



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

Centre Universitaire d'El Oued

Département d'Electrotechnique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT
EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

THEME

*Etude d' une mini centrale éolienne
pour site isolé*

Proposé & dirigé par :
M^{me} : Slimane Wissam

Réalisé par :
*Ahmed Salah Laila
Gounni Samia*

PROMOTION : 2010

الإهداء

الحمد لله على ما آله من الأسماء الحسنى والصفات العلى واصلى واسلم على اجمع الخلق لكل وصف حميد
وخلق رشيد وعلى اله وصحبه ومن تبعه بإحسان إلى يوم الدين وبعد :

اهدي ثمرة جهدي إلى كل من عايشني على إتمام هذا العمل المتواضع

إلى من يقدها قلبي حبا وطوعا إلى القلب الطيب والحنون إلى التي وهبتي الحياة أُمي الغالية أطال الله
عمرها.

إلى الروح الطيبة إلى سندي وقُدوتي الحسنة إلى من كان قدوة في بحر العلم إلى من صبر معي وتحمل أعبائي
أبي الغالي حفظه الله وأطال عمره.

إلى من اهبنى الله بهم أخواتي وأخواتي: حليلة, بوفاتح, نادية, سعيد, صباح, عبد الكريم, فريدة, جميلة.

إلى الشموع التي تثير العائلة: شيماء, ادم, شهد.

إلى زوجة أخي كريمة وزوج أختي مراد.

إلى الأخت التي لم تُلدها أُمي ورفيقة دربي وتؤم روحي " جهيدة حبة ".

إلى من شاركوني حلو ومر الحياة الدراسية: سارة, كريمان, حكيمة, هنية, مديحة, أسماء, ابتسام.

إلى من جمعني بها مذكرة التخرج والأكثر جمعني بها روعة الأخوة والصدقة أحمد الصالح ليلي.

إلى كل طالبات الإقامة الجامعية 1000 سرير: ياسمينة, عزيزة, سلاف, مباركة, حنان, حليلة السعدية,
فاطمة, أمال, هالة, ثريا, صباح, نعيمة, نجود, عفاف, فضيلة....

إلى كل عمال الإقامة الجامعية 1000 سرير وبالخصوص: " عمي السعيد " ومسؤول الأمن " الصالح الأبيض ".

إلى كل أعضاء التضامن الطلابي الوطني: بالقاسم, علاء, فتحي, أحمد, طارق...

إلى كل طلاب السنة الخامسة هندسة كهربائية دفعة 2010.

إلى روح الفقيد حمدي زين العابدين رحمه الله واسكنه فسيح جنانه.

إلى كل من يذكرهم قلبي ونسبهم قلبي.

Remerciements

*Ce travail à été effectué sien du département de Gén é électrique
de centre universitaire d' EL oued.*

*Nous remercions également le encadreur Sliman Wissam pour
son aides , son encouragements et sa patience.*

*Nous remercions Monsieur Boubaker.Zagueb, A.Guediri et
Tir. Zohir, pour tous les aides et le courage.*

*Nous remercions également tous les membres du jury, pour bien
voulu évalue notre travail.*

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
Objectifs du travail.....	03
Présentation du mémoire.....	04

Chapitre Un

Energies renouvelables

1.1	Introduction.....	06
1.2	Energie renouvelable.....	07
1.2.1	Définition.....	07
1.2.2	Intérêt des énergies renouvelables.....	07
1.2.2.1	Intérêt économique.....	07
1.2.2.2	Intérêt environnemental.....	08
1.2.3	Avantages et inconvénients.....	08
1.2.4	L'énergies renouvelable en Algérie.....	08
1.3	Principales énergies renouvelable.....	09
1.3.1	Energie Solaire.....	09
1.3.1.1	Définition.....	09
1.3.2	Energie géothermique.....	11
1.3.2.1	Présentation.....	11
1.3.3	Energie hydraulique.....	13
1.3.4	Energie biomasse.....	14
1.3.5	La bile à combustible.....	16
1.3.6	Energie éolienne.....	17
1.3.6.1	Définition.....	18
1.4	Conclusion.....	17

Chapitre deux

Génération sur les systèmes éoliens

2.1	Introduction.....	20
2.2	Historique.....	20
2.3	Quelques notion sur les vents.....	22
2.4	Choix de site.....	25
2.5	Théorie de Bets.....	26
2.6	Définition des système éoliennes.....	28
2.7	Déférents types des système éoliens.....	28
2.7.1	Le système à axe vertical.....	28
2.7.2	Système à axe horizontal.....	29
2.8	Différentes classes d'un système éolienne.....	30
2.8.1	Système éolien à vitesse fixe.....	30
2.8.2	Système éolien à vitesse variable.....	31
2.8.3	Technique mécanique.....	31
2.8.4	Technique électrique.....	31
2.8.5	La technique hybride.....	31
2.9	Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable	31
2.10	Démarrage(et coupure) de éolienne.....	33
2.11	Utilisation des système éoliens.....	33
2.11.1	Pompage de l'eau.....	33
2.11.2	Recréation.....	32
2.11.3	Fermes et ranchs.....	33
2.11.3	Usage domestique.....	34
2.12	Energie éolienne dans le monde.....	34
2.13	Energie éolienne en Algérie.....	35

2.14	Avantages et inconvénients.....	36
2.15	Conclusion.....	37

Chapitre trois

Définition d'une centrale éoliens

3.1	Introduction.....	39
3.2	Les principaux composants d'un système éoliens.....	40
3.3	Multiplicateur.....	42
3.4	Types d'aérogénérateur dans les système éoliens.....	42
3.4.1	Le générateur asynchrone.....	43
3.4.2	Le générateur synchrone.....	43
3.4.3	La générateur électrique à courant continu.....	44
3.4.4	Générateur à structures spéciales.....	46
3.5	Vitesse de rotation de l'hélice.....	46
3.6	Système de régulation de la vitesse de rotation de éolienne.....	47
3.6.1	Système à décrochage aérodynamique "Stall".....	47
3.6.2	Système d'orientation de pales "Pitche".....	48
3.7	Machines électrique et système de conversion d'énergie éolienne.....	49
3.7.1	Asynchrone à cage (MAS).....	49
3.7.2	Machine asynchrone à double alimentation (MADA) (rotor bobiné).....	51
3.7.2.1	Machine asynchrone à double alimentation a énergie rotorique dissipée.....	51
3.7.2.2	Machine asynchrone à double alimentation-structura de Kramer.....	52
3.7.2.3	Machine asynchrone à double alimentation-structura de Scherbuis avec cycloconvertisseur.....	53
3.7.2.4	Machine asynchrone à double alimentation-structura de Scherbuis avec convertisseurs MLI.....	55
3.7.3	Génératrices synchrones.....	56
3.8	Système de protection et de régulation.....	59

3.8.1	Système de régulation "par l'effacement totale ou partiel du rotor.....	59
3.8.2	Système de freinage manuel.....	59
3.8.3	Système de freinage automatique.....	60
3.8.4	Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge.....	61
3.8.5	Régulation par variation du calage des pales.....	62
3.9	Système utilisation la machine asynchrone.....	63
3.9.1	Machine à cage d'écureuil.....	63
3.10	Eolienne isolée raccordée au réseau.....	65
3.11	Parc éolien important.....	66
3.12	Stockage d'énergie.....	66
3.12.1	Stockage à court terme.....	66
3.12.2	Stockage à long terme.....	67
3.13	Les aspects économiques.....	68
3.13.1	Le rentable coutait.....	68
3.13.2	Retombées économiques.....	70
3.14	Perspectives d'avenir.....	71
3.15	Conclusion.....	71

Chapitre quatre

Modélisation du système éolienne

4.1	Introduction.....	73
4.2	Modélisation d'une turbine éolienne.....	74
4.2.1	Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine...74	
4.2.2	Modélisation de la turbine.....	76
4.2.3	Modélisation de la multiplicateur.....	78
4.2.4	Equation dynamique de l'arbre.....	78
4.2.5	Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse.....	79

4.2.6	Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....	80
4.2.7	Résultats de simulation.....	83
4.2.7.1	Vitesse du vent variable.....	83
4.2.7.2	Vitesse du vent fixe.....	84
4.3	Modélisation de la machine asynchrone.....	85
4.3.1	Représentation de la machine asynchrone.....	85
4.3.2	Equations générales de la machines asynchrone.....	86
4.3.3	Modèle diphasé équivalent de la machine.....	88
4.3.4	Résultats de simulation.....	91
4.4	Modélisation da la système éolienne.....	93
4.4.1.	Résultats de simulation	93
4.4.1.1	Vitesse du vent fixe.....	93
4.4.1.2	Vitesse du vent variable.....	93
4.4.2		

ΔE_C : Énergie cinétique.

M : La masse d'air que traverse l'éolienne.

V_1 : La vitesse de vent amont.

V_2 : La vitesse de vent aval.

P_{aer} : La puissance aérodynamique de l'éolienne.

P : La densité volumique d'air.

V' : La vitesse au travers de S.

F : La force de l'air.

C_P : Le coefficient de puissance de l'éolienne.

V : Vitesse du vent.

E : La force électromotrice.

P : Nombre de pair de pôles.

n : vitesse en tr/S.

N : Nombre totale de conducteurs actifs.

Φ : Le flux par pôle en Wb.

U : La tension extraite de la génératrice.

R_a : La résistance de l'induit.

L_a : L'inductance de l'induit.

- P_{em}** : La puissance électromagnétique.
- C_{em}** : Le couple électromagnétique.
- Ω** : La vitesse angulaire en rad/S.
- P** : La puissance électrique.
- r** : Facteur du rendement.
- D** : Diamètre de l'hélice.
- R** : Longueur des pals.
- G** : Gain de multiplicateur.
- P_v** : La puissance du vent.
- S** : Surface circulaire balayée par la turbine.
- B** : L'angle de l'orientation de la pale.
- λ** : Le ratio de vitesse.
- $\Omega_{turbine}$** : La vitesse de la turbine.
- C_{aer}** : Le couple aérodynamique.
- C_g** : Le couple issu du multiplicateur.
- Ω_{mec}** : Vitesse de la turbine.
- $J_{turbine}$** : Inertie de la turbine.
-

J : Inertie totale.

J_g : Inertie de la génératrice.

C_{mec} : Couple mécanique.

C_{vis} : Le couple frottements visqueux.

f : Coefficient de frottement visqueux.

