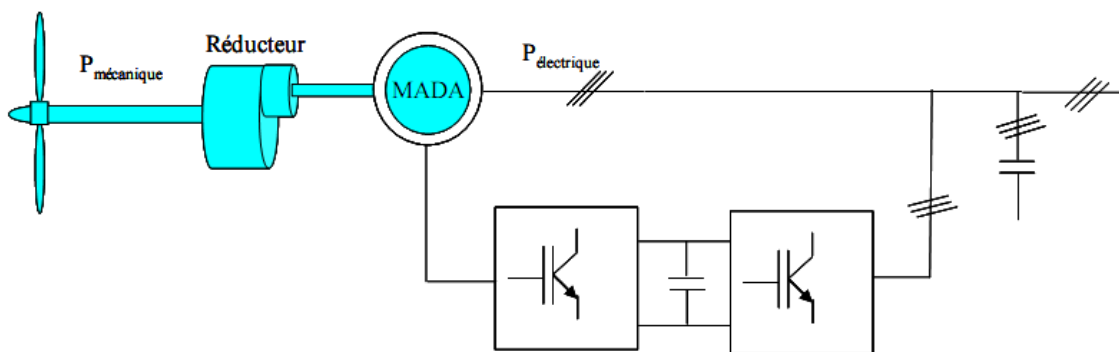
**Figure 1.15 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

### 1.6.1.2. Machines asynchrones à double alimentation (MADA)

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit [12].

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse.

Une des solutions très intéressantes et permettant d'obtenir une variation de la vitesse de rotation d'environ 30% autour de la vitesse de synchronisme consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en onduleur réseau (Figure 1.16). En général, le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit à assurer une variation de 30% de la plage de vitesse [12].



**Figure 1.16 :** Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation- régulation de la vitesse de rotation par chaîne rotor alimentation.

### 1.6.1.3. Machine asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné a le même fonctionnement que la machine asynchrone à cage, le rotor de cette dernière est constitué de trois bobinages couplés en étoile, reliés à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. On peut modifier les propriétés électromécaniques en agissant sur le rotor par ces connexions [12].

La machine asynchrone à rotor bobiné est une machine réversible peut fonctionner comme :

- Moteur en mode hyposynchrone : ou la vitesse de la rotation de rotor  $\omega_r$  est inférieur à la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme)  $\omega_s$ .
- Génératrice en mode hypersynchrone : ou la vitesse de la rotation de rotor  $\omega_r$  est supérieur à la vitesse de synchronisme  $\omega_s$ .

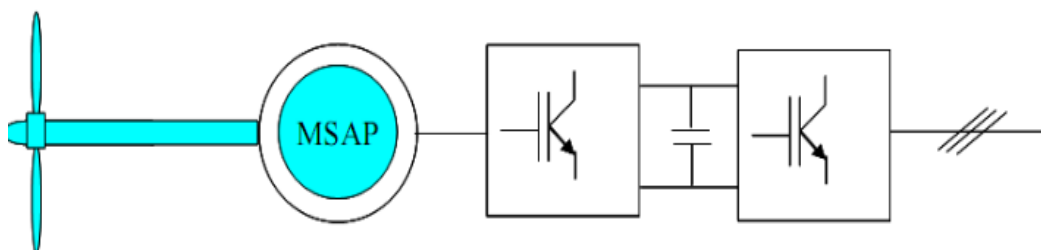
## 1.6.2. Système utilisant la machine synchrone

### 1.6.2.1. Alternateur synchrone à rotor bobiné ou à aimants

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants, elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes.

Aujourd'hui, la plupart des machines synchrones utilisées dans l'éolien sont des machines synchrones à aimants permanent, sont à grand nombre de pôles, elles présentent un meilleur rendement et un meilleur couple massique, permettent de développer des couples mécaniques considérables. Ce type de machines a un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défaut (suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est intéressant dans les applications éoliennes [12].

Les alternateurs synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande aussi la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Une électronique de puissance s'impose pour toutes les applications utilisant ce type de machines qui sont donc à vitesse variable.



**Figure 1.17** : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents [12].

Une autre solution est le redressement à diodes placé directement derrière la génératrice. L'optimisation de la gestion énergétique n'est alors possible que si l'excitation est réglable.

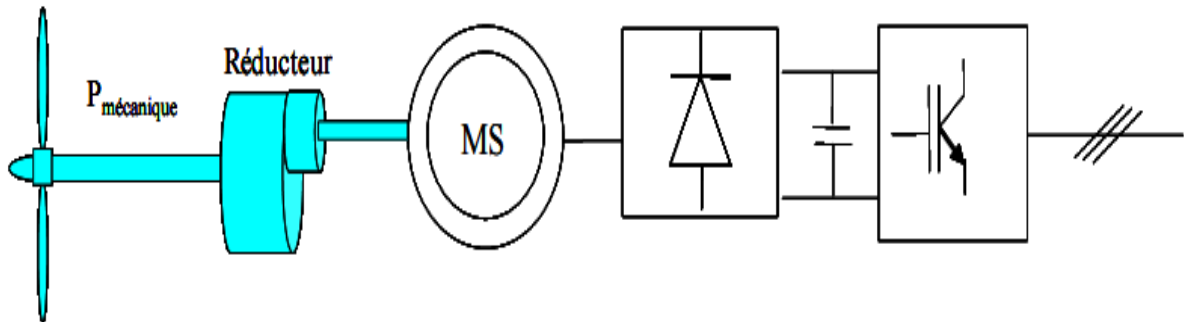


Figure 1.18 : Système basé sur la machine synchrone et redresseur à diodes [12].

### 1.6.2.2. Machine synchrone à aimants permanents discoïde

Le concept de cette machine se distingue par la direction axiale de son champ magnétique par opposition au champ radial des machines cylindriques traditionnelles [12].

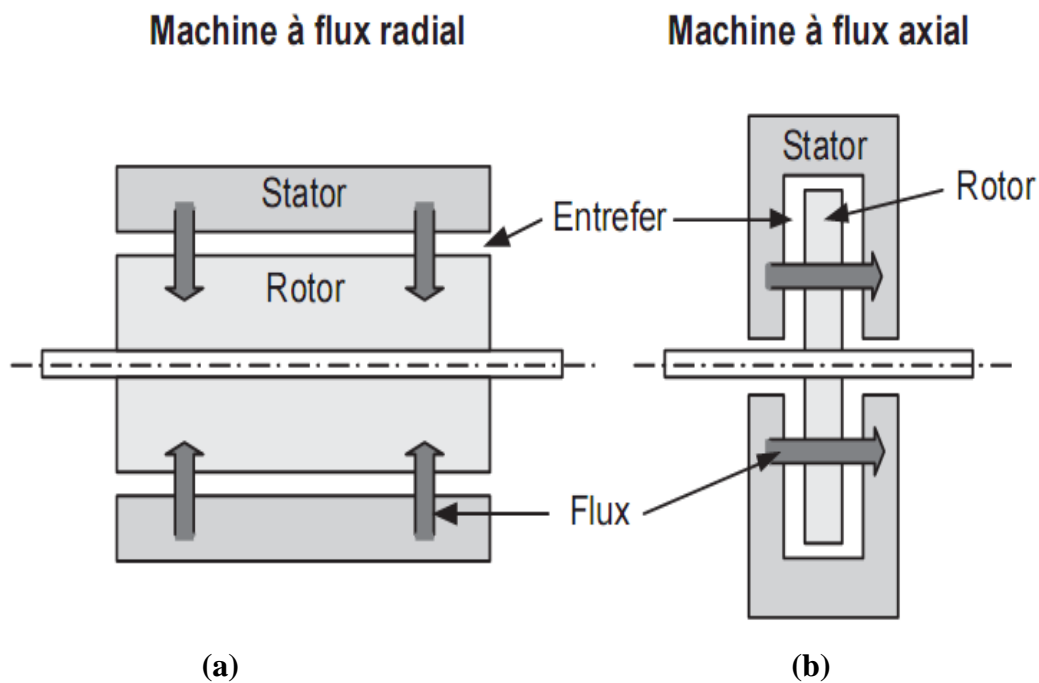
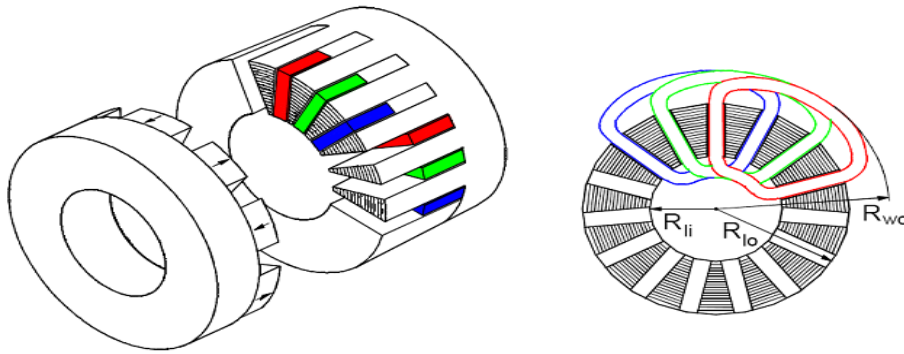


Figure 1.19 : Machines à flux radial (a), à flux axial (b).



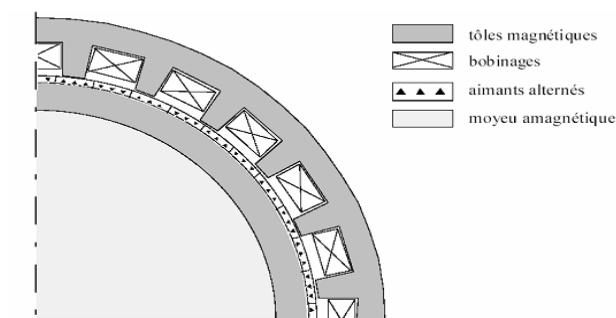
**Figure 1.20 :** Machine à flux axial [12].

Pour les applications à petites vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse, ceci conduit à un meilleur couple volumique. Cette topologie a la possibilité d'assembler plusieurs machines sur un même axe afin d'accroître le couple. L'éolienne Jeumont J48 de 750 KW met en œuvre ce type de machine pour la vitesse variable à entraînement direct avec un grand nombre de pôles.

### 1.6.2.3. Machines synchrones vernier à aimants

Ce type de machines est alimenté par des courants sinusoïdaux. Son fonctionnement est similaire à celui des machines à rotor lisse et des machines à reluctance variable. Il présente l'avantage d'une grande simplicité de construction mécanique et une bonne robustesse. L'inducteur est constitué de petits aimants alternés à la périphérie du rotor, qui interagissent sous l'effet du champ d'induit avec des petites dents statorique, les pôles et les aimants sont totalement découpés dans la structure vernier.

La figure suivante nous montre la mise en œuvre des aimants surfaciques qui exploite l'effet vernier pour une alimentation sinusoïdale,



**Figure 1.21 :** Machine synchrone vernier à aimants [12].

La condition de fonctionnement est donnée par la formule suivante :

$$|N_s - N_r| = P \tag{1.10}$$

Ou

$N_s$  : est le nombre de dents au stator.

$N_r$  : est le nombre de dents au rotor.

$P$  : est le nombre de paires de pôles.

La vitesse de rotation est liée à la pulsation d'alimentation est donnée par l'équation :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r} \tag{1.11}$$

On notera que cette formule est la même que pour la machine à réluctance variable pure.

### 1.6.3. Avantages et inconvénients de chacune des génératrices

Les avantages et les inconvénients des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens sont regroupés dans le tableau suivant :

Génératrices	Avantages	Inconvénients
Génératrices asynchrones		
Génératrice à cage d'écureuil et à rotor bobiné, fonctionnement à vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machines standard</li> <li>• robuste</li> <li>• faible coût</li> <li>• aucun interfaçage électronique</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• puissance extraite non optimisée</li> <li>• vitesse fixe d'où le rendement aérodynamique diminue.</li> <li>• maintenance boîte de vitesse</li> <li>• magnétisation de la machine non gérée</li> <li>• Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur.</li> </ul>
Génératrice à cage d'écureuil et à rotor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement à vitesse variable 30% autour de la vitesse de synchronisme</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance extraite non optimisée.</li> <li>• Pas de gestion de l'énergie réactive.</li> <li>• Pertes supplémentaires.</li> </ul>

<p>bobiné, fonctionnement à vitesse variable</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Robuste</li> <li>• Électronique de puissance faiblement dimensionnée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenance boîte de vitesse.</li> </ul>
<p>A double alimentation</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement à vitesse variable.</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.</li> <li>• Électronique de puissance dimensionnée à 30% de <math>P_n</math>.</li> <li>• Connexion de la machine plus facile à gérer.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenance boîte de vitesse.</li> <li>• Prix de l'électronique de puissance relatif.</li> <li>• Contrôle commande complexe.</li> <li>• Oscillation mécanique (mais amorties par un contrôle adéquat).</li> </ul>
<p>Génératrices synchrones</p>		
<p>A rotor bobiné ou à aimants</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleur rendement</li> <li>• Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faible et moyens.</li> <li>• Connexion de la machine plus facile à gérer.</li> <li>• Absence de boîte de vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de l'électronique de puissance et de la machine.</li> <li>• Grand diamètre de la machine.</li> <li>• Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de <math>P_n</math>.</li> </ul>
<p>Génératrice synchrone à aimants permanents discoïde et vernier à aimants</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleur rendement</li> <li>• Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faible et moyens.</li> <li>• Construction simple.</li> <li>• Robuste.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de l'électronique de puissance et de la machine.</li> <li>• Grand diamètre de la machine.</li> <li>• Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de <math>P_n</math>.</li> </ul>

1.6.4. Processus de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique

Le diagramme ci-dessous résume le processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique pour les différentes configurations électriques à vitesse variable. Il faut noter que, même si on ne les a pas citées ici, diverses sortes de composants d'électronique de puissance existent et que chacune des configurations analysées ici a différentes variantes selon le type de convertisseur de puissance et de commande associée [13].

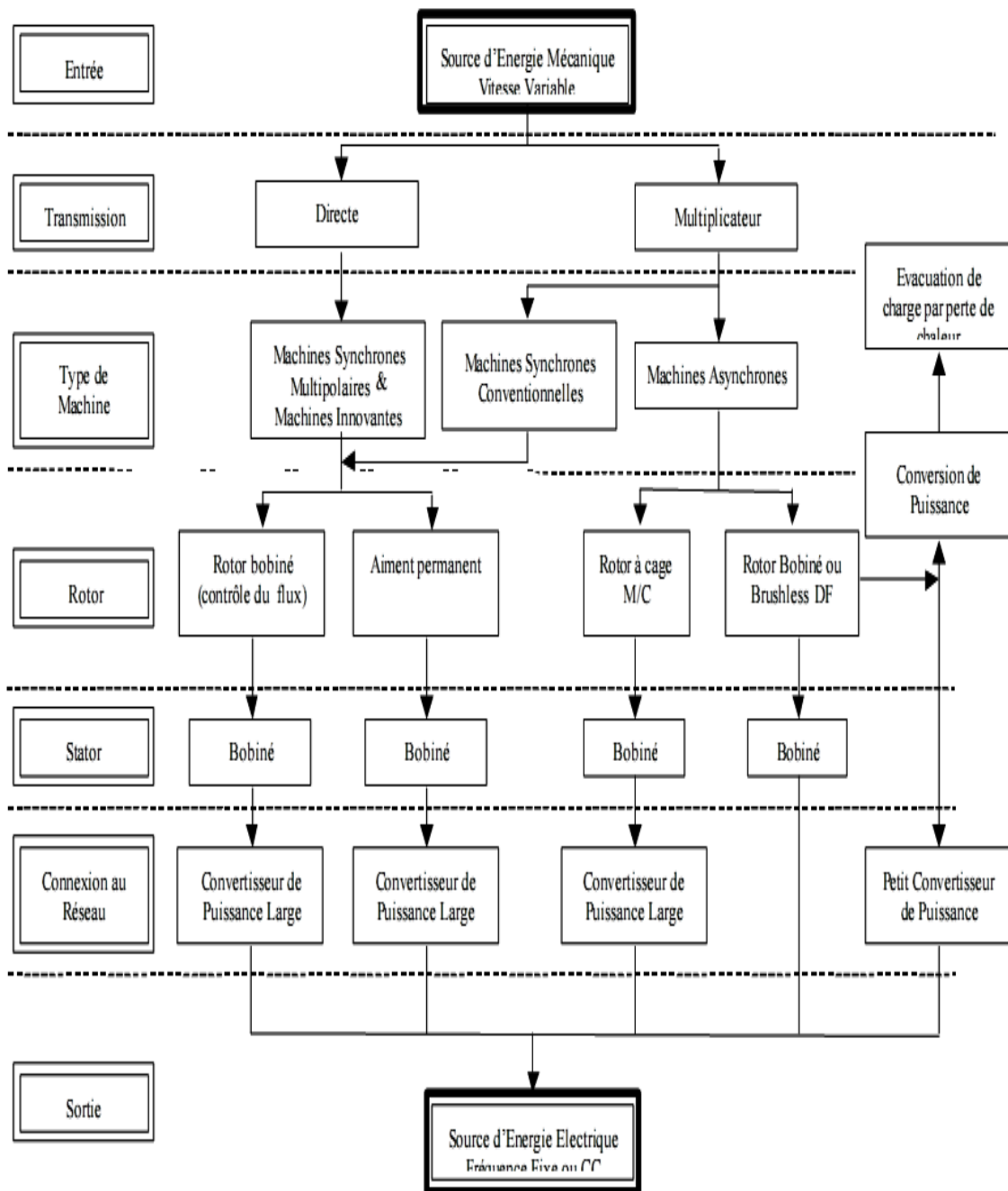


Figure 1.22 : processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique [13].

1.7. 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 à celle du convertisseur électromécanique. Parmi les différents types de multiplicateurs de vitesse qui existent, les trois types les plus utilisés dans les aérogénérateurs sont [14] :

- Multiplicateur à couple conique : où l'arbre de sortie est perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

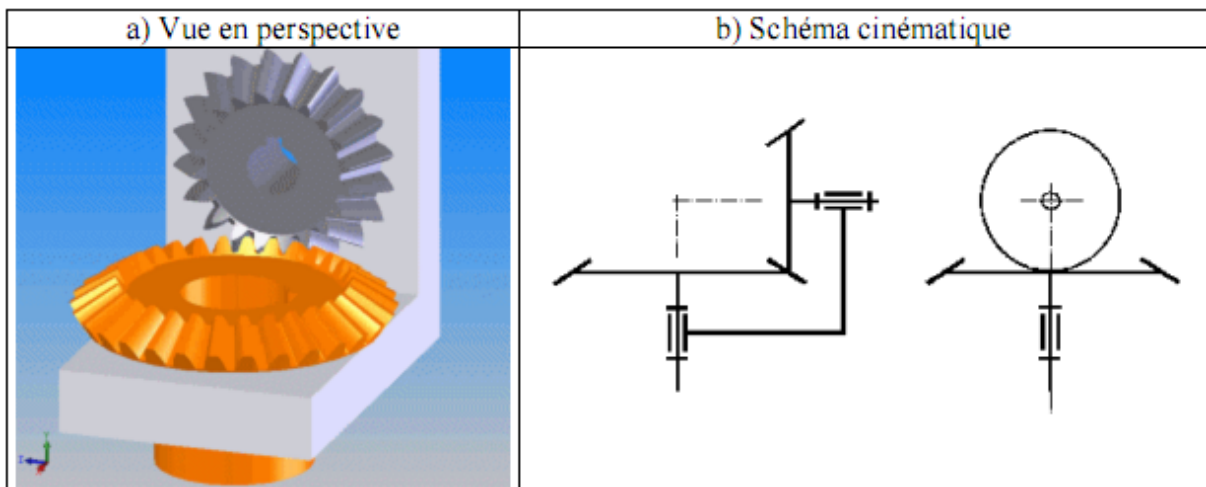


Figure 1.23 : multiplicateur à couple conique

- Multiplicateur à engrenages : constitué 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.