A : L'expression du couple référence.

W_r : Vitesse rétorques.

Paramètres de la chaine de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone a cage

Valeur numérique du paramètre	Signification
$R = 13.5$	Rayon de l'éolienne en m
$\rho = 1.22$	Masse volumique de l'air a la pression atmosphérique à 15C°(Kg/m ³)
$G = 35$	Gain du multiplicateur de vitesse
$R_s = 1.2$	Résistance statorique (Ω)
$R_r = 1.8$	Résistance rotorique (Ω)
$M = 0.15$	Mutuelle inductance (H)
$L_s = 0.1554$	Inductance statorique (H)
$L_r = 0.1568$	Inductance rotorique (H)
$J = 10$	Inertie de l'arbre (Kg. m ²)
$f = 0.0001$	Coefficient de la frottement de la MAS
$P = 2$	Nombre de paires de pôles
$T_s = \frac{L_s}{R_s}$	Constante de temps statorique (s)
$T_r = \frac{l_r}{R_r}$	Constante de temps rotorique (s)



Introduction Générale

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées.

Parmi elles, nous pouvons citer l'énergie de fission nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique. Cependant, le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité reste élevée durant de nombreuses années.

Une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

A côté des grandes centrales éoliennes terrestres et de parcs éoliens offshore, les fermes éoliennes de proximité, de faible puissance, ilotées ou ilotables, constituent une voie à ne pas négliger pour le développement de l'énergie éolienne. Parmi les applications potentielles de ce qu'on a l'habitude de qualifier de « petit éolien » (gamme jusqu'à 100 kW), on peut citer le domaine de l'électrification rurale pour une consommation locale d'électricité ou pour sa transformation vers d'autres vecteurs énergétiques : pompage, traitement de l'eau, électrolyse de l'eau et stockage d'hydrogène à plus long terme. L'éolien en site urbain ou péri urbain est aussi une possibilité, même si ce marché de niche se heurte à d'importants obstacles qui freinent son développement : rugosité du terrain, faiblesse du gisement éolien, rentabilité difficile à établir .

De la même manière que pour le photovoltaïque, les éoliennes « de proximité » produisent de l'électricité sur site, évitant toutes pertes de transport et permettant également de répondre aux exigences de production d'électricité verte. Cependant, ces petites éoliennes en milieu urbain sont des produits particulièrement nouveaux sur le marché. Les installations et les connexions au réseau sont également assez limitées.

Par conséquent, pour aider au développement de ce marché, un effort de communication et d'accès à l'information doit être fait, notamment sur la technologie en soi mais aussi dans les domaines de la régulation, des procédures administratives ou encore des questions de coûts.

Présentation du mémoire

Ce mémoire est constitué de quatre chapitre comme suit:

- ✚ Dans le premier chapitre est consacré à des rappels sur les différents types dans les énergies renouvelables.
- ✚ **Le second chapitre est présenter les généralités des système éoliens (les différents classe et types des systèmes éoliens, et avantages et inconvénients...etc.).**
- ✚ Le troisième chapitre est présenter le définition d'une centrale éoliens (les principaux composants d'un système éoliens, et les machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne, et stockage d'énergie et les espaces économiques.
- ✚ Le quatrième chapitre est constitué la modélisation de turbine et modélisation de la machine asynchrone à cage et la modélisation de système éolienne (Turbine-MAS), et résultat du simulation.

Objectifs

- ✚ Faire une recherche bibliographique;
- ✚ Passer en revue les énergie renouvelable et de mettre en évidence leur importance comme étant une solution des problèmes de la maitrise de l'énergie;
- ✚ Etudier la production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne;
- ✚ Réaliser des projets éoliens en Algérie, vu que ce gisement est considérable.



Chapitre un

Les énergies renouvelables

1.1 Introduction

L'énergie est nécessaire dans toutes nos activités quotidiennes pour la production du chauffage, de l'électricité, dans l'industrie, pour la construction et dans les transports. Depuis que l'industrialisation a commencé, il y a plus de 200 ans, la richesse économique a été immédiatement liée avec l'accès aux combustibles fossiles pour la production énergétique, en premier lieu le charbon, mais plus récemment le pétrole et gaz. Le problème de la consommation d'énergie est devenu de plus en plus important, des inquiétudes concernant les effets de la croissance économique sur la consommation excessive des ressources naturelles et de l'impact sur l'environnement, en particulier l'atmosphère, ont été notées : augmentation de l'effet de serre, pollution atmosphérique, pollution des sols, pollution des eaux et pluies acides.

Pour résoudre ce problème, des politiques énergétiques de développement ont été conduites pour exploiter au mieux les ressources en énergies renouvelables existantes. Les technologies mises en œuvre sont très importantes et font appel au génie électrique et aux matériaux de pointe. Les énergies renouvelables comme les énergies: solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice et de la biomasse sont des énergies de flux, on les oppose aux énergies fossiles qui sont disponibles sous forme de réserve.

Dans ce chapitre, on commencera par la présentation du concept des énergies renouvelables et leurs avantages et leurs inconvénients. Par la suite on va présenter énergie solaire, énergie géothermique, énergie hydraulique et énergie biomasse et la pile à combustible. On terminera par une synthèse sur l'énergie éolienne en particulier, car elle fera l'objet de ce présent mémoire.

1.2 Energie renouvelable

1.2.1 Définition

L'énergie renouvelable se rapporte à la puissance développée par une source renouvelable. C'est-à-dire, quand l'énergie est produite, la ressource n'est pas épuisée. Elle est naturellement reconstituée, ses réserves sont tellement importantes que l'homme ne puisse jamais les épuiser. On dira alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. L'expression "énergie renouvelable" s'applique à plusieurs sources d'énergies qui sont un point en commun; elles produisent toutes de l'énergie électrique, thermique ou mécanique sans épuiser les ressources naturelles, exemple: le vent, le soleil, l'eau, la biomasse, etc...,tant que cet équilibre entre la consommation actuelle et la disponibilité future de la ressource est respecté, on parlera d'énergie renouvelable. Le mot renouveler veut dire remplacer. Renouveler l'énergie, c'est aussi remplacer l'énergie fossile qui exploite le charbon, le pétrole et le gaz qui sont des réserves limitées et qui polluent l'environnement, par des énergies dont les ressources sont inépuisables et non polluantes, qu'on appelle aussi énergie de remplacement,[1].

1.2.2 Intérêt des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables qui se définissent comme celles dont la source ne peut se tarir, possèdent un certain nombre d'atouts aussi bien financiers qu'environnementaux.

1.2.2.1 Intérêt économique

1- Une source renouvelable: Le principal atout des énergies solaires, éoliennes et hydrauliques est d'être renouvelables:

- Pas de risque de pénurie, de rupture de stock;
- La matière première (sauf pour le bois) est gratuite;
- Une source locale pour un développement local: ceux sont des ressources locales offrant une autonomie énergétique appréciable en zone montagneuse ou dispersée.

2- Aspect financier: L'évolution financière a cette échelle ne peut être faite sous le seul angle de l'investissement énergétique mais doit tenir compte des bénéfices induits; emplois, commerces, nouveaux débouchés..., tous ces équipements sont destinés à être utilisés sur de longues périodes (20 à 50 ans).

- Le coût des systèmes ne peut aller qu'en s'abaissant avec leur développement;

- Le coût de maintenance (généralement faible) est connu à l'avance;
- L'approvisionnement en ressource primaire est indépendant des variations du marché de l'énergie (pour cause de gratuité).

1.2.2.2 Intérêt environnemental

1- Elles ne génèrent pratiquement pas de pollution:

- Pas de gaz à effet de serre .
- Peu ou pas de déchets (aussi bien dans l'environnement immédiat que sur le reste de la planète) .

2- Peu de nuisances sonores .

3- Pas de nuisances olfactives .

4- Très faibles nuisances visuelles (en comparaison des infrastructures nécessaires aux autres énergies) .

5- Pas d'infrastructures (lignes, poteaux, transformateurs, etc.) dans les zones sensibles et protégées (sites classés, parcs naturels régionaux).

6- Pas de trouées dans les forêts et autres paysages, pas d'entretien de lignes,... etc [1].

1.2.3 Avantages et inconvénients

Leur caractère renouvelable bien sur qui fait qu'on ne prive pas les générations futures de ressources rares:

1- L'absence de problèmes liés au rejet de gaz à effet de serre.

2- Le fait que l'énergie produite est électrique (la forme thermo dynamiquement la plus souple d'utilisation).

Mais, aussi leurs inconvénients:

1- Elles occupent un espace souvent revendiqué pour d'autre usages (vallées pour l'hydraulique, côtes et crêtes pour les éoliennes);

2- Elles sont très capitalistique (il faut bien payer pour concentrer l'énergie et refaire ce que la nature a fait seule dans le cas des énergies fossiles),[1].

1.2.4 L'énergie renouvelable en Algérie

Dans notre pays, les énergies renouvelables n'ont pas connu le développement que permet leur disponibilité, et qu'impose leur importance pour le développement économique et social.

Trois raisons principales plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie :

1. Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand Sud
2. Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable, et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles;
3. La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emplois.

La loi sur la maîtrise de l'énergie de Juillet 1999 affiche la volonté des pouvoirs publics pour une redynamisation de la politique énergétique et fixe un nouveau cadre juridique pour la gestion et l'orientation de la demande d'énergie à tous les niveaux de la chaîne énergétique.

Cette politique énergétique s'articule autour des préoccupations d'utilisation rationnelle de l'énergie, de promotion des énergies renouvelables et de protection de l'environnement; ainsi plusieurs actions sont proposées pour la mettre en place et portent sur l'ensemble de chaîne allant de la recherche à la distribution, [1].

1.3 Principales énergies renouvelables

1.3.1 Energie solaire

1.3.1.1 Définition

Le soleil est une gigantesque source d'énergie et depuis l'antiquité les hommes ont toujours rêvé d'apprivoiser sa puissance, La terre reçoit du soleil, environ 10000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité (équivalent à une puissance de 16.1015 kWh/m² et par an). En d'autres termes, capteur 0.01% de cette énergie nous permettrait de nous passer de pétrole, de gaz, de charbon et d'uranium,[1].

✓ Energie solaire passive

C'est l'art de planifier l'architecture d'une maison afin de bénéficier des rayons du soleil Pour réduire les besoins en chauffage.

Les principes de base sont:

- Orientation de la maison vers le sud;
- Grandes fenêtres de ce coté;

- Petites fenêtres sur le coté Nord;
- Choix de matériels ayant une bonne masse thermique pour absorber la chaleur pendant la journée et la libérer pendant la libérer pendant la nuit.

Il s'agit d'une technologie peu chère qui permet de faire des économies spectaculaires.

Comme la plupart des maisons construites aujourd'hui seront intactes lorsqu'on aura épuisé les réserves d'énergies combustibles, il faut absolument tenir compte de ces principes.

✓ **Energie solaire active**

Elle utilise des capteurs plans pour concentrer la chaleur de la lumière pour chauffer un liquide. L'essentiel est de "piéger" cette chaleur en créant un petit "effet de serre". Les installations les plus simples de ce type chauffent l'eau pour les besoins en eau chaude des ménages. Cette technique permet aussi de chauffer une maison en faisant circuler l'eau chaude dans les murs sous le plancher.

✓ **Photovoltaïque**

Les photopiles de la technologie photovoltaïque n'ont rien à voir avec l'énergie solaire thermique. Elles n'utilisent pas la chaleur, mais transforment l'énergie des photons directement en électricité grâce à des cellules solaires photopiles qui sont fabriqués avec des matériaux semi-conducteur.

Les figures 1.1 et 1.2 , représentent des exemples de capteurs plans, qui sont surtout utilisés dans la production d'eau chaude sanitaire, et capteurs fixes à usage domestique, qui sont généralement installés sur le toit des habitations.



Figure 1.1: Exemple de capteur plan



Figure 1.2: Exemple de panneau solaire

1.3.2 Energie géothermique

La terre est composée d'une croûte, posée sur un manteau de roche en fusion. Le principe de l'énergie géothermique consiste à creuser un trou dans cette croûte, à envoyer un fluide caloporteur au fond à l'aide d'un tuyau et à récupérer ce fluide chauffé remontant par un autre tuyau. Cette chaleur fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs. Cette énergie est d'un usage courant en Islande où elle est facile à mettre en œuvre.[2]

1.3.2.1 Présentation

L'essentiel de la chaleur dégagée par la Terre provient de la radioactivité. C'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium. Ce flux géothermique est si faible à la surface du globe qu'il ne peut être directement capté et en réalité on exploite la chaleur accumulée, stockée dans certaines parties du sous-sol sous la forme de nappes d'eau.

Cette eau est alors captée au moyen de forages. On véhicule ainsi la chaleur emmagasinée vers la surface. Le flux géothermique est particulièrement intense sur toute la côte ouest de l'Amérique, sur la côte est de l'Asie, ainsi que sur la "ceinture de feu" qui borde l'océan pacifique.

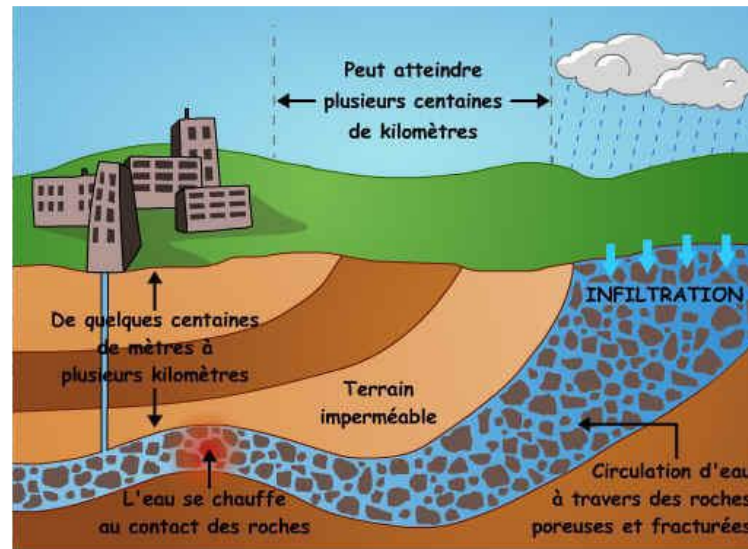
Les caractéristiques du fluide géothermique extrait (température, composition) dépendent de celles de la formation géologique. Il en résulte une multiplicité de techniques et de modes de valorisation. C'est pourquoi on distingue plusieurs types de géothermie et deux filières en fonction des technologies utilisées et de leurs applications.

les principaux usages de la géothermie en fonction de la température des couches géologiques[3]

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte et terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité.

On caractérise 3 types d'énergie :

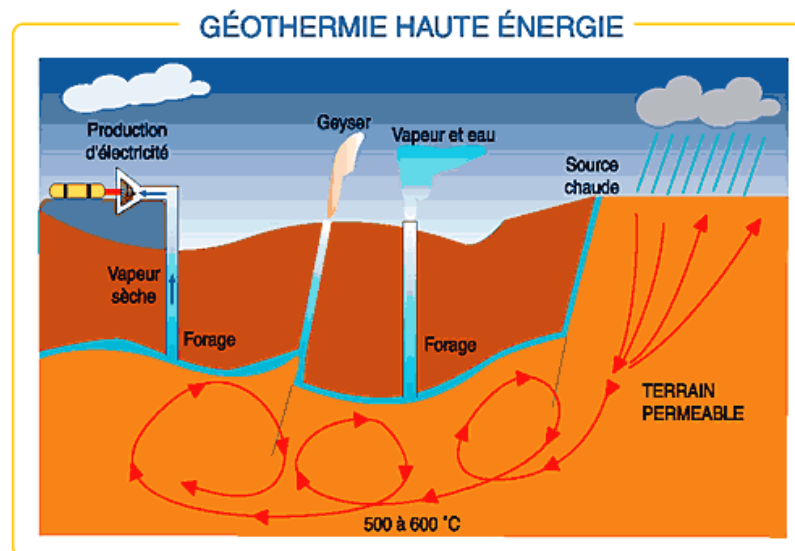
1. La géothermie à haute énergie.
2. La géothermie à basse énergie.
3. La géothermie à très basse énergie.



C'est une application suivant la profondeur, à chaque fois que l'on descend de 100 m sous terre, on gagne 2 à 3°C en moyenne

✓ La géothermie à haute énergie

la température élevée du gisement (entre 80°C et 300°C) permettant la production d'électricité.



✓ La géothermie à basse énergie

La température de l'eau entre 30°C et 100°C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.

✓ La géothermie à très basse énergie

la température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique [4]

1.3.3 Energie hydraulique

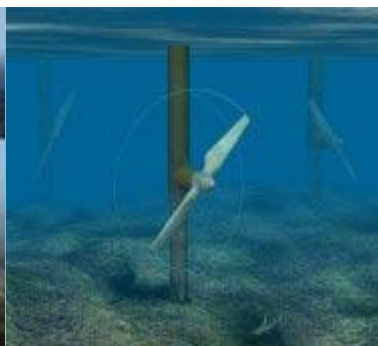
L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de contestations environnementales, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone.[2]

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité.



Marémotrice



Hydrolienne



Barrage

✓ Hydrolienne

Les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constants et prévisibles

Les sortes d'hydroliennes anglais de SeaGen ont une capacité de 1,2MW.

Un projet à la côte nord du Portugal a une capacité totale de 2,25 MW

A partir de 2010, EDF mettra à l'eau la première turbine expérimentale hydrolienne de 4 à 6MW.

✓ **Marémotrice**

L'usine marémotrice de la Rance est une centrale électrique tirant son énergie de la force de la marée. Les 24 turbines de l'usine marémotrice de la Rance-France produisent environ 500 GWh/an.

✓ **Barrages hydrauliques**

1/5 des besoins en énergie totaux de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages.

La construction en Chine de la plus grande centrale électrique au monde. La Barrage des Trois Gorges qui produira environ 18200 mégawatts.

1.3.4 Energie de la biomasse

Dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie. Comprend trois familles principales:



Les biocarburants

**Le biogaz ou La
méthanisation**

**Les bois énergie ou
biomasse solide**

✓ **Les bois énergie ou biomasse solide**

Le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt.

Les granules de bois sont le combustible au rendement le plus élevé de la gamme (Viessmann)

1mètre cube, pour un contenu énergétique de 1500 à 2000kWh.

✓ **Les biocarburants**

Les biocarburants, parfois appelés agrocarburants, sont issus de la biomasse. Il existe principalement deux filières industrielles : l'éthanol et le biodiesel. Ils peuvent être utilisés purs comme au Brésil (éthanol) ou en Allemagne (biodiesel), ou comme additifs aux carburants classiques.

L'éthanol est produit en France à 70 % à partir de la betterave, et à 30 % à partir de céréales. [5]

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques

Les trois principales catégories sont :

- Huile végétale carburant
- Bioéthanol
- Biogaz ou Méthanisation

✓ **Huile végétale carburant**

Dès 1891, Rudolph Diesel, convaincu que l'huile végétale est utilisable au même titre que le pétrole et le charbon.

- Huile de palme
- Huile de tournesol
- Huile de colza etc...

Le recyclage des huiles de friture et d'autres résidus gras

Peut être mélangé avec le diesel.

✓ **Bioéthanol**

Fabriquer à partir du saccharose (betterave, canne à sucre...) ou de l'amidon (blé, maïs...) par fermentation.