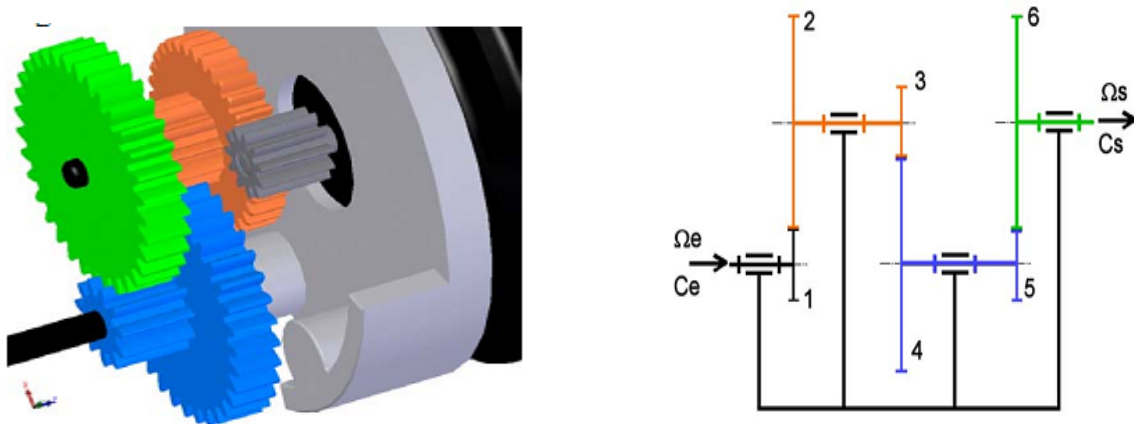


Figure 1.24 : Multiplicateur à engrenages cylindriques à trois étages

- 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 ». Ces derniers sont généralement maintenus par un châssis mobile nommé « porte satellite ».

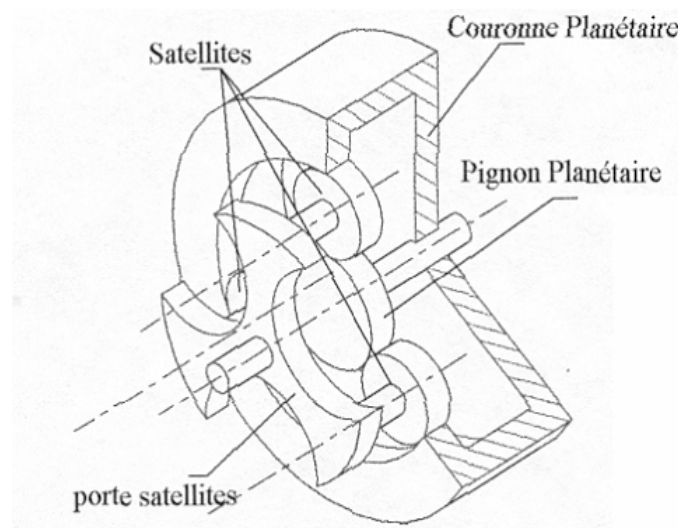


Figure 1.25 : multiplicateur à satellite

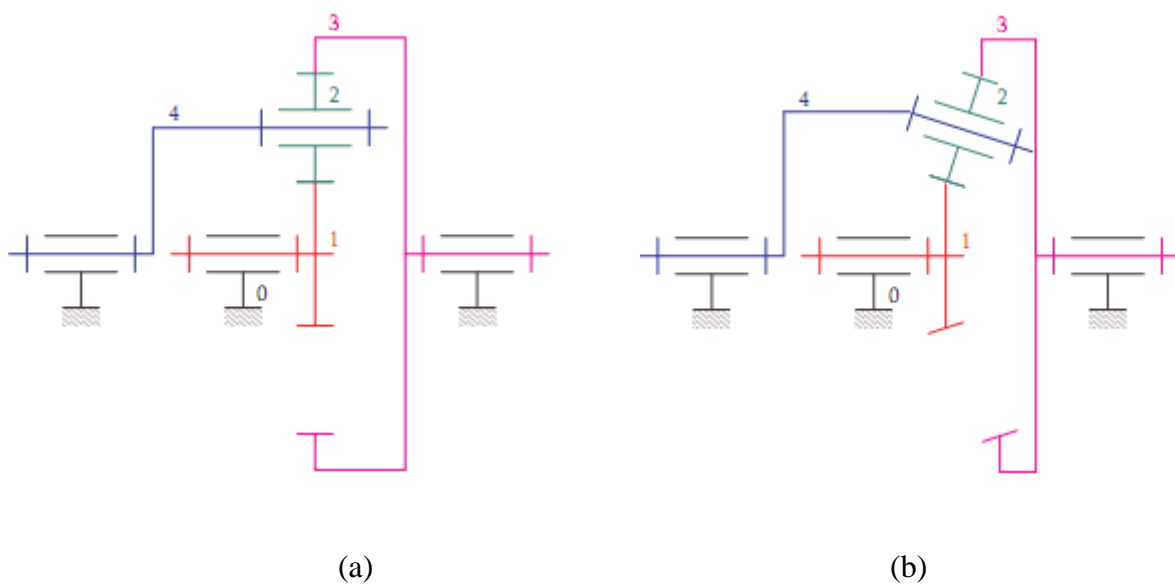


Figure 1.26 : train plan (a), et train sphérique (b)

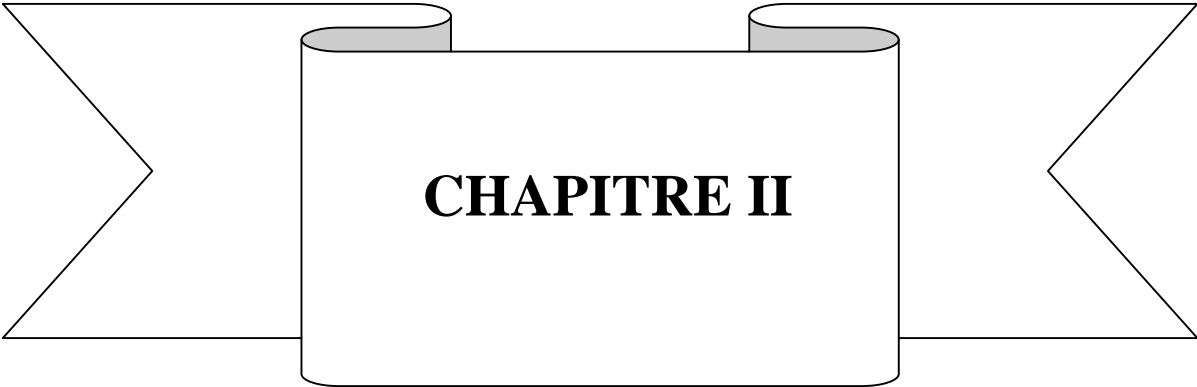
**1.8. Conclusion**

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté une brève description des énergies renouvelables. Puis, nous nous sommes essentiellement intéressés au domaine des technologies éoliennes dont nous avons étalé quelques notions élémentaires. Parmi les deux types de systèmes éoliens existant, à savoir les systèmes à axe horizontal et les systèmes à axe vertical, notre travail se focalise sur le premier aspect.

Il est à savoir qu'un système éolien fournit une énergie moins polluante que les autres sources d'énergie (fossile et nucléaire). A cet effet, elle constitue un challenge d'actualité et une ressource respectueuse de la nature qui s'adhère parfaitement au développement des énergies renouvelables.

Différents aspects technologiques sont développés au cours de ces dernières années afin de permettre aux systèmes éoliens de diversifier leur capacité d'exploitation. Ainsi, leur utilisation ne cesse de se généraliser pour permettre une exploitation quasi-totale des ressources terrestre en énergie du vent.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons à la modélisation de la machine asynchrone car elle est la génératrice la plus utilisée dans la conversion de l'énergie éolienne pour les divers avantages qu'elle présente.



2.1. Introduction

La modélisation est une étape fondamentale dans l'analyse d'un processus physique. Cette dernière consiste à le décrire mathématiquement par un système d'équations approximatives basées sur des hypothèses simplificatrices.

Le modèle de la machine asynchrone est issu de la représentation mathématique des différents phénomènes électriques et mécanique garantissant son fonctionnement. C'est un modèle qui se définit à priori sur les trois axes réels de la machine. Pour optimiser son utilité, ce dernier est ensuite transformé vers un système d'axes adéquat en se basant sur le changement de base en utilisant la transformée de PARK.

2.2. Représentation schématique d'une machine asynchrone

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué dans la figure ci-dessous. Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles mêmes.  $\theta$  est l'angle électrique entre l'axe de la phase (a)statorique et la phase (a) rotorique.

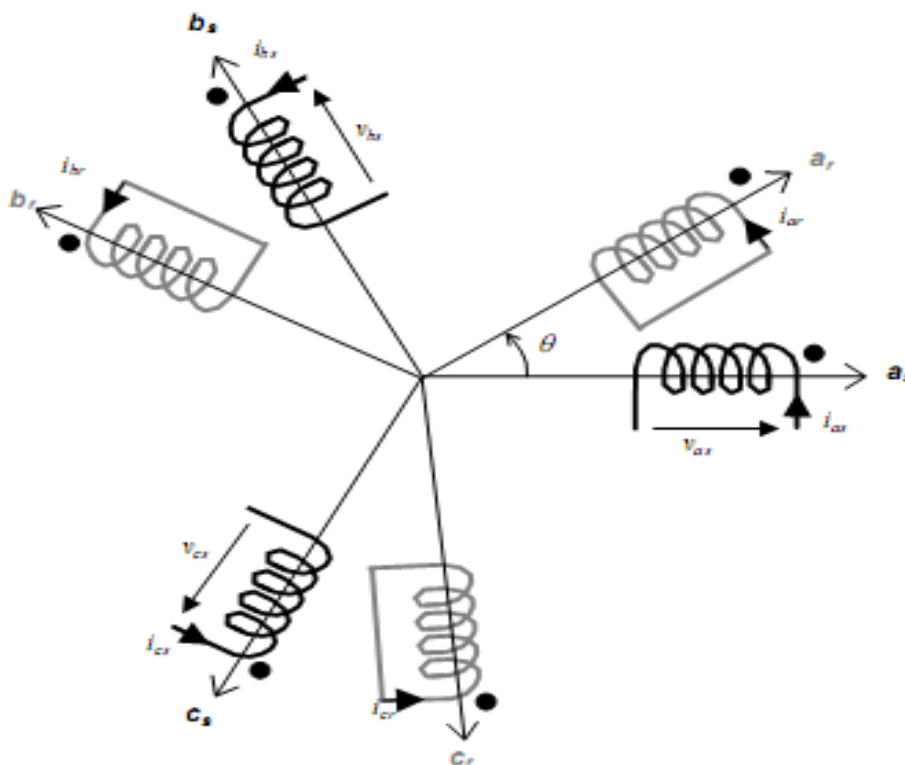


Figure 2.1 : Représentation schématique d'une machine asynchrone au stator et au rotor.

**2.3. Hypothèses simplificatrices**

La mise en équations des machines asynchrones triphasées aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. Pour cela, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices peut être adopté afin de permettre une mise en équations particulièrement simples.

- La machine est supposée "linéaire", c'est-à-dire que la saturation et les effets d'hystérésis des circuits magnétiques sont négligés ainsi que les phénomènes provoquant des variations de résistance et d'inductance (température, fréquence).
- Les pertes dans le fer ne sont pas prises en compte dans la mise en équation de la machine.
- La force magnétomotrice d'entrefer produite par chaque enroulement est supposée à répartition spatiale sinusoïdale, ce qui revient à négliger les harmoniques d'espace.
- On suppose que l'entrefer est de largeur constante.

**2.3.1. Équation électrique de la machine dans les axes a, b, c**

Les équations des tensions des trois phases statoriques, et rotoriques en fonctionnement moteur sont les suivantes :

Les trois phases statoriques :

$$\begin{cases} V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} \varphi_{as} \\ V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt} \varphi_{bs} \\ V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt} \varphi_{cs} \end{cases} \quad (2.1)$$

Les trois phases rotoriques :

$$\begin{cases} V_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d}{dt} \varphi_{ar} \\ V_{br} = r_r i_{br} + \frac{d}{dt} \varphi_{br} \\ V_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d}{dt} \varphi_{cr} \end{cases} \quad (2.2)$$

**2.3.2. Notation matricielle**

Pour les trois phases (statoriques, rotoriques), on résume l'écriture des équations électriques précédentes en écriture matricielle.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

L'écriture matricielle sous une forme compacte est donnée comme suit :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (2.5)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\varphi_r] \quad (2.6)$$

Sachant que :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}, \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix}, \quad [R_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix}, \quad [i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}, \quad [\varphi_r] = \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Où :

$[V_s], [V_r]$  : Vecteurs de tensions statoriques et rotoriques ;

$[i_s], [i_r]$  : Vecteurs des courants statoriques et rotoriques ;

$[\varphi_s], [\varphi_r]$  : Vecteurs des flux statoriques et rotoriques ;

$[R_s], [R_r]$  : Matrices des résistances statoriques et rotoriques ;

$r_s, r_r$  : Résistances propres statoriques et rotoriques ;

Si on fait intervenir les différentes inductances (propres et mutuelles), dans ce cas les flux des phases statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des courants.

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \\ \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & m_3 & m_2 & m_1 \\ m_1 & m_2 & m_3 & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Où :

$L_s$ : L'inductance propre d'une phase statorique.

$L_r$ : L'inductance propre d'une phase rotorique.

$m_s$ : L'inductance mutuelle entre deux phase statoriques.

$m_r$ : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

La matrice des flux réels fais apparaitre quatre sous matrices d'inductances :

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Avec

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t \quad (2.11)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Les mutuelles inductances stator-rotor dépendent de l'angle (position du rotor) et ont la valeur crete  $M_{sr}$  :

$$\begin{aligned} [M_{sr}] = [M_{rs}]^t &= \begin{bmatrix} m_1 & m_3 & m_2 \\ m_2 & m_1 & m_3 \\ m_3 & m_2 & m_1 \end{bmatrix} \\ &= M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) & \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Avec :

$M_{sr}$ : L'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une autre rotorique.

Le developpement de l'équation (2.10) nous donne :

Au stator

$$\begin{cases} \varphi_{as} = L_s i_{as} + M_{sr} i_{ar} \\ \varphi_{bs} = L_s i_{bs} + M_{sr} i_{br} \\ \varphi_{cs} = L_s i_{cs} + M_{sr} i_{cr} \end{cases} \quad (2.15)$$

Au rotor

$$\begin{cases} \varphi_{ar} = L_r i_{ar} + M_{rs} i_{as} \\ \varphi_{br} = L_r i_{br} + M_{rs} i_{bs} \\ \varphi_{cr} = L_r i_{cr} + M_{rs} i_{cs} \end{cases} \quad (2.16)$$

On remplaçon les équations des flux réels(2.15)et (2.16) dans les équations électriques(2.1) et (2.2), et on aura :

Au stator

$$\begin{cases} V_{as} = r_s i_{as} + \frac{d}{dt} (L_s i_{as} + M_{sr} i_{ar}) \\ V_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d}{dt} (L_s i_{bs} + M_{sr} i_{br}) \\ V_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d}{dt} (L_s i_{cs} + M_{sr} i_{cr}) \end{cases} \quad (2.17)$$

Au rotor

$$\begin{cases} V_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d}{dt} (L_r i_{ar} + M_{rs} i_{as}) \\ V_{br} = r_r i_{br} + \frac{d}{dt} (L_r i_{br} + M_{rs} i_{bs}) \\ V_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d}{dt} (L_r i_{cr} + M_{rs} i_{cs}) \end{cases} \quad (2.18)$$

Le développement des systèmes d'équations (2.17) et (2.18) donnera :

Au stator

$$\begin{cases} V_{as} = r_s i_{as} + L_s \frac{d i_{as}}{dt} + M_{sr} \frac{d i_{ar}}{dt} \\ V_{bs} = r_s i_{bs} + L_s \frac{d i_{bs}}{dt} + M_{sr} \frac{d i_{br}}{dt} \\ V_{cs} = r_s i_{cs} + L_s \frac{d i_{cs}}{dt} + M_{sr} \frac{d i_{cr}}{dt} \end{cases} \quad (2.19)$$

Au rotor

$$\begin{cases} V_{ar} = r_r i_{ar} + L_r \frac{d i_{ar}}{dt} + M_{rs} \frac{d i_{as}}{dt} = 0 \\ V_{br} = r_r i_{br} + L_r \frac{d i_{br}}{dt} + M_{rs} \frac{d i_{bs}}{dt} = 0 \\ V_{cr} = r_r i_{cr} + L_r \frac{d i_{cr}}{dt} + M_{rs} \frac{d i_{cs}}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

### 2.4. Transformation de PARK

La transformation de Park est une transformation triphasée - biphasée, suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère (β), puis vers le repère (dq). Le repère (β) est toujours fixe par rapport au repère (abc); par contre le repère (dq) est mobile; il forme avec le repère fixe (β) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park. Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en des enroulements statoriques et rotoriques biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent.

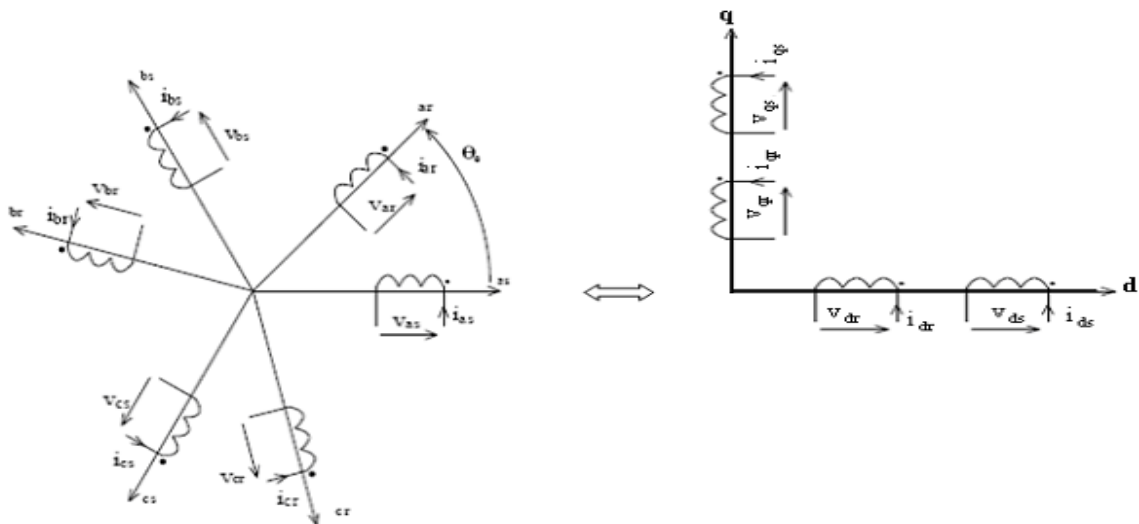


Figure (2.2) : Passage du triphasé au biphasé.

**2.4.1. Transformation d'un système triphasé en un système diphasé équivalent**

La transformation d'un système triphasé en un système diphasé équivalent est une opération mathématique qui permet de passer d'un système triphasé d'axes magnétiques décalés d'un angle électrique (120°), en un système de trois axes orthogonaux. La transformation direct est :

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin(\theta) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ k_0 & k_0 & k_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Où  $f$  peut représenter une tension, un courant ou un flux magnétique,  $\theta$  est l'angle entre l'axe de la phase a et l'axe direct. L'indice q représente l'axe de quadrature et l'indice 0 l'axe homopolaire.

**2.4.2. Transformation initial de PARK**

A partir du système matriciel (2.21), les courants dans le repère (dq) sont obtenus :

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin(\theta) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ k_0 & k_0 & k_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Dans le cas où les courants sont sinusoïdaux :

$$\begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \text{ , et } k_0 = \frac{1}{2}$$

La transformation de PARK est :

$$[P(\ )] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin(\theta) & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Sa transformé inverse est :

$$[P(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

### 2.4.3. Transformation de park modifiée

Le facteur  $\left(\frac{n_1}{n_2}\right)$  est présent dans ce type de transformée pour conserver les amplitudes des courants, tension et flux magnetique, mais ne conduit pas à l'égalité des puissances. Cette transformation repose sur l'invariance des puissances, est donnée comme suit :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

La transformé inverse de PARK est :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

### 2.4.4. Equation de la machine asynchrone dans les axes d et q

#### 2.4.4.1. Equations électriques

On note :

$$\text{Au stator : } (V_{ps}) = \begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{0s} \end{pmatrix}, (i_{ps}) = \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{pmatrix}, (\varphi_{ps}) = \begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{0s} \end{pmatrix}$$

$$\text{Au rotor : } (V_{pr}) = \begin{pmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \\ V_{0r} \end{pmatrix}, (i_{pr}) = \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{pmatrix}, (\varphi_{pr}) = \begin{pmatrix} \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \\ \varphi_{0r} \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} (V_{ps}) = P(\theta)(V_s) & V_s = P(\theta)^{-1}(V_{ps}) \\ (V_{pr}) = P(\theta)(V_r) & V_r = P(\theta)^{-1}(V_{pr}) \end{cases} \quad (2.25)$$

Après un developpement on aura :

Au stator

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + r_s i_{ds} \\ V_{qs} = \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} + r_s i_{qs} \end{cases} \quad (2.26)$$

Au rotor

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + r_r i_{dr} \\ V_{qr} = \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + r_r i_{qr} \end{cases} \quad (2.27)$$

#### 2.4.4.2. Equations magnetiques

Au stator

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (2.28)$$

Au rotor

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (2.29)$$

Sous formes matricielle

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Avec

$L_s = l_s - m_s$  : inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - m_r$  : inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr}$  : inductance cyclique mutuelle.

### 2.4.4.3. Equations mécaniques et le couple électromagnétique

L'équation mécanique n'est pas concerné par la transformation de PARK, elle reste inchangée dans le repère (d, q). Par contre le couple électromagnétique est concerné par cette transformation et obtenue à l'aide d'un bilan de puissance.

Equation mécanique :

$$C_{em} - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (2.31)$$

Où :  $C_r$  est le couple résistant

J : Moment d'inertie

f : coefficient de frottement visqueux

$\Omega$  : vitesse de rotation de la machine

Couple électromagnétique :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (2.32)$$

## 2.5. Choix du référentiel

L'utilisation du référentiel permet de simplifier au maximum les expressions analytiques de la machine. En pratique le choix se fait en fonction du problème étudié. Il existe trois choix important de fixer le repère dq soit au stator, au rotor ou bien au champ tournant.

### 2.5.1. Référentiel immobile par rapport au stator

Ce référentiel est utile pour l'étude des variations importantes de la vitesse de rotation. Il est basé sur certaines conditions sont les suivantes:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$$

Les équations sont :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d}{dt} \varphi_{ds} + r_s i_{ds} \\ V_{qs} = \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + r_s i_{qs} \end{cases} \quad (2.33)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{d}{dt} \varphi_{dr} + \omega_r \varphi_{qr} + r_r i_{dr} \\ V_{qr} = \frac{d}{dt} \varphi_{qr} - \omega_r \varphi_{dr} + r_r i_{qr} \end{cases} \quad (2.34)$$

### 2.5.2. Référentiel immobile par rapport au rotor

Ce référentiel est très intéressant sert à l'étude des exemples où la vitesse  $\omega_r$  peut être considérée comme constante. Il est basé sur les conditions suivantes:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = 0$$

Les équations sont :

Au stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_r \varphi_{qs} + r_s i_{ds} \\ V_{qs} = \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_r \varphi_{ds} + r_s i_{qs} \end{cases} \quad (2.35)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = \frac{d}{dt} \varphi_{dr} + r_r i_{dr} \\ V_{qr} = \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + r_r i_{qr} \end{cases} \quad (2.36)$$

2.5.3. Référentiel immobile par rapport au champ tournant

Ce référentiel sert à l'étude des exemples où la fréquence d'alimentation est constante, ou étudier la fonction de transfert vis-à-vis des petites perturbations. Il est basé sur les conditions suivantes:

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad \text{et} \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = g\omega_s$$

Sachant que  $g$  : est le glissement

Les équations électriques sont :

Au stator :

$$\left. \begin{aligned} V_{ds} &= \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \varphi_{qs} + r_s i_{ds} \\ V_{qs} &= \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \varphi_{ds} + r_s i_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (2.37)$$

Au rotor :

$$\left\{ \begin{aligned} V_{dr} &= \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - \omega_r \varphi_{qr} + r_r i_{dr} = 0 \\ V_{qr} &= \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + \omega_r \varphi_{dr} + r_r i_{qr} = 0 \end{aligned} \right. \quad (2.38)$$

Les équations magnétiques sont :

Au stator :

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \varphi_{qs} &= L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{aligned} \right. \quad (2.39)$$

Au rotor

$$\left\{ \begin{aligned} \varphi_{dr} &= L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \varphi_{qr} &= L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{aligned} \right. \quad (2.40)$$

D'où les équations des courants sont :

Au stator :

$$\left\{ \begin{aligned} i_{ds} &= \frac{(\varphi_{ds} - M i_{dr})}{L_s} \\ i_{qs} &= \frac{(\varphi_{qs} - M i_{qr})}{L_s} \end{aligned} \right. \quad (2.41)$$

Au rotor :

$$\begin{cases} i_{dr} = \frac{(\varphi_{dr} - M i_{ds})}{L_r} \\ i_{qr} = \frac{(\varphi_{qr} - M i_{qs})}{L_r} \end{cases} \quad (2.42)$$

L'équation du Couple électromagnétique est:

$$C_{em} = P(\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (2.43)$$

### 2.6. Modèle de la machine en représentation d'état

Il existe plusieurs représentations d'état de la MAS . Elles se différencient entre elles par un choix du vecteur définissant les variables d'état du système et par un choix du référentiel dans lequel la modélisation à été fait. La forme générale de l'équation d'état est uniforme et s'écrit de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(x, u, t) \\ Y = g(x, u, t) \end{cases} \quad (2.44)$$

$$\begin{cases} \dot{X} = A_{\omega} X + BU \\ Y = CX \end{cases} \quad (2.45)$$

$C_r$ : comme berturbation

Où : X : vecteur d'état

U :vecteur d'entrée

Y :vecteur de sortie du système

Pour notre étude le vecteur d'état est constitué des composantes du courant statorique et du flux rotorique.

$$\begin{cases} X = [i_{ds}, i_{qs}, \varphi_{dr}, \varphi_{qr}]^t \\ U = [V_{ds}, V_{qs}]^t \\ Y = [i_{ds}, i_{qs}]^t \end{cases} \quad (2.46)$$

$$Y = CX = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Avec : 
$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Pour les équations électriques on aura :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{r_s L_r^2 + r_r M^2}{\sigma L_s L_r^2}\right) & \omega_s & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{M \omega_r}{\sigma L_s L_r} \\ -\omega_s & -\left(\frac{r_s L_r^2 + r_r M^2}{\sigma L_s L_r^2}\right) & -\left(\frac{M \omega_r}{\sigma L_s L_r}\right) & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\left(\frac{1}{T_r}\right) & \omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_r & -\left(\frac{1}{T_r}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ \varphi_{dr} \\ \varphi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

Où :

$$A_\omega = \begin{bmatrix} -\left(\frac{r_s L_r^2 + r_r M^2}{\sigma L_s L_r^2}\right) & \omega_s & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} & \frac{M \omega_r}{\sigma L_s L_r} \\ -\omega_s & -\left(\frac{r_s L_r^2 + r_r M^2}{\sigma L_s L_r^2}\right) & -\left(\frac{M \omega_r}{\sigma L_s L_r}\right) & \frac{M}{\sigma L_s L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\left(\frac{1}{T_r}\right) & \omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_r & -\left(\frac{1}{T_r}\right) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

On peut simplifier encore  $A_\omega$  et on aura :

$$A_\omega = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) & \omega_s & \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} & \frac{(1-\sigma)\omega_r}{\sigma M} \\ -\omega_s & -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) & -\left(\frac{(1-\sigma)\omega_r}{\sigma M}\right) & \frac{1-\sigma}{\sigma M T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & -\left(\frac{1}{T_r}\right) & \omega_r \\ 0 & \frac{M}{T_r} & -\omega_r & -\left(\frac{1}{T_r}\right) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Avec :

$$T_r = \frac{L_r}{r_r} \quad \text{Constante de temps rotoriques}$$

$$T_s = \frac{L_s}{r_s} \quad \text{Constante de temps statoriques}$$

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \text{ Coefficient de dispersion}$$

L'expression du couple électromagnétique est :

$$C_{em} = P(\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds}) \quad (2.51)$$

L'équation mécanique est :

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \quad (2.52)$$

Avec :

J : Moment d'inertie

f : coefficient de frottement visqueux

$\Omega$  : vitesse de rotation de la machine

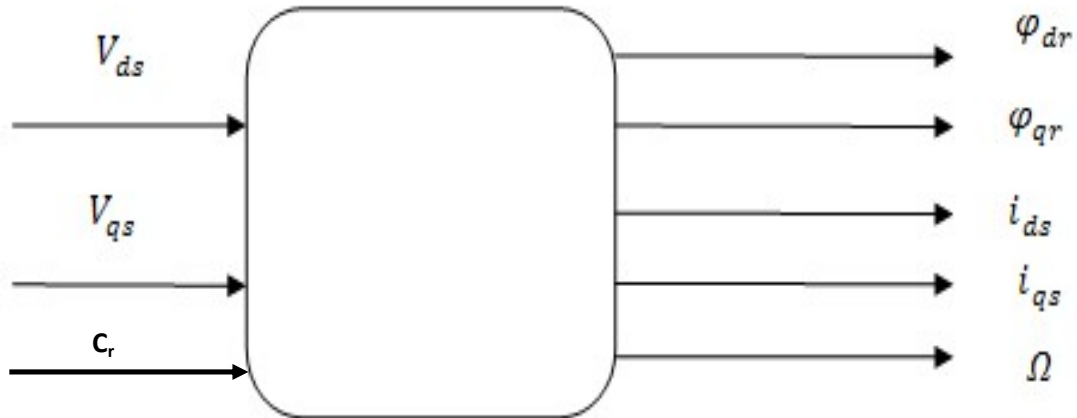


Figure 2.3 : schéma du modèle de la machine asynchrone en représentation d'état

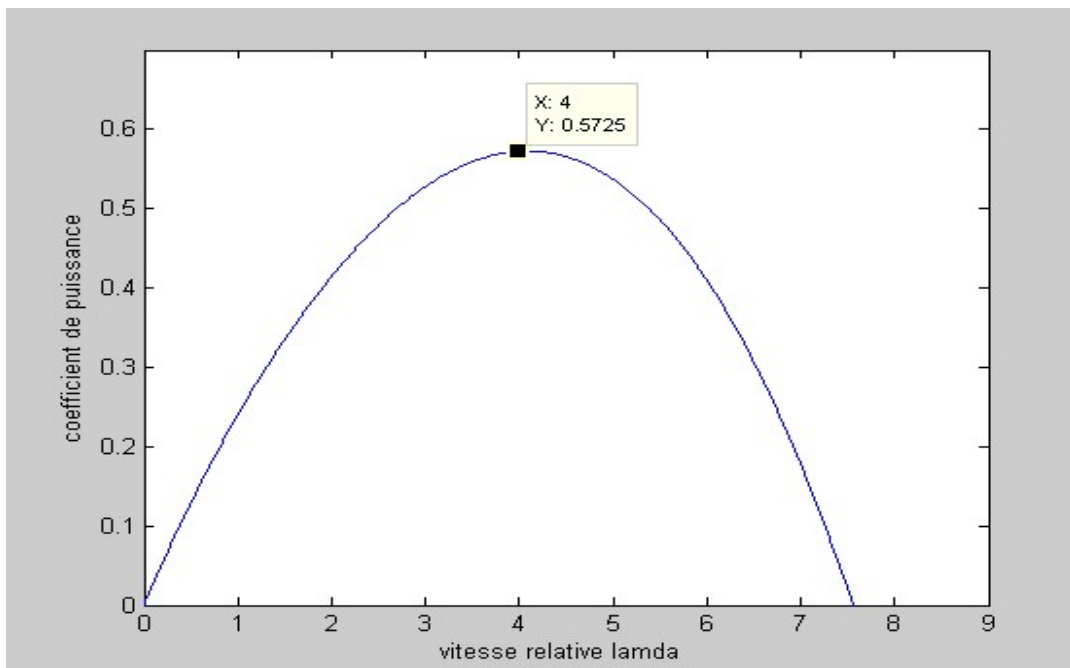
**2.7. Modélisation de la turbine**

La modélisation de la turbine consiste à modéliser la puissance mécanique et le couple mécanique développé par la turbine qui sont donnés par les relations (1.6) et (1.7). Dans le cadre de notre étude, nous avons modéliser la turbine d'une éolienne VESTAS 47-660 de 660Kw. C'est un modèle tri pales dont le diametre est de 47 m.

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne, nous avons pu la modélisé par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p = \left(\frac{1}{2,3}\right) (7,9563\lambda^5 10^{-5} - 17,375\lambda^4 10^{-4} + 9,86\lambda^3 10^{-3} - 9,4\lambda^2 10^{-2} + 6,38\lambda 10^{-1} + 0,001) \quad (2.53)$$

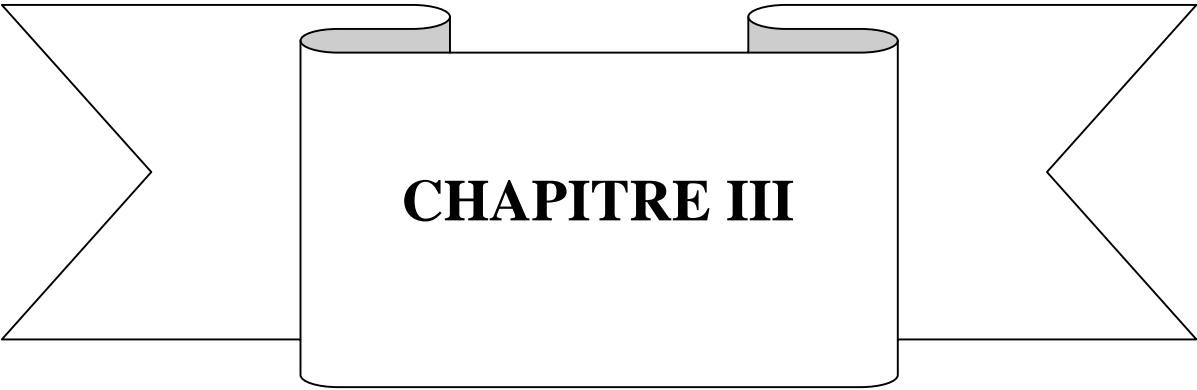
La courbe caracteristique correspondant à ce polynome est la suivante :



**Figure 1.4 :** Courbe caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative .

**Conclusion**

On a présenté dans ce chapitre, la modélisation de la machine asynchrone triphasé alimentée en tensions sous forme d'équations mathématiques(équations electriques et mécaniques), et le modèle de transformation de Park qui consiste à une transformation d'un système triphasé en un système diphasé équivalent ainsi que le modèle de la machine en représentation d'état, et la modélisation de la turbine éolienne.



**CHAPITRE III**

### 3.1. Introduction

En ingénierie, la simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et/ou 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 hyposynchrone et hypersynchrone, ainsi que le modèle de la turbine éolienne.

### 3.2. Outil de simulation Matlab-Simulink

#### 3.2.1. 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).

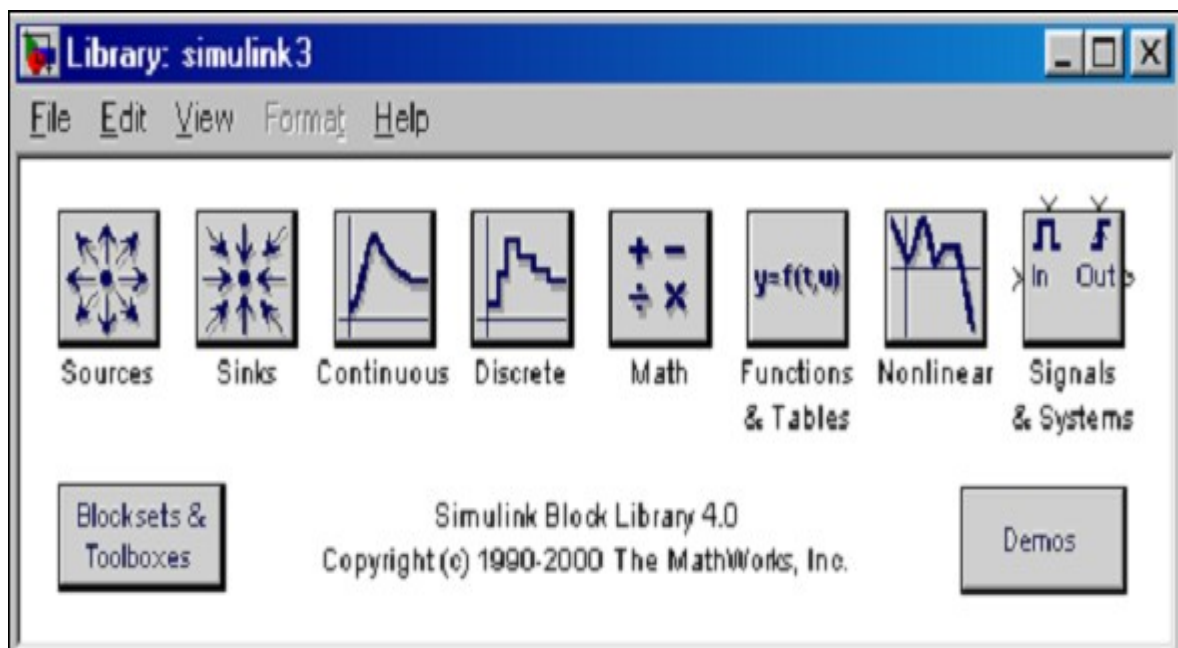
- En mode interactif, l'utilisateur a la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique.
- En mode programmation, il est possible d'écrire des programmes comme avec d'autres langages.