✓ **Biogaz ou Méthanisation**

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène: on parle de «digestion anaérobie».[4]

1.3.5 La pile à combustible

Le développement de sources autonomes d'énergie, notamment pour un véhicule propre et économe, est l'un des enjeux technologiques majeurs de la fin de ce siècle. L'utilisation d'un moteur électrique, de rendement énergétique élevé, et de fonctionnement silencieux et non-polluant, apparaît être une solution idéale, à condition que soient mis au point des générateurs électrochimiques fiables et de faible coût. Si, dans un premier temps, les accumulateurs électriques peuvent jouer ce rôle, leur utilisation est cependant limitée par leur rendement de charge et décharge, le nombre relativement faible de cycles, et surtout le temps et l'installation électrique nécessaires pour leur recharge. Au contraire, les piles à combustible, dont les éléments production d'énergie (cœur de pile) et stockage d'énergie (réservoir de combustible) sont séparés, permettent une utilisation plus souple, similaire à celle des moteurs thermiques actuels, et pourraient donc bénéficier d'un réseau équivalent pour la distribution du combustible.[6]

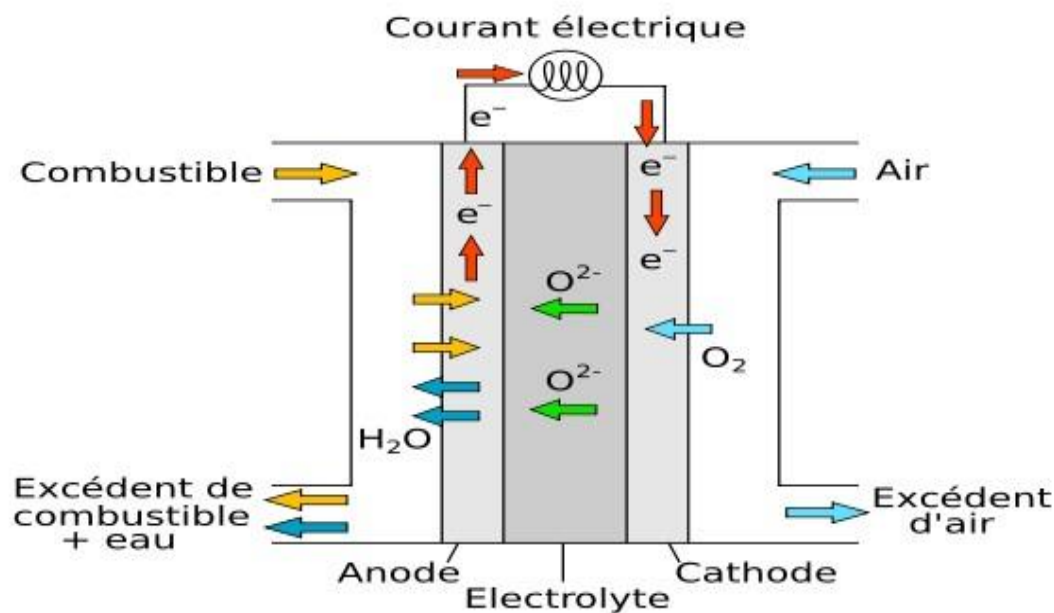


Figure1.4 : la pile combustible

1.3.6 Energie Eolienne

1.3.6.1 Définition

L'énergie éolienne convertit l'énergie cinétique tirée du vent en d'autres formes d'énergie très utiles, notamment l'énergie mécanique ou l'électricité. L'énergie éolienne s'avère une source d'énergie non polluante et durable. Les moulins à vent qui servaient à moudre le grain constituent un exemple des premières utilisations de l'énergie éolienne. Cette dernière est maintenant utilisée pour produire de l'électricité ou pomper l'eau. L'énergie électrique produite par les aérogénérateurs peut être distribuée par le biais d'un réseau ou utilisée en complément des générateurs autonomes dans les collectivités non reliées à un réseau. La puissance et le débit d'énergie d'une éolienne augmentent en fonction de la hausse de la vitesse du vent, [1]. La figure 1.5, montre trois utilisations de l'énergie éolienne: (a) pompage de l'eau, (b) un moulin à vent et (c) la production de l'électricité.

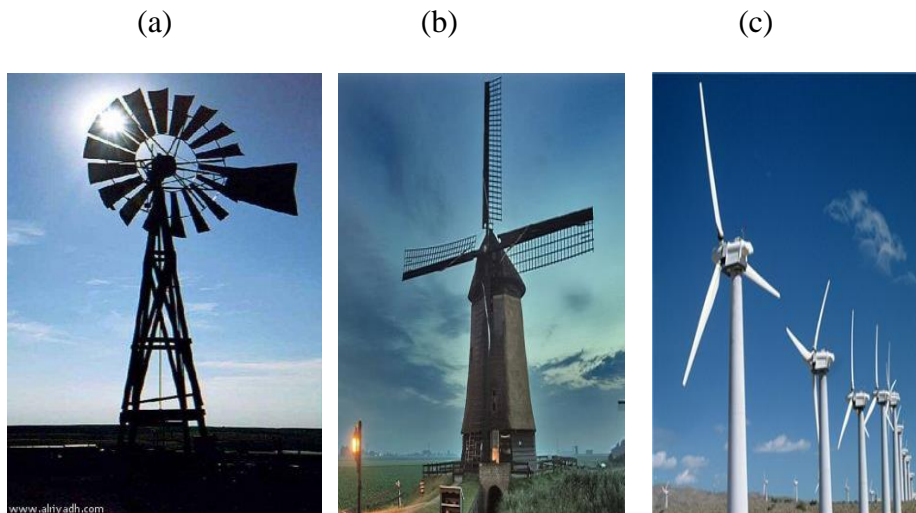


Figure 1.5 : Exemples d'éoliennes

1.4 Conclusion

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs avantages:

- Plus les sources ne sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée.
- Décentralisation qui privilégie des petites unités de production locales.
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps.
- Pas d'émission de CO2 Pour les plus parts des méthodes.
- Coût au kWh fixe, faible et stable.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

Après avoir rappeler le historique et le choix de site, et théorème de Betz ,différents classes et types des système éoliens, démarrage (et coupure) de éolienne, ...etc.



Chapitre deux

Généralités sur les systèmes éoliens

2.1 Introduction

La production d'électricité à partir de l'énergie éolienne est l'une des méthodes qui connaît la croissance la plus rapide dans le monde.

L'énergie cinétique de l'air en mouvement est transformée en électricité par des éoliennes qui sont installées à des endroits où les conditions météorologiques sont les plus propices.

Les éoliennes peuvent être utilisées individuellement, mais elles sont souvent regroupées pour former des "parcs éoliens" ou des "centrales éoliennes". L'électricité produite à partir des parcs éoliens peut servir à répondre à des besoins locaux ou alimenter un réseau de distribution d'électricité desservant des résidences et des commerces qui sont plus éloignés. L'énergie dérivée du vent peut également être transformée en hydrogène et utilisée sous forme de carburant dans les transports ou emmagasinée en vue de la production ultérieure d'électricité. L'utilisation de cette forme d'énergie permet de réduire les effets de la production d'électricité sur l'environnement, parce qu'elle ne nécessite aucun combustible et ne produit aucun polluant ni gaz à effet de serre.

Dans ce chapitre nous allons parler d'un système éolien et le vent, le choix de site et les différents types et aussi systèmes éoliens, les démarrages et coupure de l'éolienne et la classe d'utilisation de système éolien et l'énergie éolienne en Algérie et le monde à la fin les avantages et inconvénients de l'éolienne.

2.2 Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour mouliner des grains depuis le 7^{ème} siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulin est constitué d'un arbre et de lames horizontales tournant dans le plan vertical. À partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été

constamment améliorées entre le 12^{ème} et le 19^{ème} siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19^{ème} siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moulin des grains mais aussi pour le pompage d'eau. L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées. Par ailleurs, la construction d'éoliennes multipales ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le non de moulin américain. Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée. L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis. Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts. Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW et le reste des pays européen 3873 MW.

La puissance installée : en Amérique du nord est de 6677 MW, en Amérique du sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au Moyen Orient 150 MW.

Avec certains projets d'énergie éolienne développés (au large des côtes), de grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix aussi concurrentiel que celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles (par ex. : les centrales nucléaires et les centrales thermiques au mazout ou au charbon), [7].



Figure2.1: Eolienne au passé

2.3 Quelques notions sur les vents

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante.

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (Offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse,[7].

a) Direction et vitesse du vent

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions.

Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre.

Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire.

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des centres cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.

La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau 2.1

Degrés Beaufort	Vitesse de vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (da N/m ²)
0	0 à 0.4	<1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 28	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60m/s)

Tableau 2.1: Echelle Beaufort

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne.

Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non

seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

b) Unités de mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent peut être exprimée par différentes unités :

- Mètre par seconde (m/s) ;
- Kilomètre par heure (Kl/h) ;
- Nœud(kt).

Parce que le nœud a été longtemps utilisé en marine et puis en aviation, il est utilisé aussi en météorologie. Un mile marin vaut environ (1 852m) par heure, soit 0,514 m/s[1].

c) Instrument de mesure de la vitesse du vent

L'instrument qui sert à mesurer la vitesse du vent est nommé Anémomètre, il a pour but de déterminer la vitesse du vent, il est placé à 10m du sol, la figure 2.2 illustre un anémomètre qui possède trois coupelles en forme de demi sphères orientées dans le même sens et qui sont libres de tourner .

Il y a aussi un petit écran pour nous indiquer la vitesse du vent. La plupart des anémomètres modernes comprennent un système électronique interne qui calcule le nombre de tours que font les coupelles pendant un temps précis[1].



Fig 2.2 : Anémomètre

d) Mesure de la direction du vent

La direction du vent est toujours donnée par la direction d'origine. On parlera par exemple d'un vent du nord lorsque le vent souffle du nord vers sud. L'instrument qui sert à déterminer la direction du vent est nommé Girouette est présenté par la figure 2.3. C'est un pointeur (généralement une flèche) qui tourne selon la direction du vent. Il est important de noter que le point de la direction d'où provient le vent. Souvent, les quatre points cardinaux sont indiqués par les lettres N, S, E et O nous servent de repère. On place habituellement la girouette à 10 m du sol. Son unité de mesure est le Degré par rapport au nord géographique ou les points cardinaux, [1].



Fig 2.3: Exemple d'une girouette.

2-4 Choix de site

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Toutefois dans ces premiers lieux se posent des problèmes de corrosion et dans les seconds des risques de givrage.

L'énergie éolienne est très utilisée pour alimenter en énergie électrique des sites très isolés dont les besoins énergétique sont réduits.

La prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement, il faut

connaître la vitesse moyenne mais aussi la quantité d'énergie annuelle. Pour cela, des anémomètres spéciaux totalisateurs de l'énergie par mètre carré ont été mis au point à une hauteur de 10 m (hauteur adoptée par la météorologie nationale). Les vents les plus intéressants, qui donnent le maximum d'énergie annuelle, sont les vents réguliers, ayant une vitesse moyenne de 3 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s.

Il faut éliminer les sites soumis à des variations très brutales de la vitesse du vent.

Les constructeurs, en vue de la conquête des mers, planchent sur des machines de plusieurs mégawatts. En effet, installer des fermes de grande puissance à quelques kilomètres des côtes, où les ressources en vent sont bien plus élevées qu'à terre, permettrait de réduire encore le coût de l'électricité. De plus, l'impact visuel sera atténué.