Dans MATLAB, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le Fortran. MATLAB s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire, MATLAB est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, le traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. MATLAB est une abréviation de MATRIX LABORATORY.

### 3.2.2. SIMULINK

SIMULINK est un programme pour la simulation des systèmes dynamiques linéaires où non linéaires ; une extension de MATLAB, dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires où non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. Les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques. SIMULINK possède une interface graphique pour visualiser les résultats sous forme de graphes ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est à dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement.

Il est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (librairies) classés par catégories. Les principales librairies sont montrées dans la figure ci-dessous :



**Figure3.1** : Les principales librairies SIMULINK

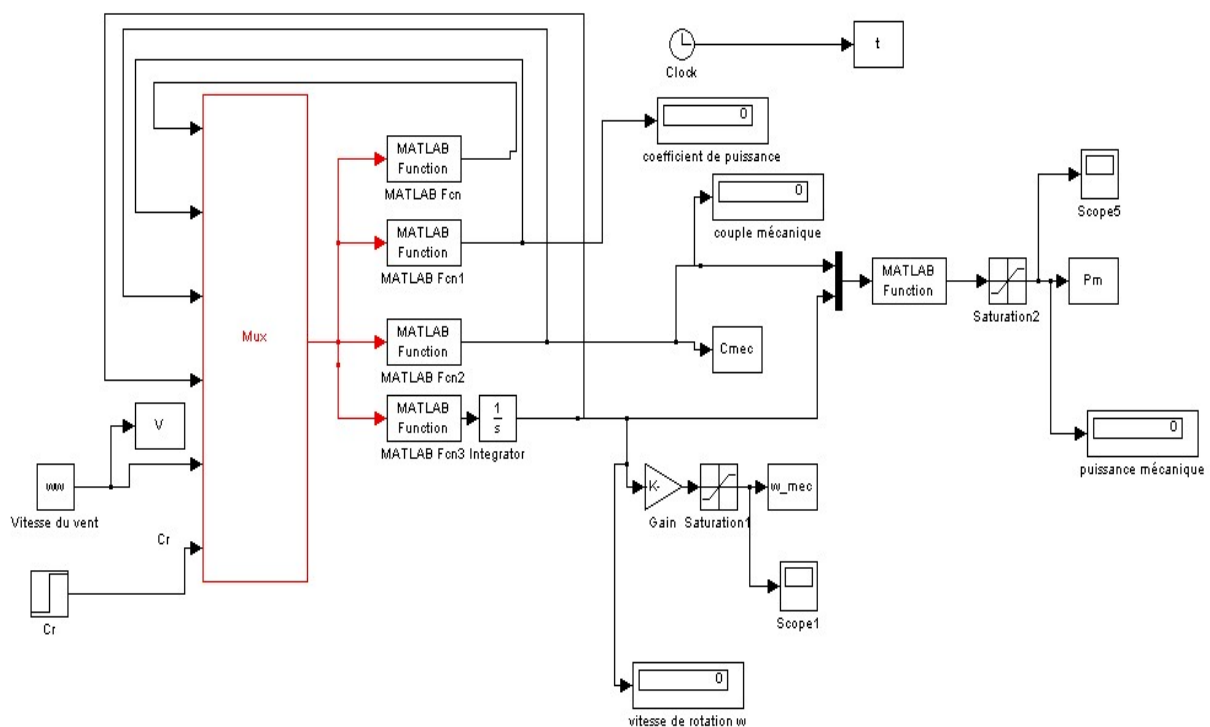
Librairie	Contenu
Sources	Différents types de signaux d'entrée
Sinks	Appareils virtuels de visualisation
Continuous	Systèmes et opérateurs continus
Discrete	Blocs représentant les systèmes discrets
Math	Opérateurs mathématiques
Functions & Tables	Fonctions et tables de valeurs
Nonlinear	Systèmes et opérateurs non linéaires
Signals & Systems	Blocs de connexion et sous-systèmes

**Tableau 3.1 :** Les principales bibliothèques SIMULINK

### 3.3. Développement du modèle Simulink de l'aérogénérateur

#### 3.3.1. Modèle Simulink de la turbine éolienne

La figure suivante représente le modèle SIMULINK de la turbine éolienne décrite par les équations (1.6), (1.7) et (2.53). Chaque bloc de la figure est issu d'une équation mathématique.



**Figure (3.2) :** Schémas de simulation de la turbine éolienne

3.3.2. Modèle Simulink de la génératrice asynchrone

➤ Bloc Simulink de la transformation de Park

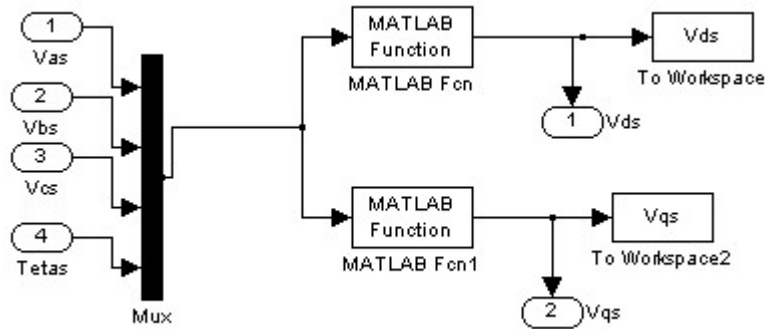


Figure (3.3) : Schémas de simulation de la transformation de Park

➤ Bloc Simulink de la transformation de Park inverse

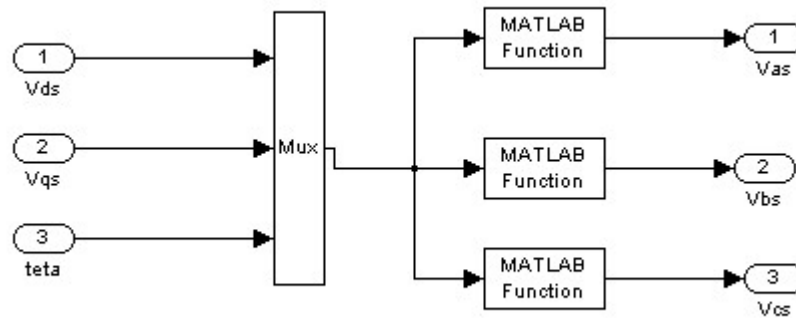


Figure (3.3) : Schémas de simulation de la transformation de Park inverse

➤ Bloc Simulink de circuit d'alimentation

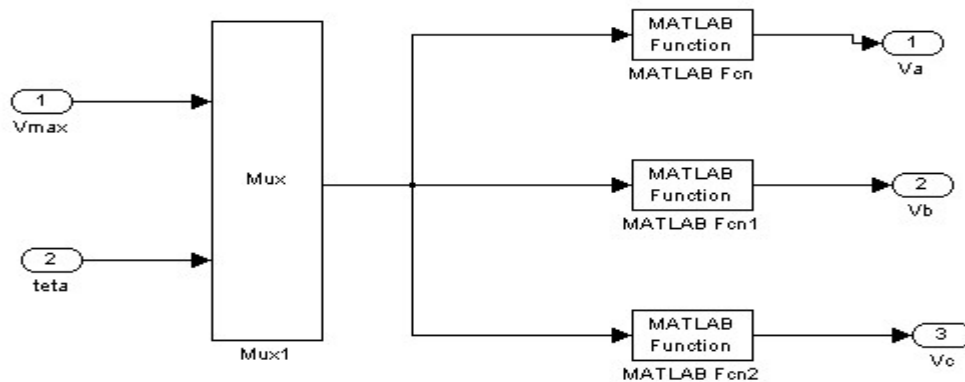


Figure (3.4) : Schémas de simulation de circuit d'alimentation

## ➤ Bloc simulink de la machine asynchrone en mode hyposynchrone (moteur)

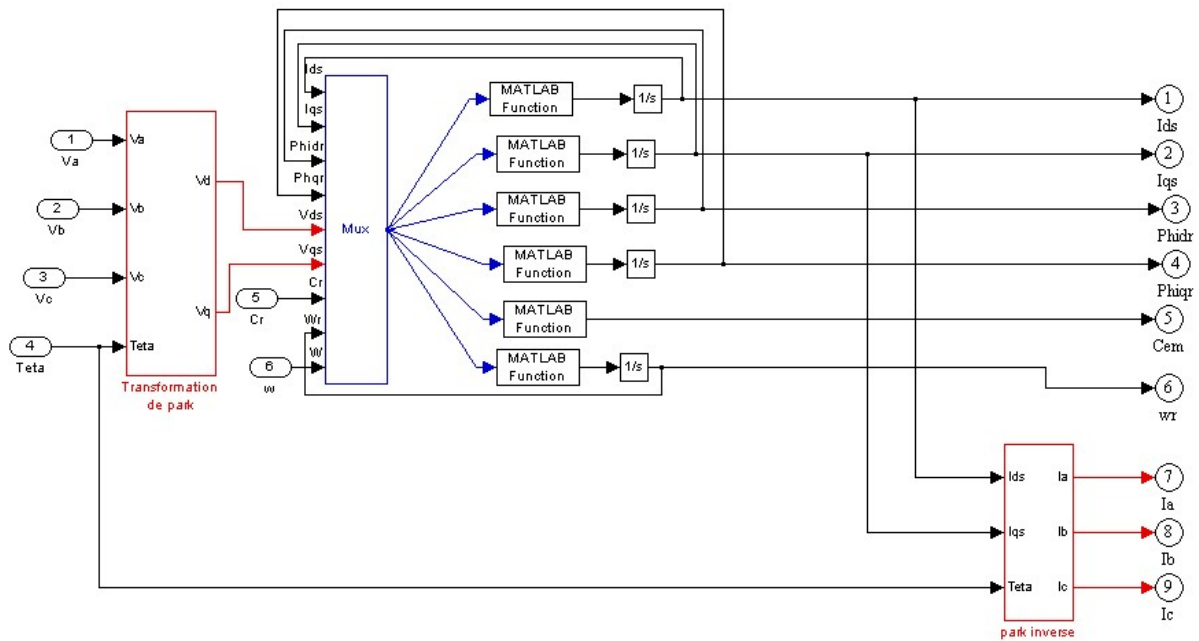


Figure (3.5) : Schémas de simulation d'un moteur asynchrone

## ➤ Bloc simulink de la machine asynchrone en mode hypersynchrone (génératrice)

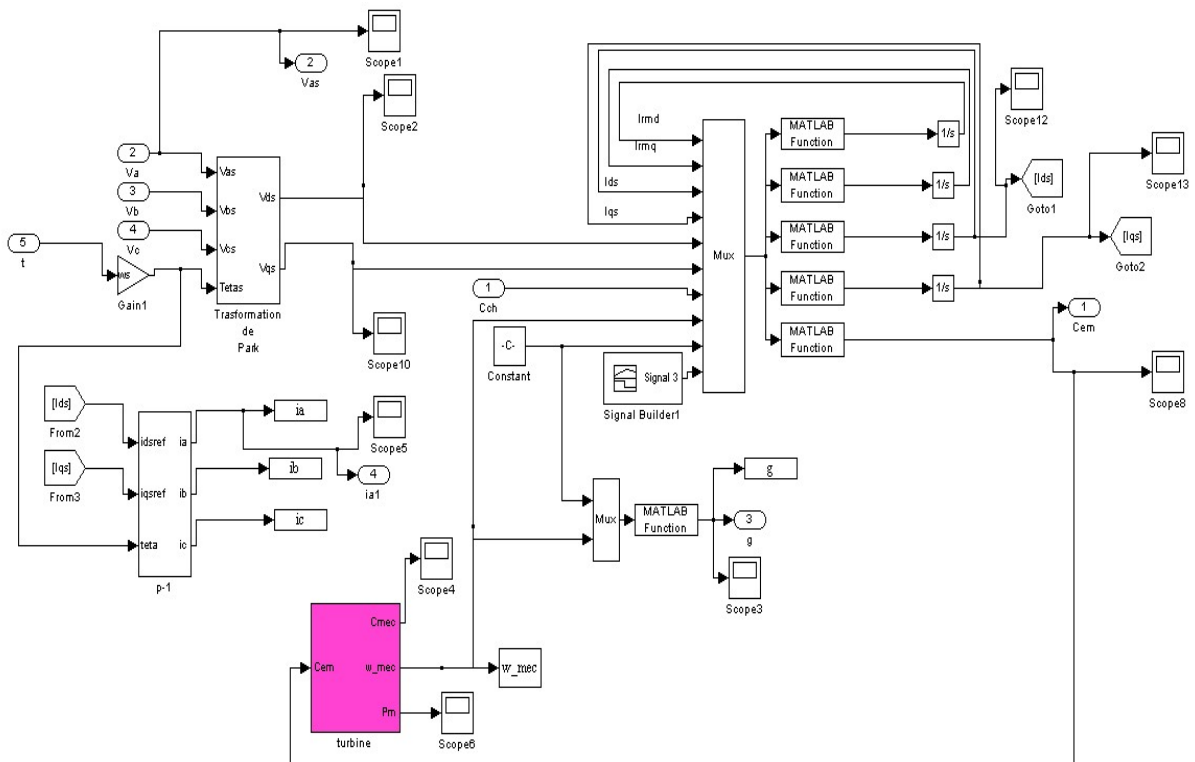
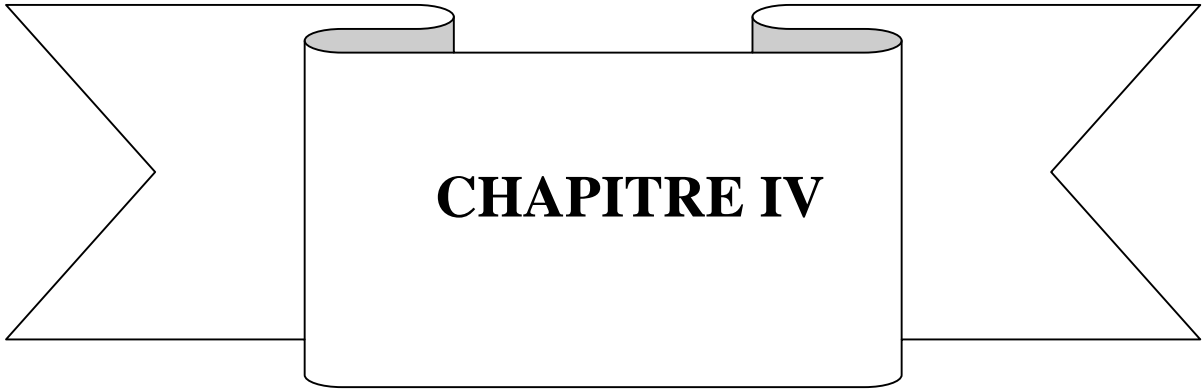


Figure (3.5) : Schémas de simulation de la génératrice asynchrone couplée avec la turbine.

### 3.4. Conclusion

Ce chapitre présente les schémas blocs de simulation du système étudié (Turbine, machine asynchrone) par le logiciel MATLAB/SIMULINK. Ce type de machine s'est imposé dans l'industrie grâce à sa robustesse et sa simplicité de construction ; par contre sa simulation reste complexe, car le modèle est fortement non linéaire. Le développement de l'outil informatique permet de surmonter cette difficulté.



**CHAPITRE IV**

## Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussion des résultats obtenus

### 4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation et l'interprétation des résultats obtenus lors de la simulation du modèle de l'aérogénérateur adopté, nous permettra de dresser un bilan de performances de la machine asynchrone dans l'optique de son utilisation dans les systèmes éoliens.

### 4.2. Résultats de la simulation

#### 4.2.1. La turbine éolienne

Les figures ci-dessous montrent les résultats de simulation de la turbine éolienne

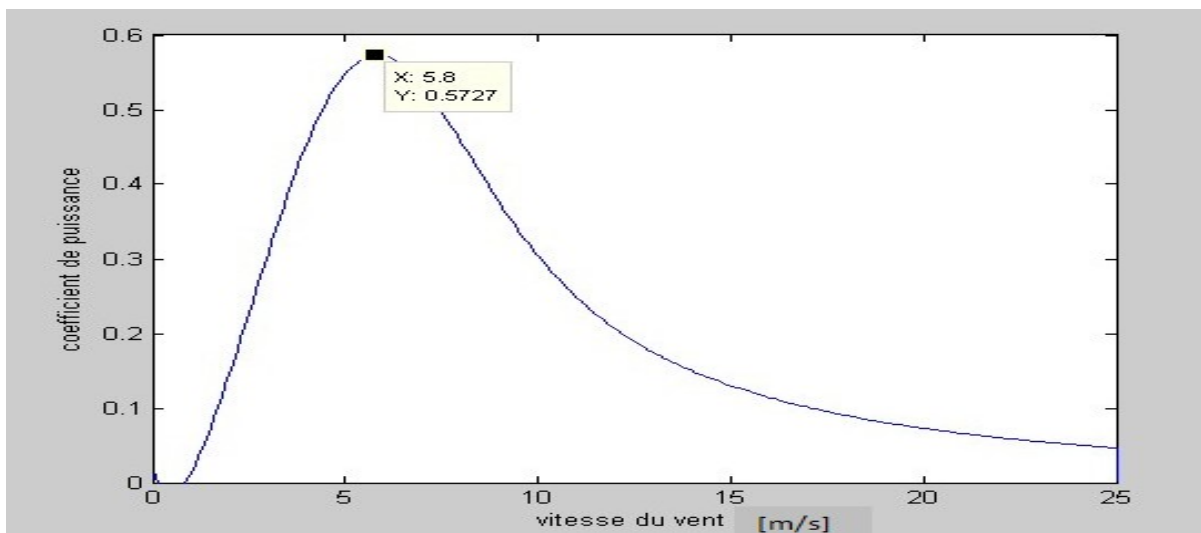


Figure 4.1 : Coefficient de puissance modélisé en fonction de la vitesse du vent

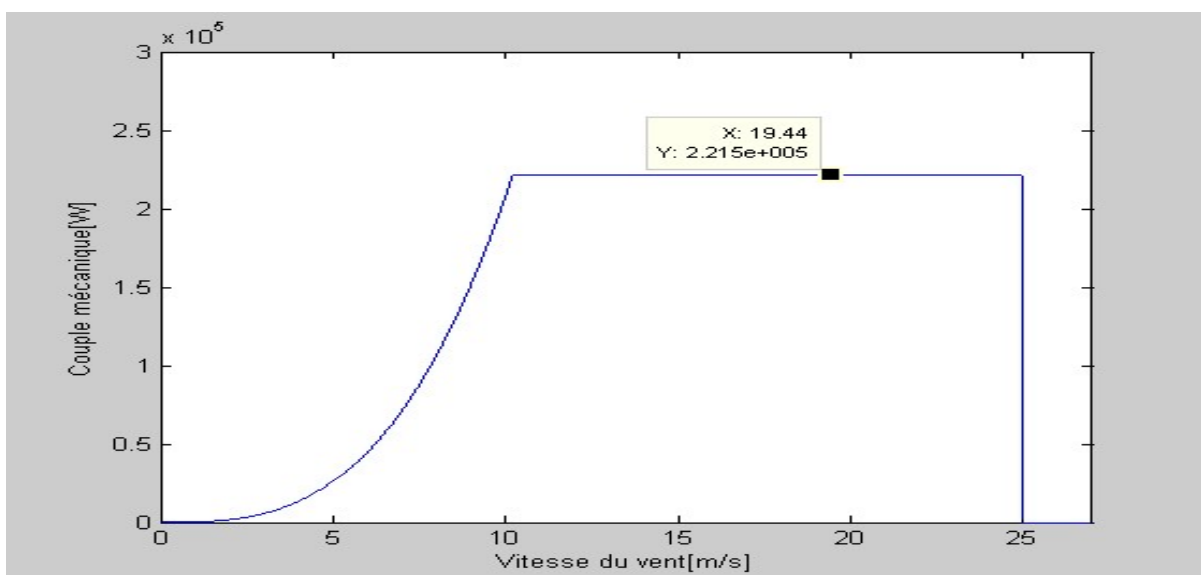
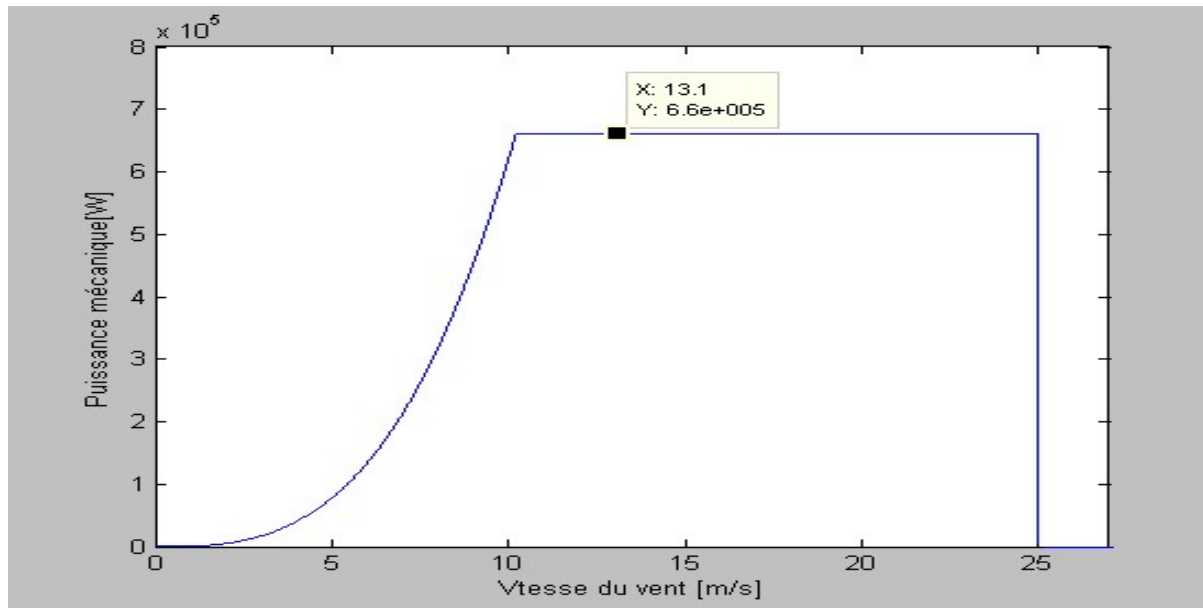


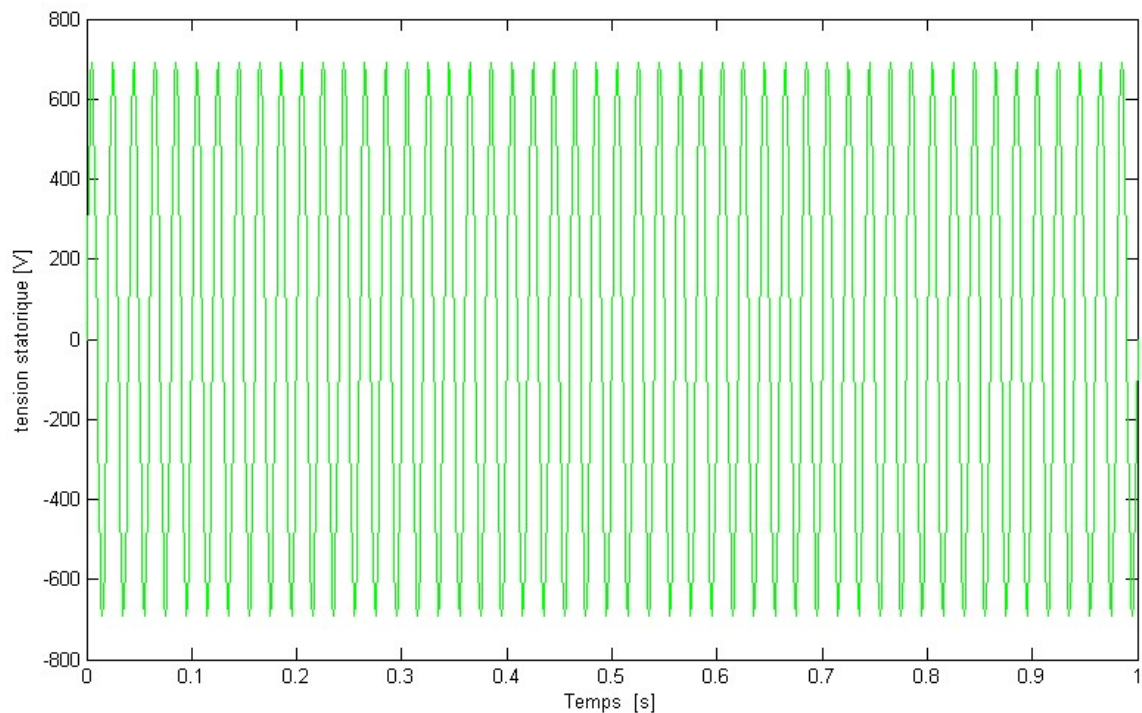
Figure 4.2 : Couple mécanique de la turbine en fonction de la vitesse du vent



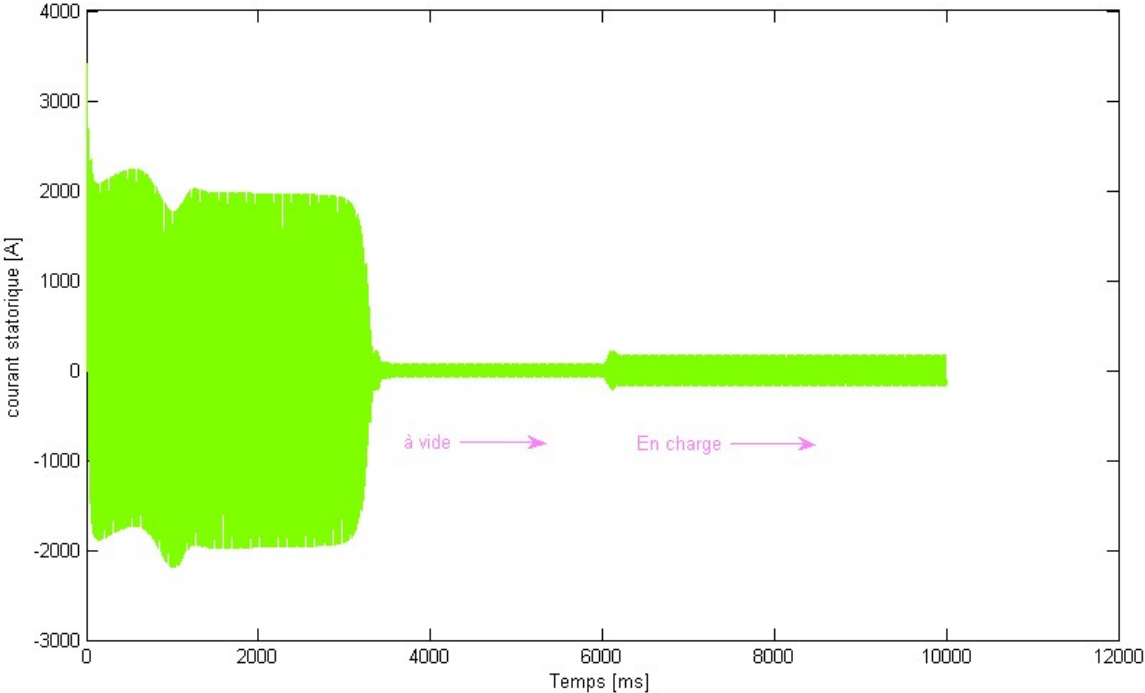
**Figure 4.2 :** Puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse du vent

### 4.2.2. La machine asynchrone en mode hyposynchrone (moteur)

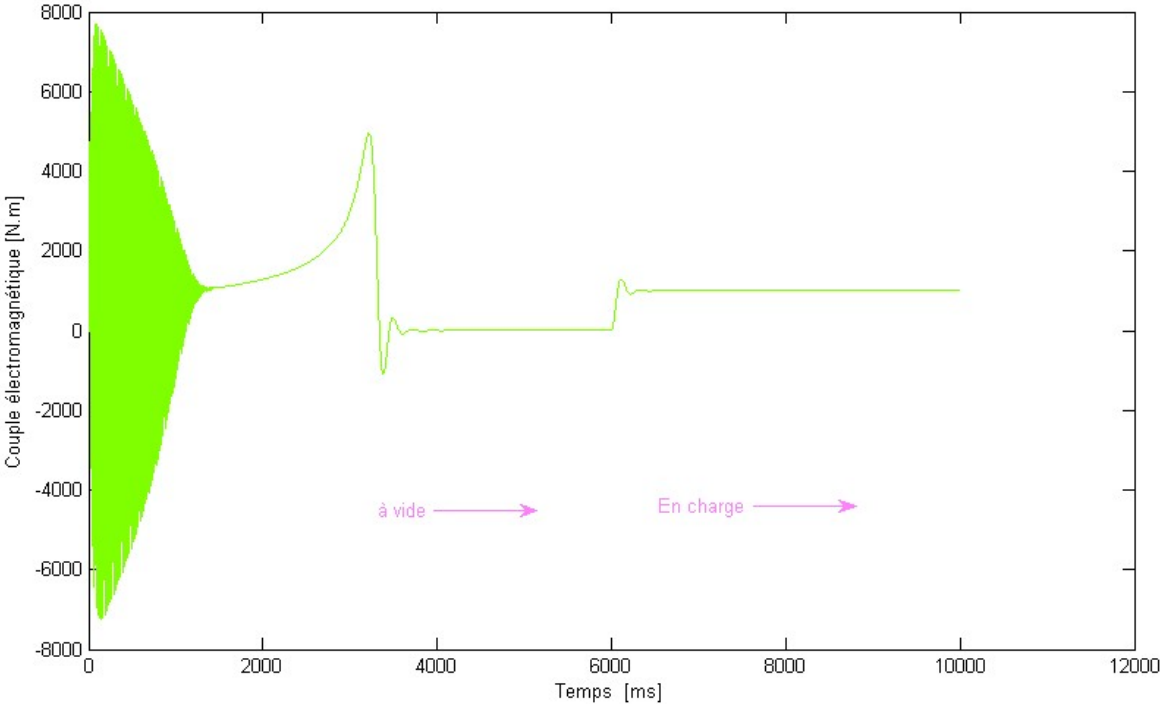
Les figures ((4.3),(4.4),(4.5),(4.6)) représentent les résultats de la simulation du processus de démarrage à vide du moteur asynchrone suivi de l'application d'une charge de 1000 N.m à l'instant 6s.



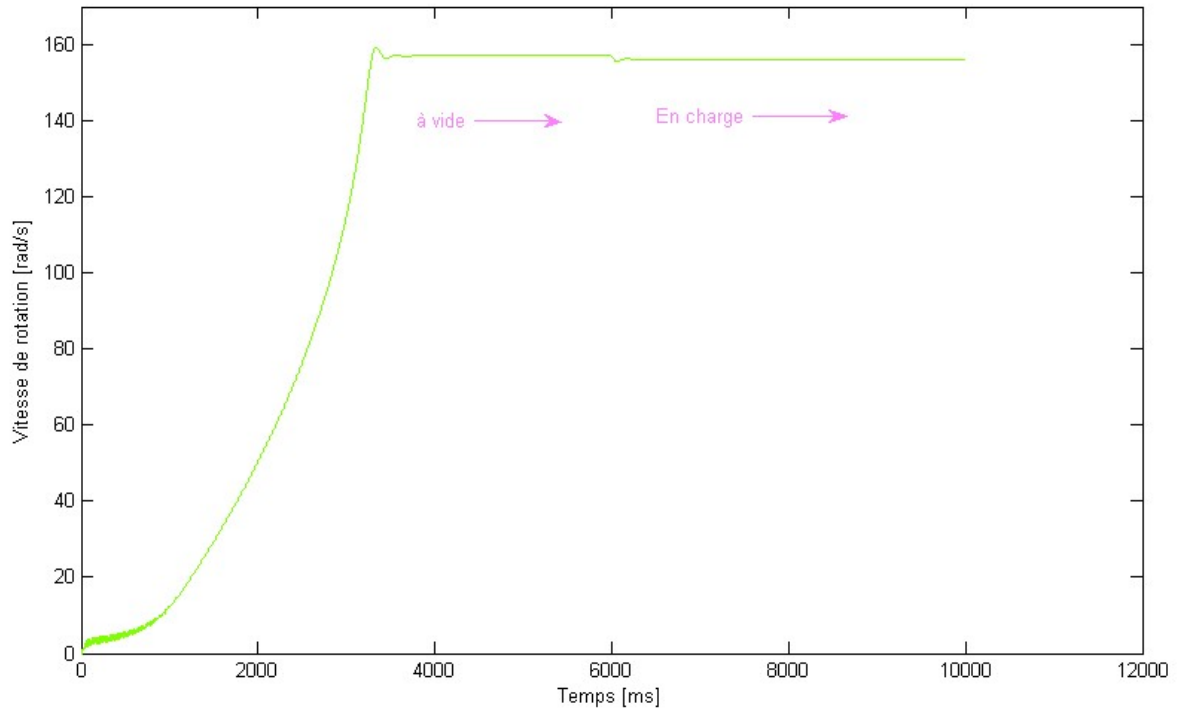
**Figure 4.3 :** Tension statorique



**Figure 4.4 :** l'évolution du courant dans une phase statorique aux différents régimes en fonctionnement moteur.



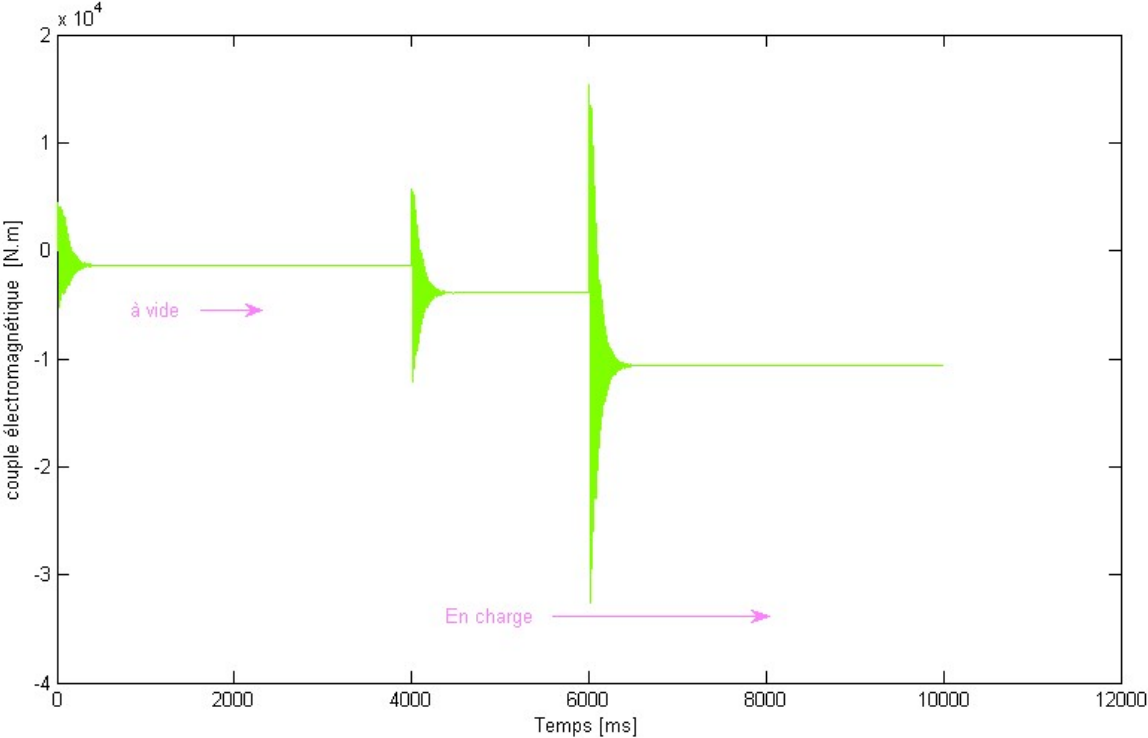
**Figure 4.5 :** Évolution du couple électromagnétique en fonction du temps pour les différents régimes.



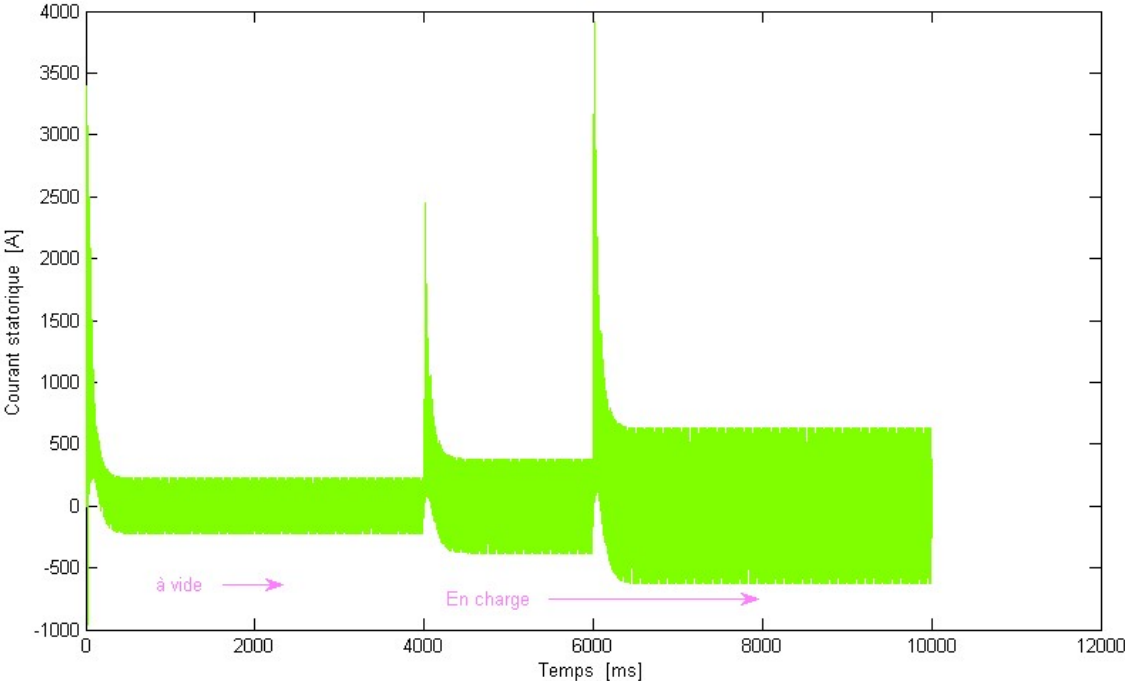
**Figure 4.6 :** Évolution de la vitesse de rotation du moteur pour les différents régimes.