Une haie joue le rôle de brise-vent ; il en est de même des rideaux d'arbres ; ces obstacles s'avèrent défavorables à l'implantation des éoliennes de faible hauteur.

Des phénomènes cycliques apparaissent avec des périodes qui peuvent être de l'ordre de la dizaine de minutes, de quelques heures, de plusieurs jours ou de la durée des saisons. La connaissance de la fréquence de ces manifestations s'avère utile pour la sécurité des machines.

Certaines régions ont la réputation de voir naître ou de voir passer un ou plusieurs cyclones par an, ou encore des tempêtes ou des tornades. De ce fait, les pays à riche implantation de stations météorologiques édictent des règles destinées à mieux cerner les hypothèses de calcul pour donner aux constructions un degré de sécurité accrue, [1].

2-5 Théorie de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Albert Betz, qui suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant. Soit V' la vitesse au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne (comme présenté à la figure 2.2) et M la masse d'air qui traverse l'éolienne, la variation de l'énergie cinétique ΔE_c est, [8] :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} * M(v_1^2 - v_2^2) \quad (2.1)$$

La puissance aérodynamique de l'éolienne P_{aer} s'écrit alors:

$$P_{aer} = \frac{1}{2} * \rho * S * V' * (v_1^2 - v_2^2) \quad (2.2)$$

Avec ρ , la densité volumique de l'air.

Par ailleurs, la force de l'air (F) sur l'éolienne est donnée par:

$$F = \rho * S * V^2 * (V_1 - V_2) \quad (2.3)$$

d'où:

$$P_{aer} = F * V' = \rho * S * V^2 * (V_1 - V_2) \quad (2.4)$$

En identifiant les équations (2.2) et (2.4), il vient :

$$V' = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (2.5)$$

et donc:

$$P_{aer} = \frac{1}{4} * \rho * S * (v_1^2 - v_2^2) * (v_1 + v_2) \quad (2.6)$$

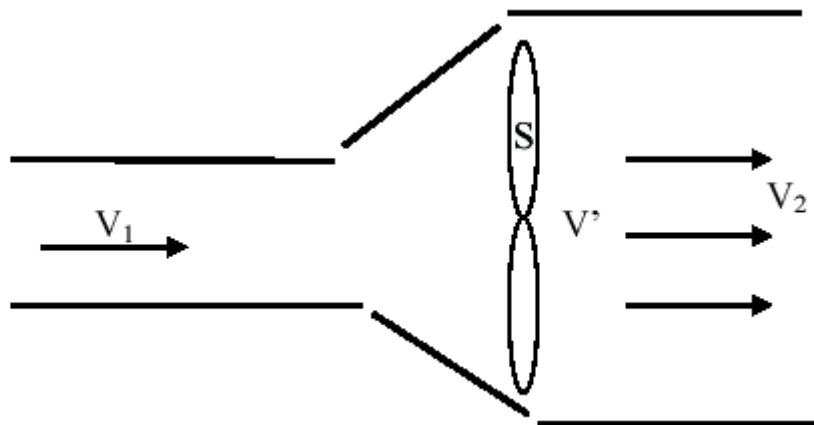


Figure 2.4 : Schéma de principe de la théorie de Betz

Au mieux que 0.593 fois l'énergie cinétique de la masse d'air amont, on écrira alors :

$$P_{aer} = \frac{C_p * 5(\rho * S * V_1^2)}{2} \quad (2.7)$$

Où C_P est le coefficient de puissance de l'éolienne (valeur maximale $\sqrt{\alpha}$ 0.593). Ce coefficient dépend de la vitesse du vent en amont VI , du nombre de pales, de leur rayon, de leur angle de calage et de leur vitesse de rotation, [Sal.E].

2.6 Définition des système éoliens

Un système éolien ou avec un autre terme un aérogénérateur ou encore une éolienne peut être défini comme étant : un système composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique [8]. La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines.

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire, [Sal.E].

2.7 Différents types des systèmes éoliens

Il existe deux différents types de systèmes éoliens selon l'orientation de leurs axes de rotation par rapport à la direction du vent [8] :

2.7.1 Le système à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité car elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

Les structures les plus répandues dans le stade de l'industrialisation sont :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demis cylindres qui augmente le couple moteur.

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure est la plus répandue sont celles de Darrieux (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).



Figure 2.5: Système à axe verticale

2.7.2 Système à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, 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. Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important ; elles sont moins exposées aux contraintes

mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multi-critères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes axe horizontal. Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Quant aux éoliennes à marche rapide, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente, elles sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique .



Figure 2.6: Système à axe horizontal

2.8 Différentes classes d'un système éolienne

On peut classer les systèmes éoliens à axe horizontal [Sal.E], en deux différentes classes :

2.8.1 Système éolien à vitesse fixe

Ce sont des systèmes qui fonctionnent pour des vitesses fixes et bien déterminées afin de produire de l'électricité selon les normes. Cette vitesse est définie selon le générateur électrique utilisé. Ce genre de système est destiné à travailler pour des vitesses égales à la vitesse nominale et cela si on admet que la vitesse nominale est celle qui donne au générateur électrique la possibilité de générer une puissance électrique à 50Hz (le cas de notre réseau).

2.8.2 Système éolien à vitesse variable

Ce sont des systèmes aptes à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale [S.ELA]. Pour cela plusieurs technologies sont mises en service afin d'assurer ce fonctionnement.

2.8.3 Technique mécanique

C'est une technique qui utilise les Paramètres aérodynamiques de la turbine comme outil de variation de la vitesse, et dans ce sens là on distingue deux modes:

le " stall control " (basé sur l'accrochage et le décrochage de la génératrice à la turbine), robuste car c'est la forme des pales qui conduit à une perte de portance au-delà d'une certaine vitesse de vent, mais la courbe de puissance chute plus vite : il s'agit donc d'une solution passive, et le " pitch control " (basé sur l'abaissement et l'augmentation de l'angle de calage des pales, qui permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante). Il faut noter que cette technique n'est fonctionnelle que pour des vitesses égales ou supérieures à la vitesse nominale.

2.8.4 La technique électrique

C'est une technique qui utilise les convertisseurs statiques comme outil de variation de la vitesse[S.EIA].

2.8.5 La technique hybride

C'est une technique qui utilise les deux techniques précédentes à la fois afin d'améliorer le rendement de production et de sécurité du

Système, [Sal.E].

2.9 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable

Le système éolien à vitesse variable est un système apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimal) à l'aide du sous système MPPT, et cela pour produire la puissance max [S.EIA]. L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme ou un système [Sal.E], capable d'aider le système éolien à axe horizontal à vitesse variable pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible.

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la Figure 2.7.

Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de donnée appelée $p_{ot} = C_P \max$ et C_p donné nommé $C_P \max$.

La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par la caractéristique correspondant à cette relation donnée sur la zone II de la figure 2.7. La zone I correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la zone III correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts. La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables.

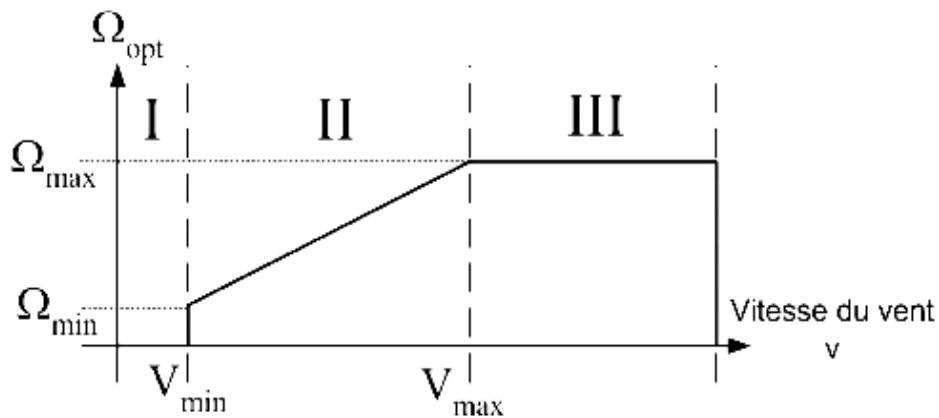


Figure 2.7: Digramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse de vent

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire. Pour chaque vitesse de vent, il faut que le système trouve la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale qui correspond aussi à un couple de charge strictement défini. Le schéma de la figure 2.7 donne les courbes caractéristiques de la voilure éolienne de type Savonius dans le plan puissance-vitesse de rotation de la voilure. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse du vent V donnée. Cette famille des courbes est obtenue directement à partir de la caractéristique C_p de la voilure. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale de forme cubique.

Idéalement, cette courbe doit être suivie à tout moment du fonctionnement du système éolien. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique doit être utilisée.[8]

2.10 Démarrage (et coupure) de éolienne

La plupart des systèmes de commande ont été programmés à laisser l'éolienne tourner à vide sans connexion au réseau lorsque la vitesse du vent est faible. (Si elle était connectée au réseau à des vitesses de vent faible, elle fonctionnerait en fait comme un moteur).

Lorsque le vent est assez fort pour faire tourner le rotor et la génératrice à leurs vitesses nominales, il est important que la génératrice de l'éolienne soit connectée au réseau électrique en temps utile. Sinon il n'y aura que la résistance mécanique du multiplicateur et de la génératrice pour empêcher l'accélération – et éventuellement la survitesse – du rotor .

Une éolienne est munie de plusieurs dispositifs de sécurité , comprenant entre autres des freins de sécurité intégrés, (actionnés dans le cas ou le démarrage de l'éolienne n'aura pas lieu correctement),[1]

2.11 Utilisation des systèmes éoliens

La technologie des systèmes éoliens, très fiable et très souple, a, depuis des siècles, de multiples usages[1] :

2.11.1 Pompage de l'eau

Depuis des générations, on utilise le vent comme source d'énergie fiable et économique dans les systèmes de pompage de l'eau. Dans les régions rurales ou éloignées, l'installation d'un système de pompage éolien mécanique ou électrique peut constituer le meilleur moyen d'assurer les besoins en eau du bétail, du ménage ou même de la communauté.

2.11.2 Récréation

Utiliser le vent pour assurer les besoins énergétiques d'un chalet ou d'un bateau peut être plus efficace et plus économique que d'utiliser des générateurs à carburant fossile. Un système éolien écologique peut fournir l'électricité nécessaire à l'éclairage, de même qu'au fonctionnement de la radio et des petits appareils ménagers.