### 4.2.3. La machine asynchrone en mode hypersynchrone (Génératrice)

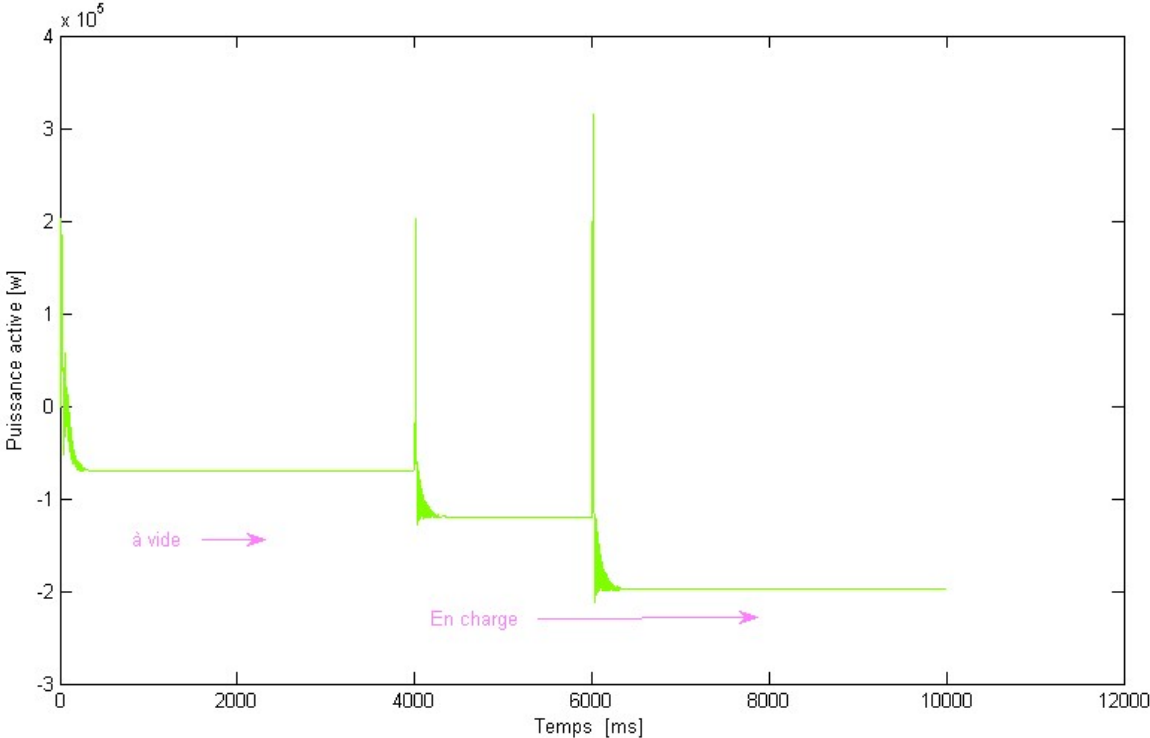
Les figures ci-dessous représentent les résultats de la simulation du processus de fonctionnement de la génératrice asynchrone à vide et pour différentes charges.



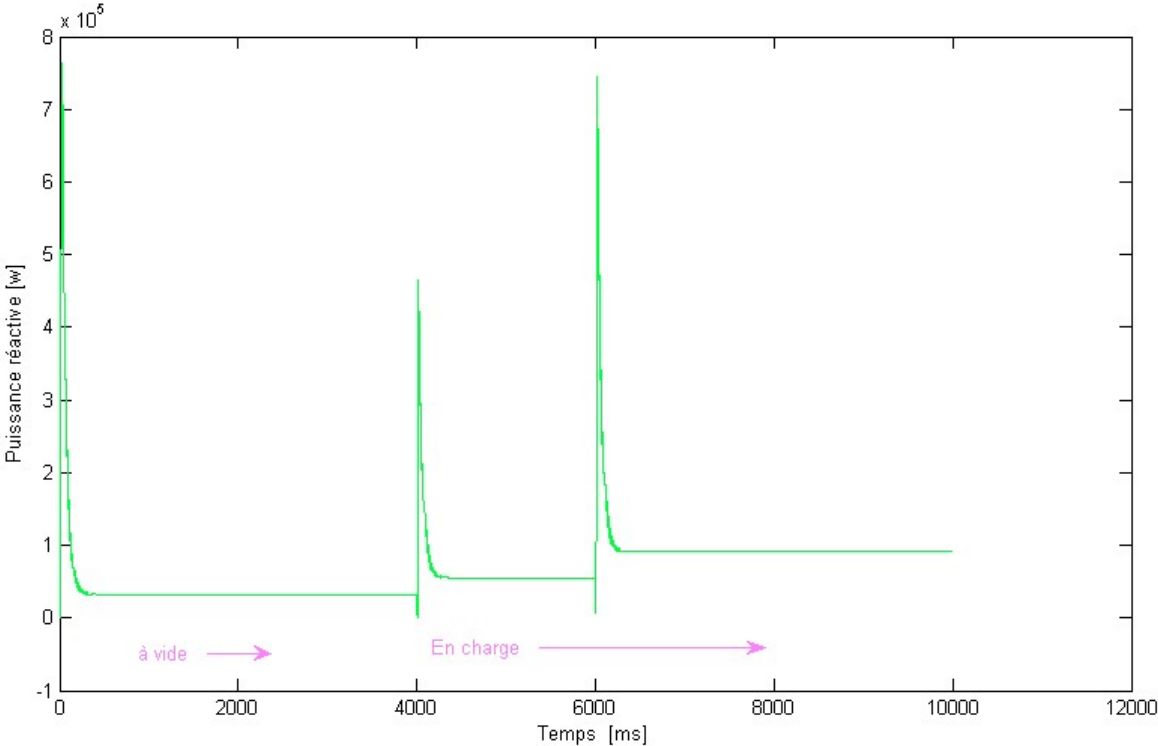
**Figure 4.7 :** Évolution du couple électromagnétique en fonction du temps pour les différents régimes (Génératrice).



**Figure 4.8 :** Évolution des courants statoriques en fonction du temps pour les différents régimes (Génératrice).



**Figure 4.9 :** Évolution de la puissance active en fonction du temps pour les différents régimes (Génératrice).



**Figure 4.10 :** Évolution de la puissance réactive en fonction du temps pour les différents régimes (Génératrice).

### **4.3. Interprétation des résultats**

#### **4.3.1. La turbine**

##### **❖ Évolution du coefficient de puissance ( $C_p$ )**

La figure (4.1) représente l'allure du coefficient de puissance modélisé en fonction de la vitesse du vent, nous constatons que cette allure reste toujours au-dessous de la limite de Betz. Cette limite en réalité n'est jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et celle du vent.

##### **❖ Évolution de la puissance mécanique et le couple mécanique**

Les figures (4.2 et 4.3)) représentent respectivement l'allure du couple mécanique et de la puissance mécanique. Ces courbes varient dans le même sens, donc on peut dire que le couple mécanique est l'image de la puissance mécanique.

#### **4.3.2. La machine asynchrone en mode hyposynchrone (moteur)**

##### **❖ Évolution des courants statoriques**

L'évolution des courants statoriques donnée sur la figure (4.4). On reconnaît le classique appel de courant au démarrage égal à 5 fois environ le courant nominal. Après la disparition du régime transitoire, le régime permanent est atteint au bout de 3s et il reste le courant correspondant au comportement inductif du moteur à vide qui est de 215A. À l'instant "t=6s" les courants augmentent et se stabilisent à une valeur de 365A suite à la perturbation de la charge.

##### **❖ Évolution du couple électromagnétique**

L'allure du couple électromagnétique est représentée sur la figure (4.5). Le couple subit des oscillations importantes dans le régime transitoire et tend vers zéro dans le régime permanent. À l'instant "t=6s", on applique une charge ; on remarque que le couple augmente pendant une courte durée pour se stabiliser à la valeur de couple de charge appliqué qui est de 1000N. Cela justifie l'existence d'un point de fonctionnement stable.

### **❖ Évolution de la vitesse de rotation**

La figure (4.6) représente la courbe de la vitesse de rotation. Les oscillations de couple se font évidemment ressentir sur l'évolution de la vitesse qui se stabilise en régime permanent à 157 rad/s (1500Tr/min) puisque le moteur possède 2 paires de pôles. L'application de charge à l'instant "t=6s" présente une influence remarquable à la vitesse qui diminue suite à cette perturbation et enfin se stabilise à une valeur de 2 rad/s, qui est inférieure à celle de synchronisme.

### **4.3.3. La machine asynchrone en mode hypersynchrone(Génératrice)**

#### **❖ Évolution du couple électromagnétique**

L'évolution du couple électromagnétique est représentée sur la figure (4.7), où le couple subit des oscillations au démarrage et se stabilise au régime permanent. À partir de l'instant t=4s et t=6s, le couple passe subitement à une valeur pour vaincre le couple de charge appliqué avec des pics importants suite à la perturbation de la charge. Le signe négatif justifie sa qualité en tant que couple résistant correspond au fonctionnement génératrice.

#### **❖ Évolution des courants statoriques**

La figure (4.8) représente l'allure de l'évolution des courants statoriques. Les courants au démarrage sont très importants, ceci est dû à l'oscillation de couple électromagnétique, puis se stabilisent en régime permanent. À partir de l'instant t=4s et t=6s, les courants augmentent avec des pics très importants suite au changement du régime de charge.

#### **❖ Évolution de la puissance active**

L'allure de l'évolution de la puissance active fournie par l'aérogénérateur est représentée par la figure (4.9). Cette courbe est caractérisée par des oscillations au démarrage et se stabilise en régime permanent. À partir de l'instant t=4s et t=6s, la puissance augmente avec des pics très importants pour satisfaire la charge appliquée. Le signe négatif indique que la puissance active fournie au réseau.

### ❖ Évolution de la puissance réactive

La figure (4.10) représente l'allure de la puissance réactive absorbée par le générateur. Au démarrage le générateur absorbe une énergie réactive importante pour magnétiser le rotor puis se stabilise en régime permanent. À partir de l'instant  $t=4s$  et  $t=6s$ , le générateur absorbe encore plus de l'énergie réactive avec des pics importants, ceci est dû au changement du régime de charge appliquée.

### 4.4. Étude de glissement

Le glissement correspond à la différence de vitesse entre le champ rotorique et le champ statorique exprimée sous la forme d'un pourcentage de la fréquence de rotation. Une machine de qualité se doit donc fonctionner avec un faible glissement.

$$g = \frac{N_s - N_r}{N_s} \quad (4.1)$$

Avec :

$N_s$  : est la fréquence de rotation du champ statorique.

$N_r$  : est la fréquence de rotation du champ rotorique.

Le glissement peut aussi être calculé à partir des vitesses angulaires :

$$g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (4.2)$$

La relation entre le couple électromagnétique et le glissement est donnée par la relation suivante :

$$C_{em} = T_{em} = 2 T_{max} \frac{1}{\left(\frac{g_{max}}{g} + \frac{g}{g_{max}}\right)} \quad (4.3)$$

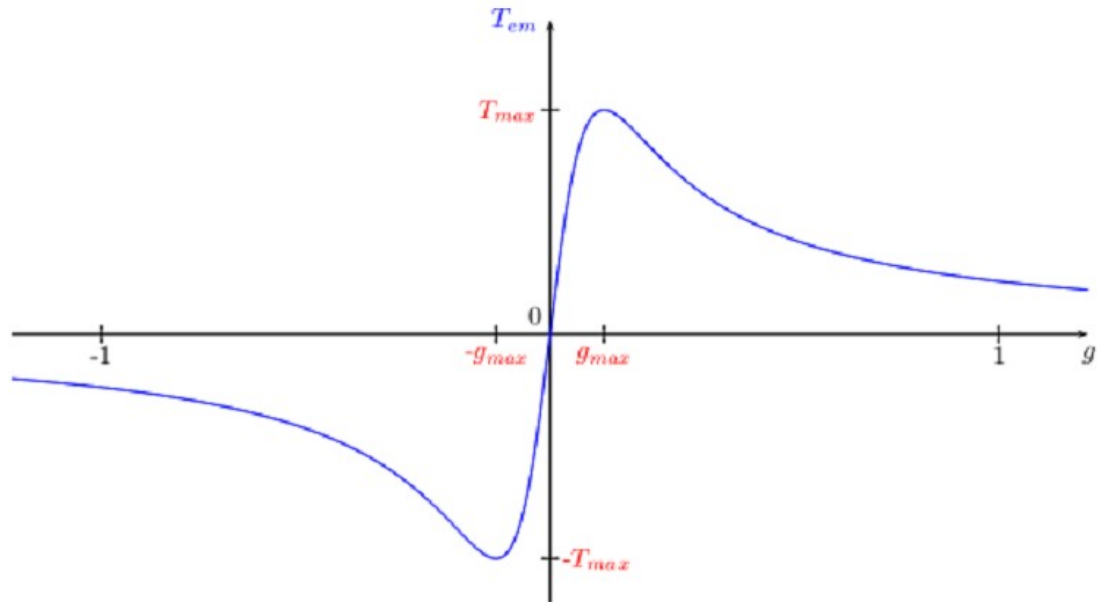
Avec :

$T_{max}$  : est le couple maximal

$g_{max}$  : est le glissement maximal

## Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussion des résultats obtenus

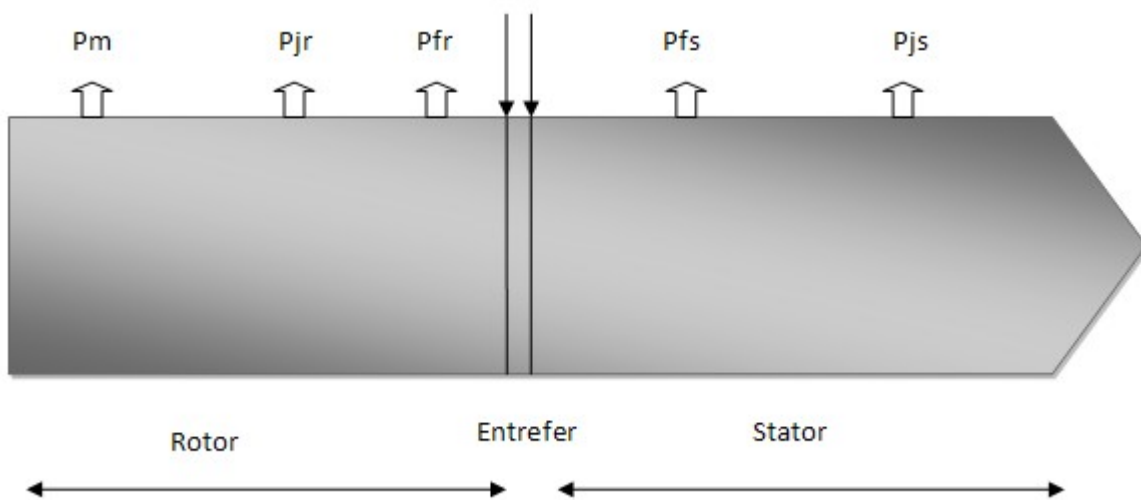
La figure suivante nous montre la courbe représentative de l'expression du couple en fonction du glissement qui possède une symétrie par rapport à l'origine.



**Figure 4.4 :** Le couple électromagnétique en fonction du glissement

### 4.5. Bilan de puissance de la génératrice

Le schéma ci-dessous représente la transmission de la puissance à travers la machine :



**Figure 4. :** Transmission de puissance dans la machine

## **Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussion des résultats obtenus**

---

Avec :

$P_a$  : Puissance absorbé ou puissance électrique fournie à la machine.

$P_{em}$  : Puissance électromagnétique.

$P_u$  : Puissance utile ou puissance mécanique transmise à la charge.

$P_{js}$  : Pertes par effet joule dans le bobinage statorique.

$P_{fs}$  : Pertes dans le fer statorique.

$P_{jr}$  : Pertes par effet joule dans le cuivre de rotor.

$P_{fr}$  : Pertes dans le fer rotorique.

$P_m$  : Pertes mécanique.

Les pertes fer rotorique sont souvent négligées, car elles sont proportionnelles à la fréquence rotorique qui est très faible.

### **4.6. Détermination de la vitesse du vent de compensation des pertes**

Pour déterminer la vitesse du vent qui permet à la génératrice de compenser ses propres pertes et celles de multiplicateur, il faut faire quelques hypothèses simplificatrices pour faciliter le calcul des différentes pertes.

On pose :

$P_{jr}$  et  $P_{fr}$  : Sont négligées

$$P_{mec} = 620,686 V^3$$

Où :  $P_{mec}$  : est la puissance mécanique délivrée par la turbine éolienne.

$V$  : est la vitesse du vent.

➤ **Pertes joules statorique :**

$$P_{js} = 3 R_s I_s^2 \tag{4.4}$$

Avec :

## Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussion des résultats obtenus

$I_s$  : le courant à vide.

$R_s$  : Résistance des enroulements statorique.

### ➤ Pertes totales de la machine asynchrone :

$$P_{total} = P_{js} + P_{fs} + P_m \quad (4.5)$$

### ➤ Pertes dans le multiplicateur :

Le rendement du multiplicateur est de 90%. Cela veut dire qu'il ya 10% de pertes totales de la machine asynchrone.

### ➤ Pertes totales de l'aérogénérateur :

Les pertes totales de l'aérogénérateur sont la somme des pertes totales dans la machine asynchrone et dans le multiplicateur de vitesse.

Les différentes pertes calculées se résument dans le tableau suivant :

Pertes joules statoriques	17274 (w)
Pertes fer statoriques	4000 (w)
Pertes dans le multiplicateur	2427,40 (w)
Pertes mécaniques	3000 (w)
Pertes totales de l'aérogénérateur	26701,40 (w)

**Tableau (4.2) :** différentes pertes du l'aérogénérateur.

Après avoir calculé toutes les pertes de l'aérogénérateur, nous avons pu calculer la valeur minimale de la vitesse de vent pour laquelle l'aérogénérateur va commencer à débiter une puissance électrique sur le réseau ou bien sur une charge. Cette dernière est donnée par la relation suivante :

$$V_{min} = \sqrt[3]{\frac{P_{total}}{620,686}} = 3,50 \text{ m/s}$$

### **4.7. Conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique.**

Citons quelques conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique qui obligent le producteur de l'énergie électrique quant à la fourniture de l'énergie réactive nécessaire au fonctionnement des générateurs :

- Dans le cas des génératrices asynchrones, l'installation des batteries de condensateurs est obligatoire en vue de production de l'énergie réactive.
- Le producteur doit fournir une puissance réactive nominale  $Q_n=0,4P_n$ , formule dans laquelle  $P_n$  représente la puissance active de l'installation.
- Afin d'éviter le risque de surtension lors de découplage du réseau, il impose que la génératrice asynchrone ne reste jamais isolées sur des condensateurs sans charge.