2.11.3 Fermes et ranchs

Les fermiers utilisent le vent pendant des siècles pour pomper eau. Les systèmes éoliens peuvent, de nos jours, rendre encore plus de services dans une exploitation agricole moderne. Comme ils représentent la solution idéale lorsqu'on a besoin d'électricité à basse tension dans des endroits éloignés, les générateurs fonctionnant à l'énergie éolienne sont

utilisés, dans les fermes, pour alimenter en électricité les clôtures électriques et les systèmes d'éclairage extérieur.

2.11.4 Usage domestique

Habitants de la campagne, désireux de réduire l'effet indésirable sur l'environnement de leur consommation d'énergie, peuvent restreindre leur dépendance par rapport au réseau d'électricité en utilisant un système éolien. Même un mini système éolien permet d'économiser de l'électricité produite à partir de carburants fossiles ou de l'énergie nucléaire.

2.12 Energie éolienne dans le monde

Il y a des milliers d'éoliennes dans le monde et on ignore combien de petites éoliennes fonctionnent car certaines sont réalisées artisanalement.

Plus de 35000 grandes éoliennes sont réparties à travers le monde et elles produisent plus de 8.000 m w. Voici un aperçu général.

- En Afrique : des éoliennes pour l'alimentation des villages en eau ont été installées au Sénégal. La Mauritanie a un grand potentiel du vent. L'Egypte et le Maroc ont des besoins énormes en énergie et de très bonnes ressources éoliennes et des parcs éoliens s'implantent.
- En Algérie : les recherches sont encore en cours.
- En France : elles se multiplient surtout dans les régions les plus exposées au vent, et on prévoit en installer en mer.
- En Canada : un projet très important s'est importé au Québec.
- En Europe : forte croissance dans les pays du nord (Allemagne, Danemark, Angleterre, Espagne).
- Au Etats-Unis : la plus grande population d'éoliennes s'y trouvait jusqu'ici (17000) avec une forte concentration en Californies.
- En Inde: c'est un grand marché, deux usines de fabrication sous licence sont en production.
- En Chine et reste de l'Asie : c'est le marché le plus gigantesque, mais le décollage est lent, les risques de tremblement limitent le potentiel d'installation.
- En Amérique du Sud : plusieurs ont été installées, il y a des vingtaines d'années, surtout en Argentine, [1].

2.13 Energie éolienne en Algérie

Les travaux de recherche pour la détermination du potentiel énergétique éolien sont en cours. Ceux-ci permettront l'établissement d'un ATALAS éolien et de localiser les régions destinées à recevoir les applications des systèmes de conversion éolienne.

Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les hauts palataux et la zone côtière.

Rappelons néanmoins que les premiers résultats montrent que l'Algérie à un régime de vents modérés 2 à 6 m/s) ; voir carte des vents, figure 2.8, [1].

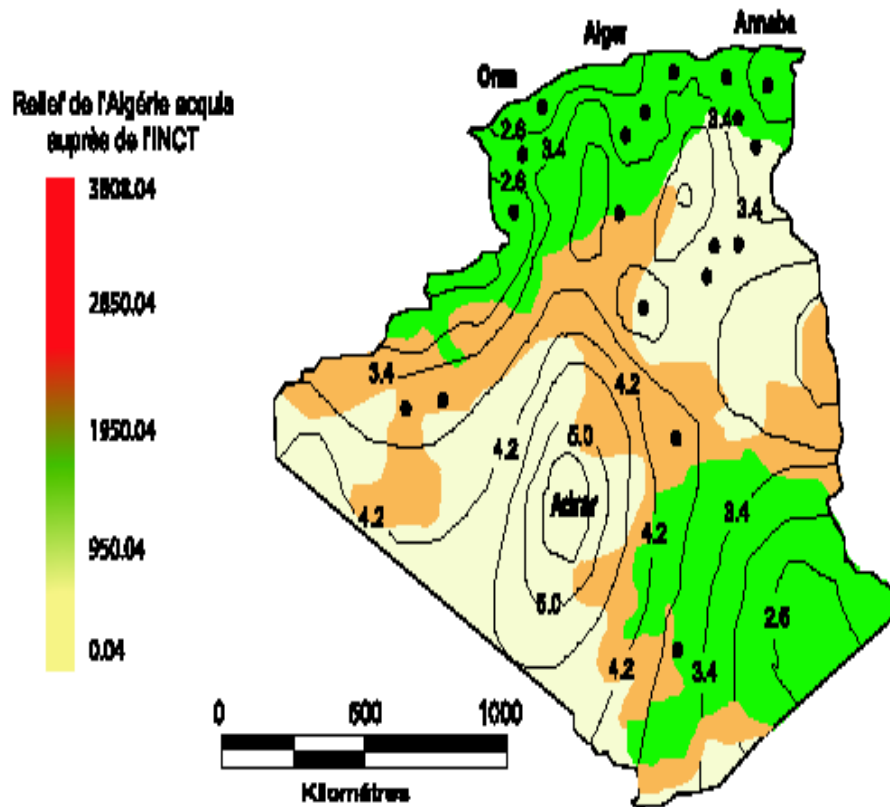


figure 2.8:

2.14 Avantages et inconvénients

1- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable idéale par ce que:

- * Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre;
- * Elle ne nécessite aucun carburant
- * Elle ne crée pas de gaz à effet de serre;

2- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.

3- La plupart des éoliennes sont silencieuses et ne présentent aucun danger important pour les oiseaux ou les autres espèces sauvages;

4- Lorsque de grands parcs d'éolienne sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations;

5- Chaque MWh d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ produites chaque année par la production d'électricité avec le charbon ou le diesel;

6- Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources d'énergie renouvelable (qu'on vient de citer), l'exploitation de l'énergie du vent présente une série d'avantages propres:

7- L'énergie éolienne est modulable et peut être parfaitement adaptée au capital disponible ainsi qu'au besoin en énergie; il n'y a pas donc d'investissement superflus. Cette modularité permet de maintenir en fonctionnement la plus grande part de l'installation lorsqu'une pièce est défectueuse;

8- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre;

9- Le prix de revient d'une éolienne connaît une tendance à la baisse suite aux économies d'échelle réalisées sur leur fabrication;

10- Techniquement au point, les éoliennes sont rentables dans les régions les plus ventées;

11- La période de haute productivité, située souvent en hivers où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.

Les principaux impacts environnementaux des fermes éoliennes sont suivants:

1. Les effets sur le paysage;
2. Le bruit;
3. La perturbation de l'écologie locale des sites

4. Les interférences électromagnétiques;
5. La sécurité;
6. Cout important;
7. Variations importantes des quantités fournies qui dépendent de l'intensité des vents d'où la nécessité de faire appel à d'autres sources;
8. Ils ont un impact visuel nuisible ,et peuvent être bruyantes lorsqu'il y a beaucoup de vent;
9. Les emplacements appropriés pour des parcs d'éoliens sont souvent dans des zones protégées,[1].

2.15 Conclusion

Au rythme de la consommation actuelle, dans les pays industrialisés, un habitant utilise près de 5 tonnes de pétrole par an, selon de nombreux experts, les réserves de pétrole seraient épuisées dans une cinquantaine d'années et un peu plus par gaz; celles du charbon, dans deux cents ans. Selon le conseil mondial de l'énergie, les sources d'énergies renouvelables ne pourront couvrir au mieux que 30% des besoins mondiaux vers 2020 (même si certains estiment que ce chiffre pourrait être de 60% vers 2100).

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur des systèmes très populaires actuellement dans le marché de la production d'énergie électrique d'origine renouvelable : les systèmes éoliens.

Après avoir rappelé des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, les différents types d'éoliennes et leur principe de fonctionnement ont été décrits.



Chapitre trois

Définition d'une centrale éoliens

3.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristique couple / vitesse de la turbine pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

- Un système qui permet de la contrôle mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne , orientation de la nacelle)

Dans ce chapitre en explique d'une les principaux composants d'un système éolien et multiplicateur et types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens, la vitesse de rotation de l'hélice et système de régulation de la vitesse de rotation l'éolienne et le machines électriques et système de conversion d'énergie éolienne et système de protection et de régulation et système utilisant la machine asynchrone et aussi éolienne isolée raccordée au réseau et parc éolienne important et stockage d'énergie et les aspects économiques.

3.2 Les principaux composants d'un système éoliens

Comme mentionné précédemment, il existe deux types de systèmes éoliens : les systèmes à axe vertical et ceux à axe horizontal, mais dans ce mémoire on s'intéressera qu'à ceux à axe horizontal.

Une éolienne "classique" est généralement constituée de quatre éléments principaux:

♦ La turbine, qui représente l'outil principal pour la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est généralement constituée de,[8] :

a) Mat

Un tube d'acier à la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle [Sal.E,]. Le mat doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

b) Nacelle (supportée par le mat)

Est une carcasse qui regroupe plusieurs éléments (générateur, arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de refroidissement, système de control,...).

c) Rotor (supporté par la nacelle)

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. A trois pales, le rotor tripale (concept Danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit . Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de Verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

Le système électromécanique (intégré dans la nacelle), qui transforme l'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique et qui regroupe une génératrice électrique avec son environnement (génératrice asynchrone à cage, MADA, génératrice synchrone, batteries de condensateurs, multiplicateur, tension à courant continu, ...etc.)

Plus le système de commande (contrôle) en cas de besoin (redresseur, onduleur, capteur, système de sécurité électrique, ...etc.).

Le système d'interconnexion, qui relie le système électromécanique (producteur d'électricité) au consommateur d'électricité. C'est un système simple (câbles seulement) en cas d'une énergie mécanique stable ; ou composé (redresseur, onduleur, système de control...) en cas d'une énergie mécanique instable.

Le système de contrôle (utilisé généralement pour les systèmes éoliens de grande puissance), comportant un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à ces puissances maximales. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, ...etc.), le système arrête automatiquement l'éolienne.