#### **4.7.1. Compensation de l'énergie réactive.**

Le but de compensation de l'énergie réactive est d'augmenter le facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) dans un réseau électrique donné. Pour ce faire on doit déterminer le facteur de puissance dans le réseau considéré, puis on déterminera le facteur de puissance de ce même réseau après avoir introduit un compensateur.

- Le coefficient de puissance de la génératrice est donné par le constructeur.

$$\cos \varphi = 0.88.$$

- Calcul de la puissance active débitée par la génératrice :

$$P_a = \sqrt{3} U I \cos \varphi = 660 \text{ kW}.$$

- Calcul de la puissance réactive absorbée par la génératrice :

$$Q_a = \sqrt{3} U I \sin \varphi = 356 \text{ kVAR}.$$

- calcul de la puissance apparente :

$$S = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2} = 750 \text{ kVA}.$$

## Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussion des résultats obtenus

Le compensateur de l'énergie réactive doit donc augmenter le facteur de puissance jusqu'à la valeur imposé par les conditions techniques de raccordement au réseau public des installations de production autonome d'énergie électrique ( $\cos \varphi = [0.92 - 0.93]$ ).

$$\frac{Q_a - Q_{\text{compensateur}}}{P_a} = \tan \varphi_i - \tan \varphi_f$$

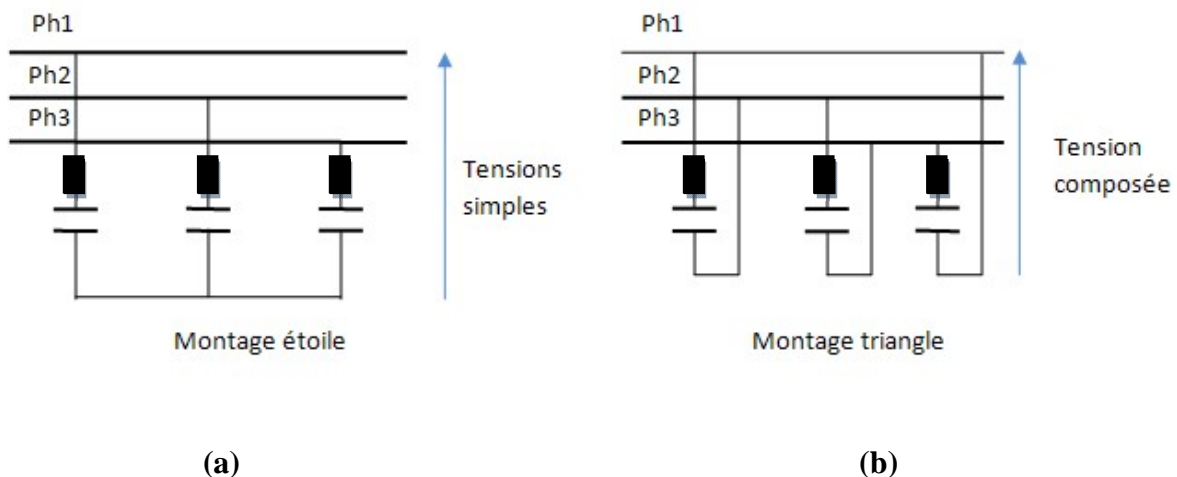
Ce qui implique que :

$$Q_{\text{compensateur}} = Q_a - P_a (\tan \varphi_i - \tan \varphi_f) = [90,20 - 107,58] \text{ kVAR}$$

Donc le compensateur doit compenser au moins 90,20 kVAR pour ramener le facteur de puissance à la norme minimale imposée par les conditions techniques de raccordement au réseau 0,92.

### 4.7.2. Détermination de la valeur des capacités

Le compensateur de l'énergie réactive est un ensemble de batteries de condensateurs, qui compensent l'énergie réactive à l'aide des capacités qui peuvent être connectées en étoile ou en triangle. La génératrice est équipée d'une batterie de condensateurs de 250 kVA (voir DTD3 ANNEXE).



**Figure 4** : condensateurs connectés étoile(a), en triangle(b).

## Chapitre IV : Résultats de la simulation et discussion des résultats obtenus

---

- La valeur des capacités pour le couplage étoile :

$$Q_{unitaire} = \frac{Q_{batterie}}{3} = \frac{25 \cdot 10^3}{3} = 83kVAR \quad C = \frac{Q_{unitaire}}{V^2 \omega} = 1,65 \cdot 10^{-3} F$$

$$C = 1,65 \cdot 10^{-3} F$$

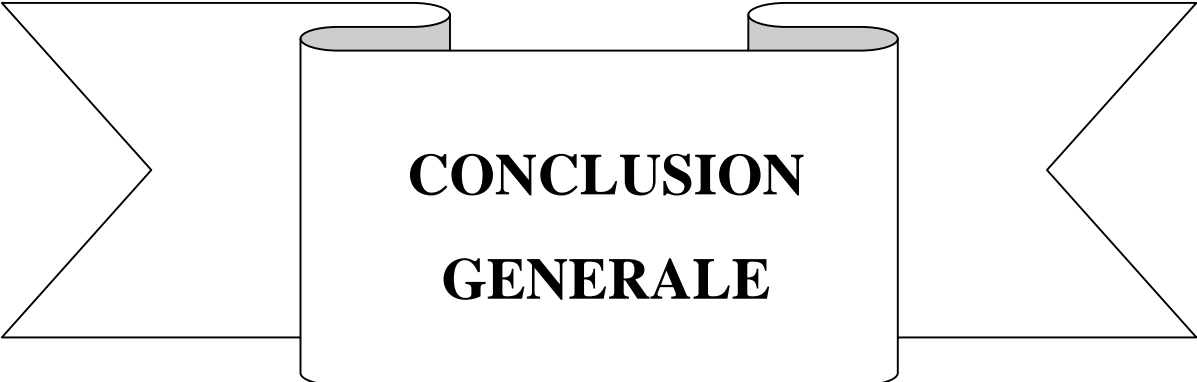
- La valeur des capacités pour le couplage triangle :

$$Q_{unitaire} = \frac{Q_{batterie}}{3} = \frac{25 \cdot 10^3}{3} = 83kVAR \quad C = \frac{Q_{unitaire}}{(\sqrt{3}V)^2 \omega} = 0,555 \cdot 10^{-3} F$$

$$C = 0,555 \cdot 10^{-3} F$$

### 4.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le comportement de la turbine et de la machine asynchrone en deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice) à travers un modèle de simulation. Les résultats de simulation sont présentés pour valider le modèle mathématique du système (turbine, machine asynchrone) étudié.



**CONCLUSION  
GENERALE**

### Conclusion générale

Suite à la réduction progressive des ressources pétrolières, plusieurs pays sont tournés vers de nouvelles formes d'énergies électriques dites renouvelables. Parmi celles-ci, l'éolienne apparaît clairement en bonne place comme énergie complémentaire à l'énergie électrique utilisée.

Le travail effectué dans ce mémoire a comme objectif l'étude et simulation de différents composants d'un aérogénérateur éolien de type VESTAS V47-660.

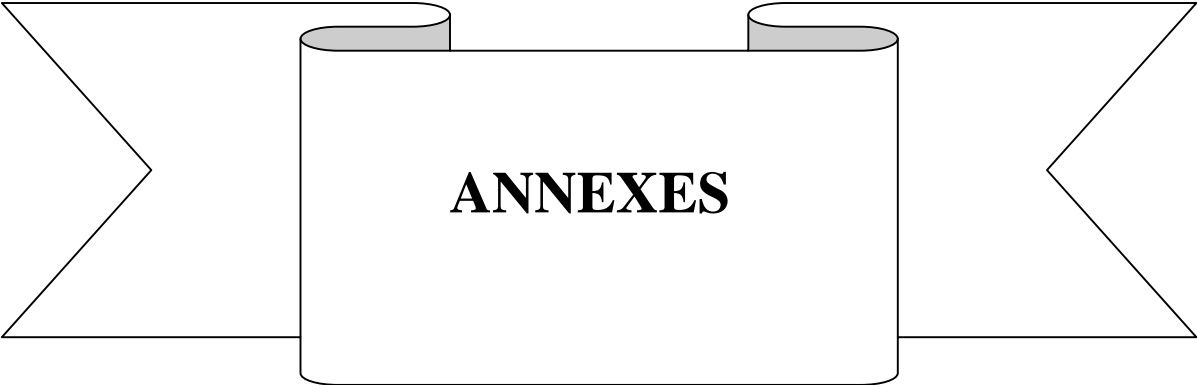
La première partie de ce travail rappelle les concepts fondamentaux de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique et dresse un état de l'art sur les différentes associations machines électrique-convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. Notre étude a été orientée vers un système éolien d'axe horizontal de puissance 660Kw.

La seconde partie de ce mémoire, nous avons modélisé et simulé la turbine éolienne et la génératrice asynchrone en fonctionnement dynamique car elles constituent un élément fondamental dans la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.

Dans la dernière partie de ce travail, nous avons observé le comportement du système (turbine, génératrice) en régime équilibré à travers le modèle de simulation, ainsi que nous avons réalisé une étude consistant à calculer les différentes pertes de puissance dans le système à du modèle de la machine et les capacités minimales nécessaires pour la compensation de l'énergie réactive.

Nous espérons que notre travail puisse servir de base pour d'autres investigations dans le domaine de l'énergie éolienne. Face aux résultats obtenus, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de l'aérogénérateur asynchrone sont envisageables :

- Étude des performances et les limites de l'utilisation d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée par une batterie de condensateurs.
- Intégration de la machine asynchrone dans un parc éolien mixte avec ou sans stockage.



## ANNEXE A

Paramètres de la turbine éolienne et la machine asynchrone implantés sous Matlab.

```

'
***** Paramètres de la turbine *****
ren=1.25;
R=23.5;
F=0.01;
Jv=250;
c1=7.9563e-5;
c2=-17.375e-4;
c3=9.86e-3;
c4=-9.4e-2;
c5=6.38e-1;
c6=0.001;

***** paramètres de la machine ****
Vs=690;
ws=2*pi*50;
Rs=0.0146;
Lr=0.0303;
Rr=0.0238;
Ls=0.0306;
J=28;
p=2;
Ts=Ls/Rs;
Tr=Lr/Rr;
sigma=0.03577;
fv=0.0034;
a11=(1/sigma)*((1/Ts)+((1-sigma)/Tr));
a22=1/Tr;
a33=((1-sigma)/sigma)*(1/Tr);
a44=(1-sigma)/sigma;
a55=(p^2/J)*(1-sigma)*Ls;
a66=fv/J;
b11=1/(sigma*Ls);
b22=p/J;

```

## ANNEXE B

### DOCUMENTATION TECHNIQUE GÉNÉRATRICE VESTAS®

#### Rated Electrical Data and Power Factor Correction

V47-660 kW have one generator at 660 kW.

Power	:	660 kW
Generator type	:	Asynchronous with VRCC
Building size	:	400
Degree of protection	:	IP54
Voltage	:	690 Vac
Frequency	:	50 Hz
Number of poles	:	4
Slip regulation interval	:	1-10 %
Generator power factor (cos $\phi$ ):	:	0.88
Generator current	:	628 A
Power factor correction	:	250 kVAr
Resulting power factor (grid side)	:	0.98
Resulting current (grid side)	:	560 A

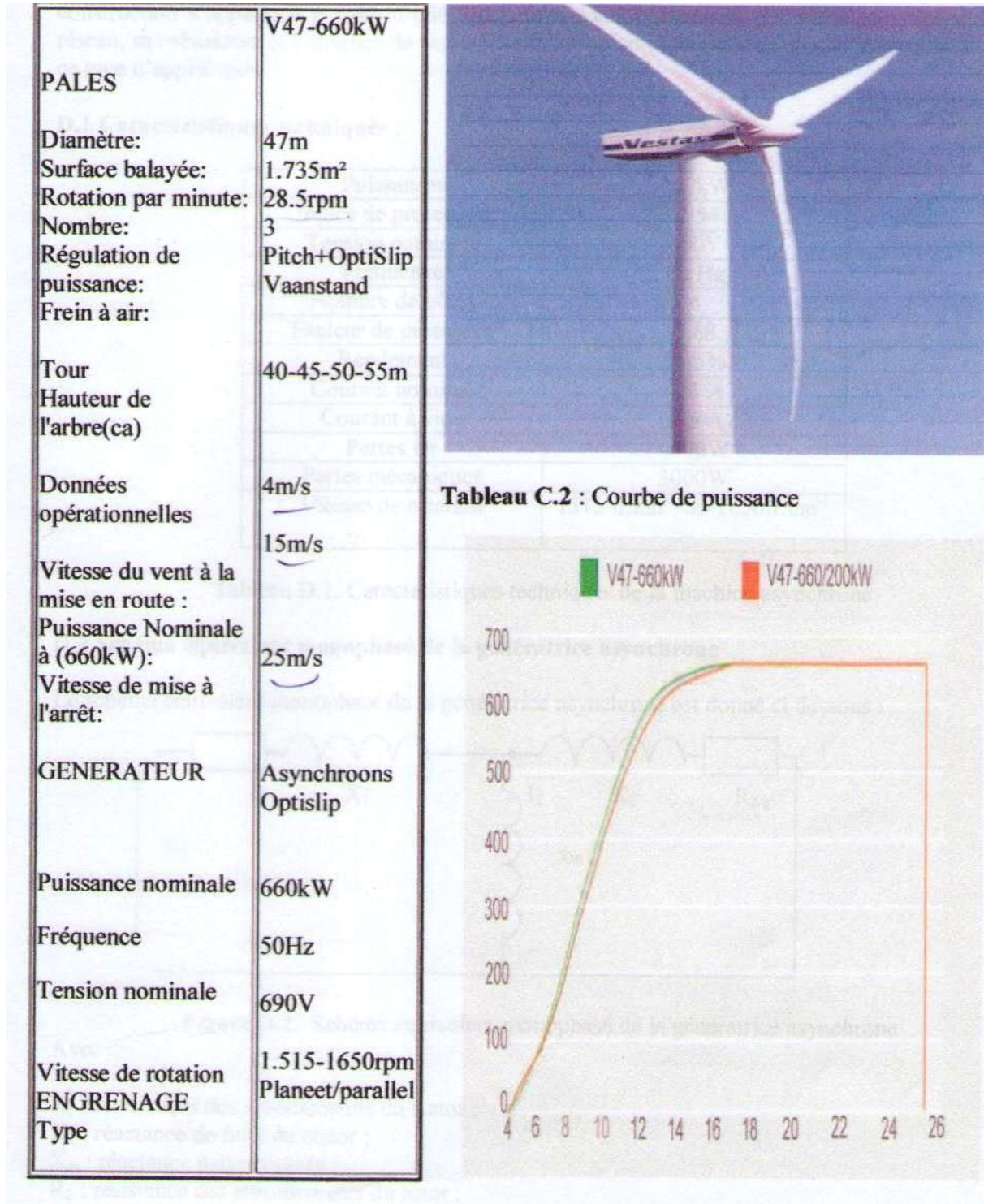
#### Nameplate on the Ground Controller

		
Vestas Wind Systems A/S Smed Sørensens Vej 5 DK-6950 Ringkøbing Tlf. +45 96752575 Fax +45 96752436		
Wind Turbine Type:	V47-660/200 kW	
Controller type:	VMP-660kW-690V 50Hz	
Voltage:	3x690 V $\pm 10/5\%$	
Frequency:	50 Hz $\pm 1/-3$ Hz	
Current:	560 A	
Max. short circuit current:	$I_k = 15$ kA	
Main wiring diag:	946065	

## ANNEXE C

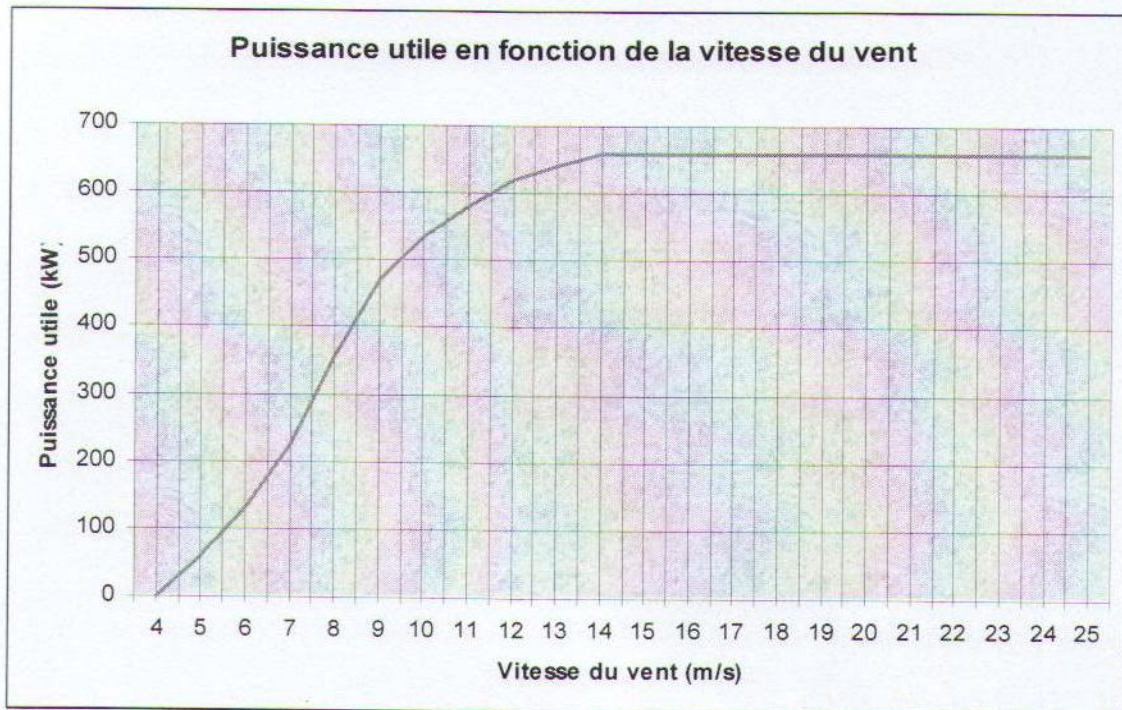
## AEROGENERATEUR VESTAS 47-660

Figure C1 : Aérogénérateur VESTAS 47-660



## ANNEXE E

### CARACTERISTIQUE DE LA GENERATRICE



### ALPES TECHNOLOGIES

#### BATTERIES DE CONDENSATEURS POUR COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE.

Gamme Alpi bloc Standard 690V 50Hz Triphasé	
Puissance nominale (kvar)	Référence
10	B1069
15	B1569
20	B2069
25	B2569
30	B3069
40	B4069
50	B5069
60	B6069
70	B7069
80	B8069
90	B9069
100	B10069
120	B12069

## ANNEXE F

## SILEC CABLES

INTENSITÉ ADMISSIBLE EN RÉGIME PERMANENT  
DANS UNE LIAISON BT (Ampères)

POSE A L'AIR LIBRE - Température ambiante 30°C

Type de liaison		Nature du courant (1)						
Câble à isolant PVC	Câble multipolaire	Triphasé		Continu ou monophasé				
	Système d'unipolaires		Triphasé		Continu ou monophasé			
Câble à isolant élastomère synthétique	Câble multipolaire				Triphasé		Continu ou monophasé	
	Système d'unipolaires					Triphasé		Continu ou monophasé
Section nominale mm <sup>2</sup>		ÂME EN CUIVRE						
	1,5	18,5	19,5	22	23	24	26	27
	2,5	25	27	30	31	33	36	37
	4	34	36	40	42	45	49	50
	6	43	48	51	54	58	63	65
	10	60	63	70	75	80	86	90
	16	80	85	94	100	107	115	121
	25	101	112	119	127	138	149	161
	35	126	138	147	158	169	185	200
	50	153	168	179	192	207	225	242
	70	196	213	229	246	268	289	310
	95	238	258	278	298	328	352	377
	120	276	299	322	346	382	410	437
	150	318	344	371	395	441	473	504
	185	364	392	424	450	506	542	575
	240	430	461	500	538	599	641	679
	300	497	530	576	621	693	741	783
	400			656	754	825		940
	500			749	868	946		1083
	630			855	1005	1088		1254
	800					1310*		1460*
	1000					1515*		1682*
		ÂME EN ALUMINIUM						
	2,5	19,5	21	23	24	26	28	
	4	26	28	31	32	35	38	
	6	33	36	39	42	45	49	
	10	46	49	54	57	62	67	
	16	61	66	73	77	84	91	
	25	78	83	90	97	101	108	121
	35	96	103	112	120	126	135	150
	50	117	125	136	146	154	164	184
	70	150	160	174	187	198	211	237
	95	183	195	211	227	241	257	289
	120	212	226	245	263	280	300	337
	150	245	261	283	304	324	346	389
	185	280	298	323	347	371	397	447
	240	330	352	382	400	439	470	530
	300	381	406	440	471	508	543	613
	400			526	600	663		740
	500			610	694	770		858
	630			711	808	899		996

(1) Nombre de conducteurs effectivement parcourus par le courant :  
 - continu ou monophasé : 2  
 - Triphasé : 3.

\* Sections non reprises par la NF C 15-100.

## ANNEXE G

## SILEC CABLES

## COEFFICIENT DE SELF-INDUCTION D'UN CIRCUIT.

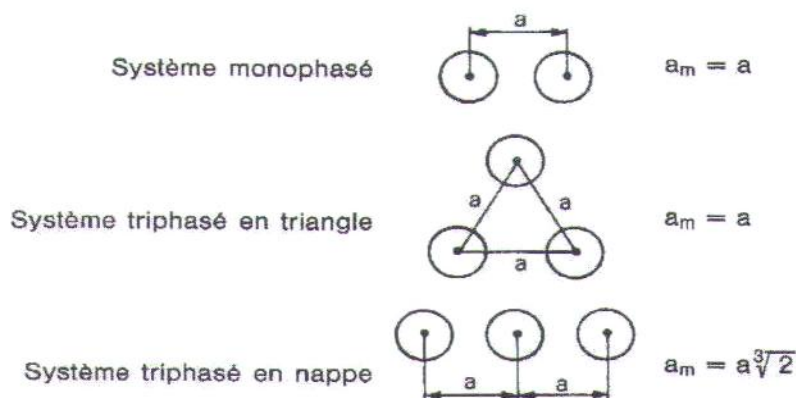
**Rappel :** Lorsque l'intensité  $i$  traversant un circuit varie dans le temps, une force électromotrice est induite dans le même circuit, égale à  $e = -L \frac{di}{dt}$   
 $L$  est le coefficient de self-induction du circuit, exprimé en Henry (H), si  $e$  est en volt et  $\frac{di}{dt}$  en A/s.

Pour une liaison symétrique formée de conducteurs non magnétiques, le coefficient de self-induction apparent moyen est le même pour tous les conducteurs et est donné par :

$$L = [0,05 + 0,2 \ln \frac{2a_m}{d}] 10^{-3} = [0,05 + 0,46 \log \frac{2a_m}{d}] 10^{-3}, \text{ H/km}$$

$d$  = diamètre de l'âme conductrice, mm

$a_m$  = moyenne géométrique des distances entre les axes des conducteurs, mm.



## RÉSISTANCE LINÉRIQUE D'UN CONDUCTEUR

Rappel : La résistance apparente d'un conducteur, en courant alternatif et à la température de service est déterminée à partir de la résistance en courant continu à 20°C, en tenant compte de l'influence de la température. Les phénomènes liés à l'alimentation en alternatif seront négligés dans le calcul.

$$R_{\text{linéique à } 20^\circ\text{C}} : R_{20} = \frac{\rho_{20}}{S}, \text{ en Ohm / km}$$

$\rho_{20}$  : Résistivité du métal conducteur à 20°C en  $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$ .

Aluminium :  $\rho_{20} = 28,264 \Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{km}$ .

$S$  : section de l'âme du conducteur en  $\text{mm}^2$ .

La résistance d'un conducteur s'exprime en fonction de celle à 20°C et évolue suivant l'équation suivante :

$$R_\theta = R_{20} [1 + \alpha_{20} (\theta - 20)]$$

$\alpha_{20}$  = Coefficient de variation de la résistance à 20°C :

Pour l'aluminium :  $\alpha_{20} = 4,03 \cdot 10^{-3}$

## ANNEXE H

## SCHNEIDER ELECTRIC

## CHOIX DES CONTACTEURS POUR GRADINS DE CONDENSATEURS

## Puissances maximales d'emploi des contacteurs

## Contacteurs standard

Cadence maximale : 120 cycles de manœuvres/heure.

Durabilité électrique à charge maximale : 100 000 cycles de manœuvres.

Branchement avec inductances de choc éventuelles.

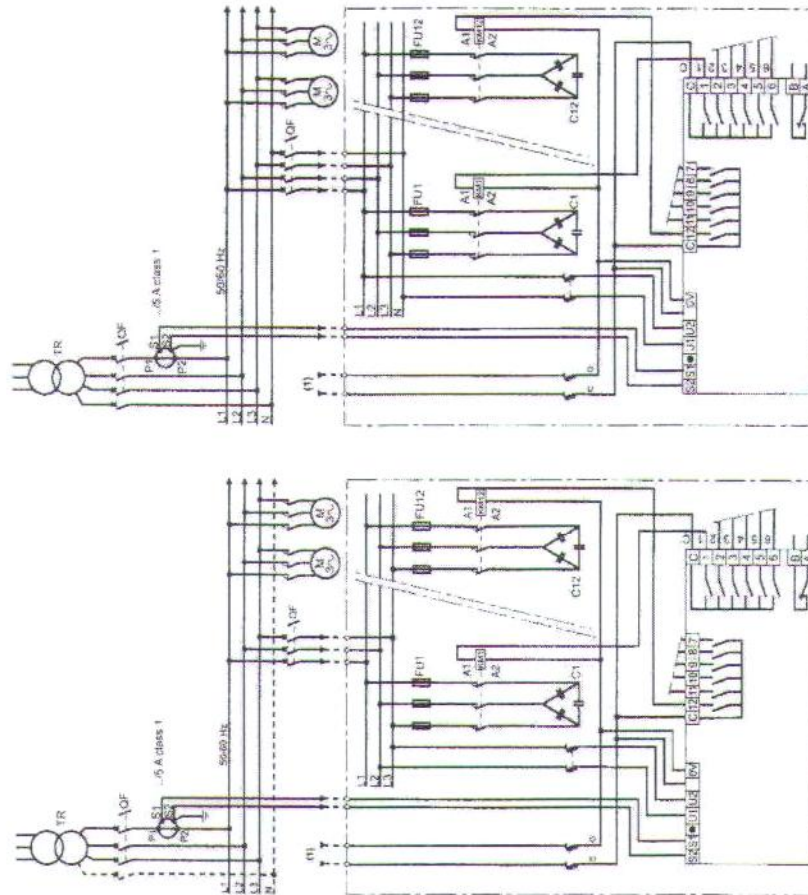
puissances d'emploi en 50/60 Hz						courant de crête maximal	calibre des contacteurs
$\theta \leq 40^\circ\text{C}$ (1)			$\theta \leq 60^\circ\text{C}$ (1)				
220 V	400 V	600 V	220 V	400 V	600 V	A	
240 V	440 V	690 V	240 V	440 V	690 V		
kvar	kvar	kvar	kvar	kvar	kvar		
6	11	15	6	11	15	560	LC1 D09, D12
9	15	20	9	15	20	850	LC1 D18
11	20	25	11	20	25	1600	LC1 D25
14	25	30	14	25	30	1900	LC1 D32, D38
17	30	37	17	30	37	2160	LC1 D40
22	40	50	22	40	50	2160	LC1 D50
22	40	50	22	40	50	3040	LC1 D65
35	60	75	35	60	75	3040	LC1 D80, D95
50	90	125	38	75	80	3100	LC1 D115
60	110	135	40	85	90	3300	LC1 D150
70	125	160	50	100	100	3500	LC1 F185
80	140	190	60	110	110	4000	LC1 F225
90	160	225	75	125	125	5000	LC1 F265
100	190	275	85	140	165	6500	LC1 F330
125	220	300	100	160	200	8000	LC1 F400
180	300	400	125	220	300	10 000	LC1 F500
250	400	600	190	350	500	12 000	LC1 F630
250	400	600	190	350	500	14 200	LC1 F800
200	350	500	180	350	500	25 000	LC1 BL
300	550	650	250	500	600	25 000	LC1 BM
500	850	950	400	750	750	25 000	LC1 BP
600	1100	1300	500	1000	1000	25 000	LC1 BR

(1) Limite supérieure de la catégorie de température selon IEC 70.

## ANNEXE I

## SCHNEIDER ELECTRIC

## SCHÉMA DE RACCORDEMENT DU VARLOGIC R12



connection drawing (LN) - ex. réseau 380/415 V network  
schéma de racc. (PN) - ex. réseau 380/415 V  
Regleranschluis an (LN) - ca. 380/415 V  
esquema de conexión (FN) - ejemplo: red 380/415 V

connection drawing (LL) - ex. réseau 380/415 V network  
schéma de racc. (PP) - ex. réseau 380/415 V  
Regleranschluis an (LL) - ca. 380/415 V  
esquema de conexión (FF) - ejemplo: red 380/415 V

Le transformateur de courant doit être impérativement installé en amont de la batterie de condensateurs et des récepteurs. Le paramétrage normal du régulateur le rend insensible au sens de rotation des phases et au sens de raccordement du transformateur de courant.

**Le régulateur peut être raccordé de deux manières :**

■ **raccordement type PP**

La mesure de tension est réalisée entre deux phases. La mesure du courant est réalisée sur une phase différente des deux phases précédemment utilisées.

■ **raccordement type PN**

La mesure de tension est réalisée entre une phase et le neutre. La mesure du courant est réalisée à partir de la même phase.

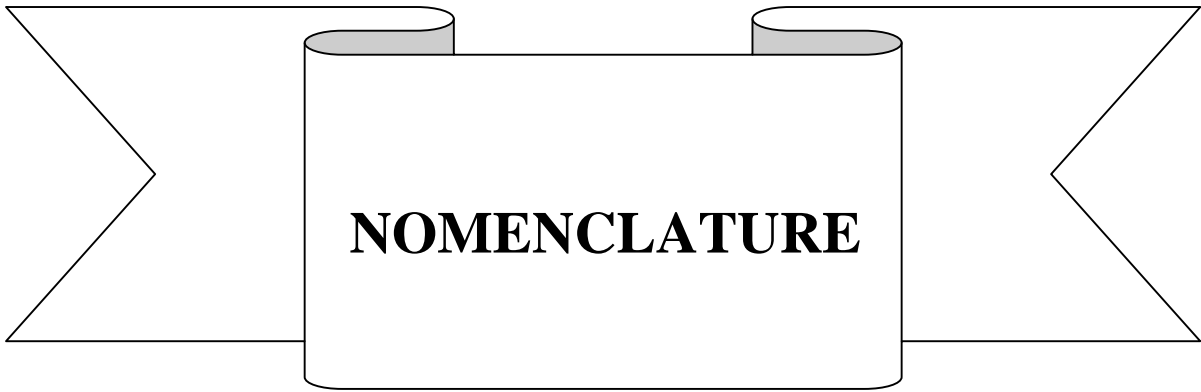
**Attention : le type de raccordement utilisé doit être cohérent avec le paramétrage du régulateur.**

Sur un réseau de tension inférieure à 110 V ou supérieure à 415 V utiliser un transformateur pour alimenter les entrées tension de mesure du régulateur. Ce transformateur utilisé ne doit induire qu'un déphasage minimum.

**Attention en utilisation 4 quadrants**

(type RC12 seulement) la détection automatique du sens de rotation des phases doit être désactivée à effectuer dans le mode paramétrage. Dans ce cas particulier il faut donc respecter le sens de connexion du TC et le sens de rotation des phases.

(1) control voltage / tension auxiliaire



**NOMENCLATURE**

**La nomenclature**

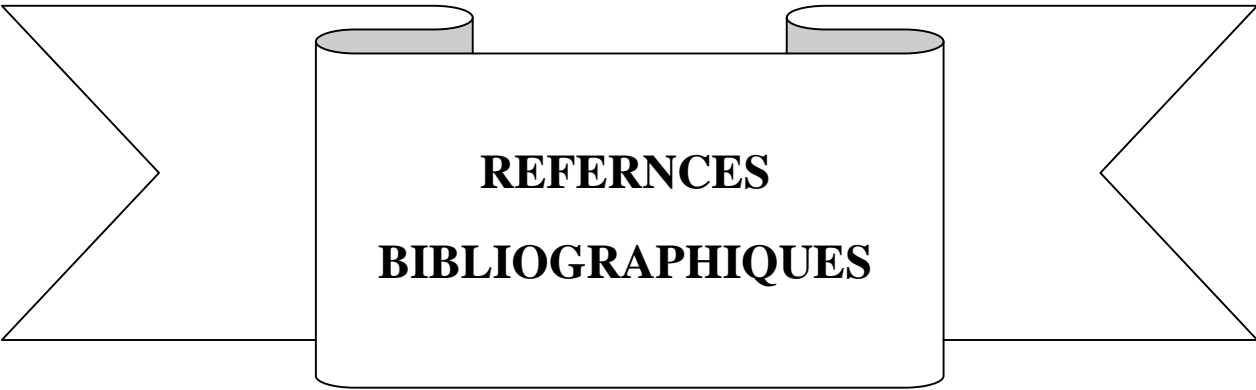
N°	Symbole	Signification	Unité
01	$\vec{F}_{ax}$	Composante de la force axiale sur la pale	/
02	$\vec{F}_{rot}$	Composante de la force directionnelle	/
03	$\vec{v}_{res}$	Composante de la force du vent sur la pale	/
04	$\vec{v}_{rot}$	Composante du vent due à la rotation de la turbine	/
05	$v$	Composante 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	$[\varphi_r]$	Matrice des flux rotoriques	/
13	$[\varphi_s]$	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.m <sup>2</sup>
28	lr	Inductance propre rotorique	Wb

## NOMENCLATURE

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	$M_r$	Inductance mutuelle entre phases rotoriques	H
35	$M_{rs}$	Maximum de l'inductance mutuelle entre phase statorique et celle correspondante au rotor	H
36	$M_s$	Inductance mutuelle entre phases statoriques	H
37	$M_{sr}$	Maximum de l'inductance mutuelle entre phase statorique et celle correspondante au rotor	H
38	$N_r$	Nombre de spires de bobinages rotoriques	/
39	$N_s$	Nombre de spires de bobinages statoriques	/
40	P	Nombre de paire de pôles	/
41	$P(\ )$	Transformé de Park	/
42	$P(\ )^{-1}$	Transformé inverse de Park	/
43	$P_a$	Puissance active	W
44	$P_{fr}$	Pertes fer rotoriques	W
45	$P_{jr}$	Pertes joule rotoriques	W
46	$P_{fs}$	Pertes fer statoriques	W
47	$P_{js}$	Pertes joules statoriques	W
48	$P_{mec}$	Pertes mécaniques	W
49	$P_m$	Puissance mécanique de la turbine	W
50	$P_{mg}$	Puissance disponible sur l'arbre de la génératrice	N.m
51	$P_{mt}$	Puissance mécanique théorique	W
52	$P_n$	Puissance nominale	W
53	$P_u$	Puissance utile	W
54	$Q_a$	Puissance réactive	VAR
55	R	Rayon des pales	m
56	$R_r$	Résistance rotorique	
57	$R_s$	Résistance statorique	
58	s	Surface des pales	$m^2$

## NOMENCLATURE

59		Angle de calage des pales	Degré
60	Ts	Constante de temps statorique	s
61	Tr	Constante de temps rotorique	s
62	Un	Tension nominale	V
63	V1	Vitesse de vent en amont	m/s
64	V2	Vitesse de vent en aval	m/s
65	Wmec	Pulsation mécanique	rad/s
66	Ws	Pulsation statorique	rad/s
67	X	Vecteur d'état	/
68	Y	Vecteur de sortie	/
69	U	Vecteur d'entrée	/
70	r	Angle entre deux phases rotoriques	rad
71	s	Angle entre deux phases statoriques	rad
72		Vitesse spécifique	/
73	opt	Vitesse spécifique optimale	/
74		Densité volumique de l'air	Kg/m <sup>3</sup>
75		Coefficient de dispersion	/
76	r	Flux rotorique	Wb
77	s	Flux statorique	Wb
78	1	Vitesse de rotation avant le multiplicateur	rad/s
79	2	Vitesse de rotation après le multiplicateur	rad/s
80	opt	Vitesse de rotation optimale	rad/s
81	Wr	Pulsation rotorique	rad/s



**REFERNCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

# Bibliographie

- [1] KHETTACHE Laid, « étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », Mémoire Magister de l'université Batna, 2007.
- [2] : [www. Énergie éolienne.com](http://www.EnergieEolienne.com).
- [3] Adam MIRECKI, « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [4] Bernard MULTON, Olivier GERGAUD, Hamid BEN AHMED, «État de l'art dans les aérogénérateurs électriques », École Normale Supérieure de Cachan Campus de Ker Lann 35170 BRUZ, Toulouse, France, 2008.
- [5] P. Gip , « le grand livre de l'éolienne », édition Le moniteur, 2004.
- [6] O. De Vries, «On the theory of the horizontal axis wind turbine», Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983.
- [7] Frédérique POTIER, « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, France, décembre 2003.
- [8] MAYOUF Messaoud, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanent».Mémoire de Magister en électrotechnique de l'université Biskra, 2008.
- [9] MOUSSA SIDDO Abdelaziz et S. MEKHTOUB, « étude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. ».Projet de fin d'études, École National Polytechnique, 2007.
- [10] Abdenour ABDELLI, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.

- [11] Ludovic LECLERCQ, « Apport du stockage inertielle associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse Doctorat de l'université de Lille, 2004.
- [12] Haritza CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables », Thèse Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, France, 2003.
- [13] Nicolas LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux fiables ou insulaires », Thèse Doctorat de L'institut national polytechnique de Grenoble, 2005
- [14] Miguel LOPEZ, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse Doctorat de l'université Paris-sud 11, 2006.