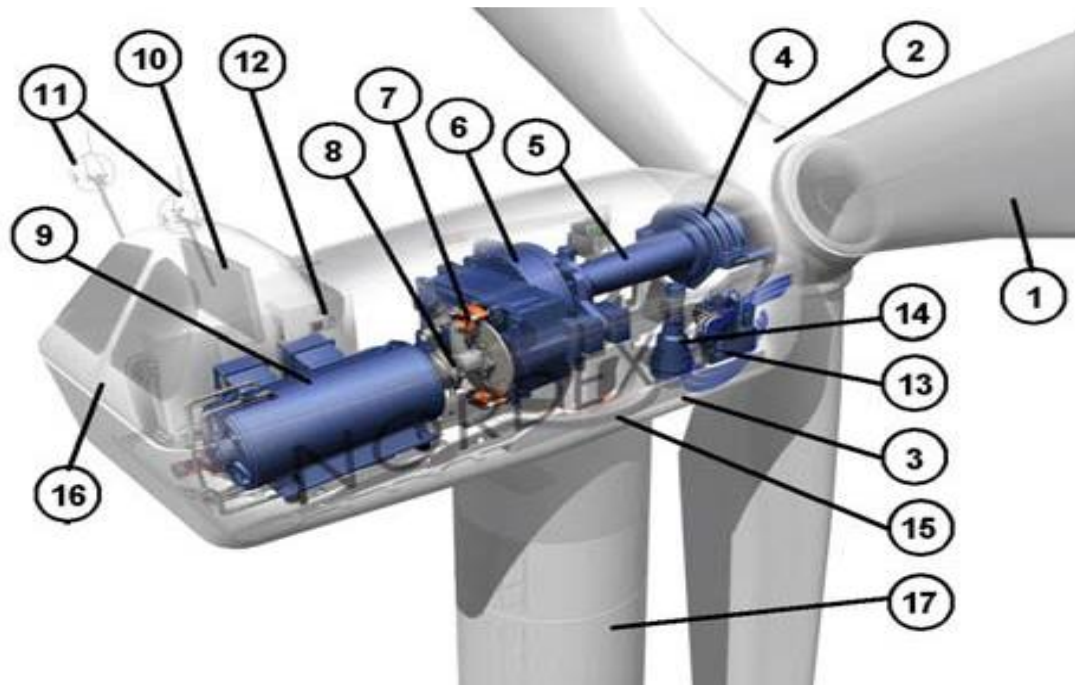


Figure 3.1 : Exemple de constituants d'un système éolien à axe horizontal (schéma d'une éolienne Nordex N60(1300KW))[B.Mul]

- 1: pales,
- 2: moyeu rotor,
- 3: nacelle,
- 4: cardan,
- 5: transmission,
- 6: multiplicateur de vitesse,
- 7: frein à disque,
- 8: accouplement,
- 9: génératrice,
- 10: radiateur de refroidissement,
- 11: centrale de mesures du vent,
- 12: contrôle,
- 13: centrale hydraulique,
- 14: mécanisme d'orientation face au vent,
- 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque,
- 16: capot,
- 17: mât.

3.3 Multiplicateur

Les multiplicateur ont , en générale , d'excellents rendements , on peut donc déduire les caractéristiques de puissance en sortie de l'arbre du multiplicateur , en multipliant la puissance obtenue sur l'arbre de l'aéromoteur par le rendement de ce multiplicateur .

Soit en déterminant la vitesse de rotation de l'hélice en tours par minute . Ensuite, on choisit un rapport de multiplicateur suivant le choix de la génératrice. On choisit alors un rapport de multiplication égal à 25 [1].

3.4 Types d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens

La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique peut être identifiée selon le générateur électrique utilisé,[8] :

3.4.1 Le générateur asynchrone

Le principe de fonctionnement d'une génératrice asynchrone peut être traduit comme suit : C'est une machine à induction asynchrone qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Pour réaliser la génération de l'énergie électrique la machine doit être entraînée au-delà de la vitesse de synchronisme (variable suivant la charge) le cas d'une génératrice à cage d'écureuil. Son rotor peut être à cage d'écureuil ou bobinée. La puissance nécessaire à sa magnétisation est fournie par le réseau lorsqu'elle est couplée en parallèle ou par une batterie de condensateurs dans le cas d'une utilisation isolée. Pour les petites puissances (usuellement < 10 kW), le rotor est à cage d'écureuil, pour des puissances plus importantes, le rotor est bobiné, relié à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. Mais on peut aussi modifier les propriétés électromécaniques du générateur en agissant sur le rotor par ces connexions «Machine Asynchrone Double Alimentée MADA ».

Cependant, pour les machines asynchrones à cages, il faut néanmoins fournir la puissance de magnétisation "puissance réactive" correspondant à une composante du courant réactif. Ce courant peut être emprunté au réseau mais peut aussi bien être obtenu de façon statique en branchant en parallèle à la machine une batterie de condensateurs. En outre, en ajustant ces condensateurs de façon précise, il est possible, dans certaines conditions, d'utiliser une génératrice asynchrone en dehors d'un réseau, en fonctionnement autonome, pour alimenter une charge isolée. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables : mini centrale hydraulique, éolienne, turbine ou moteur à gaz de récupération, certains groupes électrogènes,...etc.

3.4.2 Le générateur synchrone

La génératrice synchrone (ou alternateur) n'a pas besoin de magnétisation extérieure pour créer son champ magnétique. Celui-ci est créé par des bobines ou par des aimants permanents, placés sur le rotor tournant induisant un courant dans le stator bobiné. Cette génératrice étant indépendante du réseau, elle fournit une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation, donc de la vitesse du vent.

Le raccordement au réseau, qui lui exige une fréquence fixe, s'effectue par un convertisseur qui comporte un étage redresseur, un bus continu et un onduleur : on

reconstruit donc une onde sinusoïdale parfaite, ce qui permet aussi de gérer plus facilement la qualité de l'énergie produite. La régulation de puissance s'effectue en partie au niveau de ce convertisseur.

Elle permet un fonctionnement à vitesse variable, donc à rapport d'avance constant et rendement optimal.

Elle permet aussi de limiter les efforts dynamiques en autorisant le rotor à accélérer en cas de forte rafale (stockage d'une partie de l'énergie cinétique du vent dans l'inertie du rotor). Plus complexe à construire et plus chère (aimants permanents, convertisseur), la génératrice synchrone est relativement peu utilisée. C'est Enervons qui introduit ce type de génératrice dans l'éolienne.

3.4.3 La génératrice électrique à courant continu

La génératrice à courant continu (à excitation séparée) est une machine tournante qui transforme de l'énergie mécanique en énergie électrique apparaissant sous forme de tension et courant continu. Elle comporte deux circuits bobinés figure 3.2:

1. l'un est un circuit inducteur, porté par le stator, et il crée un champ de direction fixe sous les pôles de la machine ; il est pour cela appelé « circuit de champ » ou encore « circuit d'excitation ».
2. et l'autre est un circuit induit ou circuit d'armature, porté par l'armature du rotor ; il crée des forces électromotrices induites 'F.E.M'.

La force électromotrice F.E.M peut être exprimée par la relation suivante:

$$E = \frac{P}{a} * N * n * \Phi \quad (3. 1)$$

E : la force électromotrice F.E.M en Volt; P : nombre de paires de pôles ;

a : nombre de paires de voies en parallèles ; n : la vitesse en tr/s ;

N : nombre total de conducteurs actifs ;

Φ : le flux par pôle en Wb

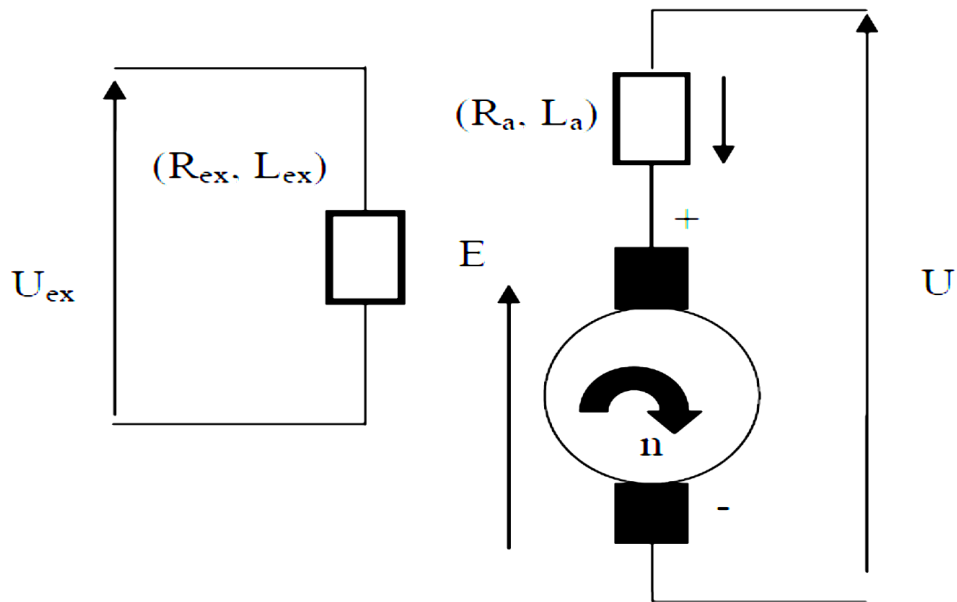


Figure 3.2 : Schémas équivalent électrique d'une génératrice à courant continu à excitation séparée.

La tension extraite de la génératrice notée « U » selon le schémas électrique équivalent figure 3.2 peut être donnée comme suit:

$$U = R_a I * \frac{dI}{dt} - E \quad (3.2)$$

U : la tension extraite de la génératrice en Volt ; R_a : la résistance de l'induit en Ohms ;

L_a : l'inductance de l'induit en Henry ; I : le courant extrait de la génératrice en Ampère;

E : la force électromotrice en Volt ;

La puissance électromagnétique « P_{em} » est donnée par:

$$P_{em} = E * I \quad (3.3)$$

P_{em} : la puissance électromagnétique en Watt ;

Le couple électromagnétique « C_{em} » de la génératrice s'exprime par:

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (3.4)$$

Ω : la vitesse angulaire en rad/s.

La puissance électrique générée s'écrit:

$$P = U * I \quad (3.5)$$

3.4.4 Générateur à structures spéciales

Des machines à structures spéciales avec un principe de fonctionnement spécial aussi. Le but de leurs fabrications est la réponse au besoin actuel, mentionnant par exemple : la machine à réluctance variable, la Machine Asynchrone Double Stator, ...etc.

3.5 Vitesse de rotation de l'hélice

La vitesse de rotation de l'hélice est déterminée par le facteur du rendement r , qu'on prend égal à 8 et du vent .

$$VR = V * r * \frac{60}{\pi} * D \quad (3.6)$$

V : Vitesse du vent (m/s)

r: facteur du rendement égale à 8.

D: Diamètre de l'hélice (m).

Pour différentes valeurs de V variant de la valeur minimale à la valeur maximale, et Pour un diamètre égal 60 m , on calculera les vitesses de rotation correspondantes . Les résultats sont groupés dans le tableau suivant [1]:

Vitesse du vent (m/s)	3.5	4	4.5	5	5.5	6
Vitesse de rotation de l'hélice (tr/min)	8.914	10.188	11.46	12.737	14	15.28

3.6 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

3.6.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"

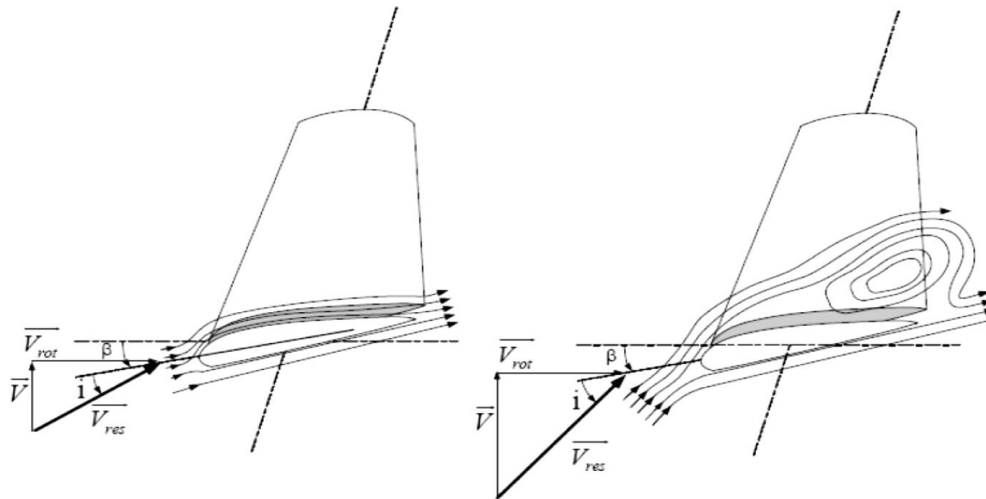


Figure 3.3 : Flux d'air sur un de pales profile (stalle) .

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale Figure 3.3 et par conséquent une baisse du coefficient de puissance.

Ce ci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale.

La répercussion des variations de la vitesse du vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante[9] .

3.6.2 Système d'orientation des pales "pitch"

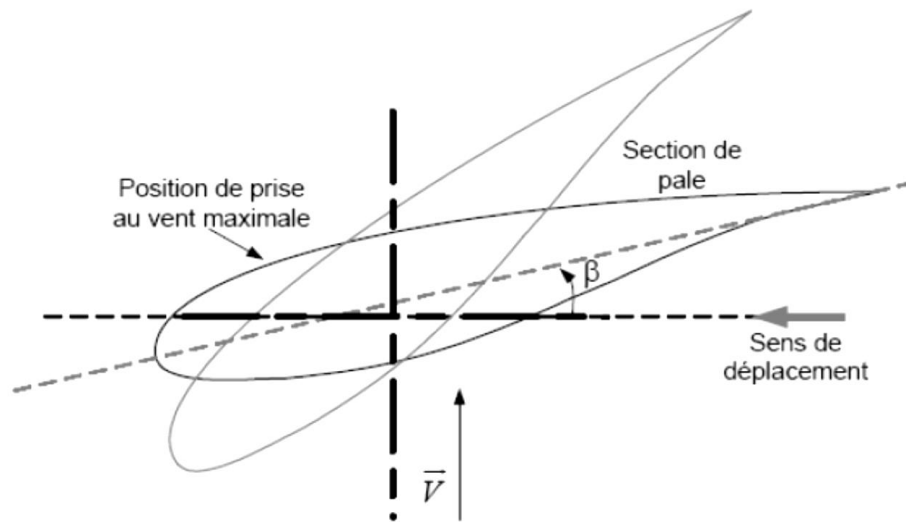


Figure 3.4 : Variation de l'angle de calage d'une pale .

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales figure 3.4 . En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible.

En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

le démarrage à une vitesse du vent V_d plus faible ;

l'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites $[V_d, V_n]$ en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite (1 à 2 voire 1 à 3 pour un rapport (V_n/V_d) de l'ordre de 4 à 5) ;

la régulation par limitation de la puissance pour $V > V_n$;

la protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en

« drapeau » des pales de l'hélice. On remarque que ce système intervient dans le fonctionnement de la turbine, par la variation du calage β , de manière prépondérante depuis le démarrage figure 3.5

(zone I) et dans le régime de régulation de vitesse (zone II et III) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone IV) de la turbine[9] .

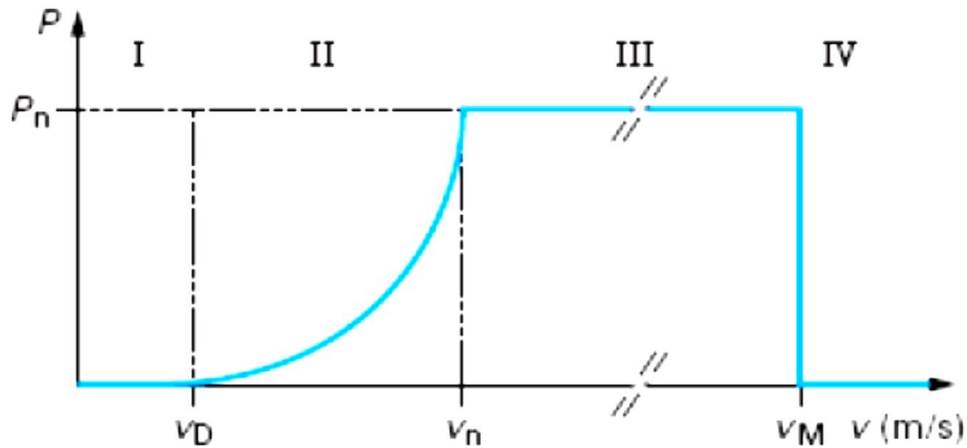


Figure 3.5 : courbe typique de régulation.

3.7 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

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

Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités, [9].

3.7.1 Asynchrones à cage (MAS)

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type Dahlander est une solution parfois utilisée Figure 3.6, mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée Figure 3.7. Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients.

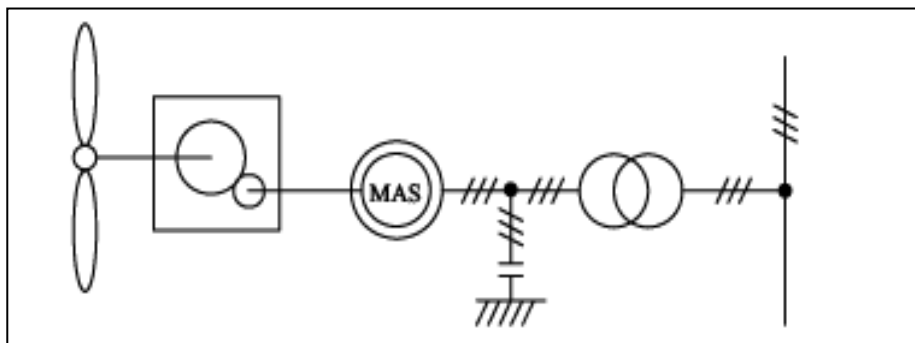


Figure 3.6: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe)

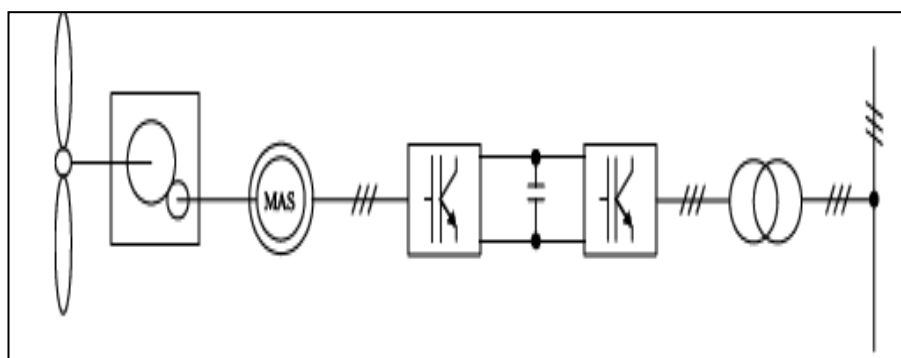


Figure 3.7: Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

3.7.2 Machines asynchrones à double alimentation (MADA) (*rotor bobiné*)

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur. Cette configuration fera l'objet d'une étude détaillée dans la seconde partie de ce mémoire.

3.7.2.1 Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la Figure 3.8 , le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO . Le contrôle de l'IGBT permet de faire varier l'énergie dissipée par le bobinage rotoriques et de fonctionner à vitesse variable en restant dans la partie stable de la caractéristique couple/vitesse de la machine asynchrone. Le glissement est ainsi modifié en fonction de la vitesse de rotation du moteur.

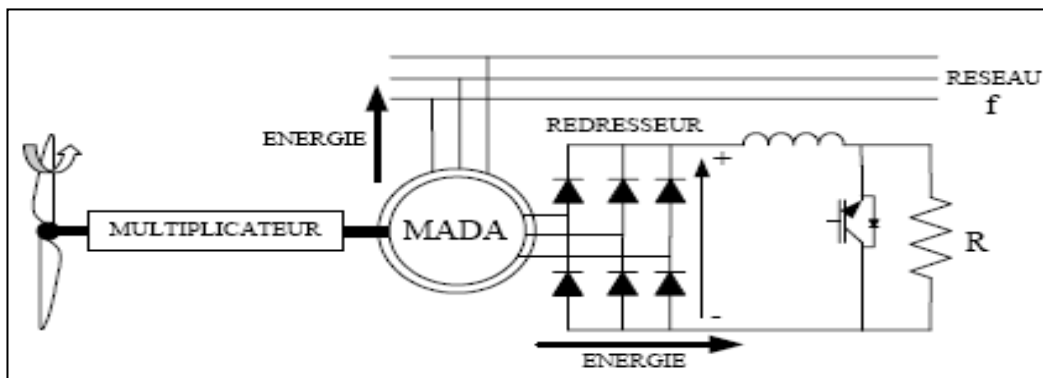
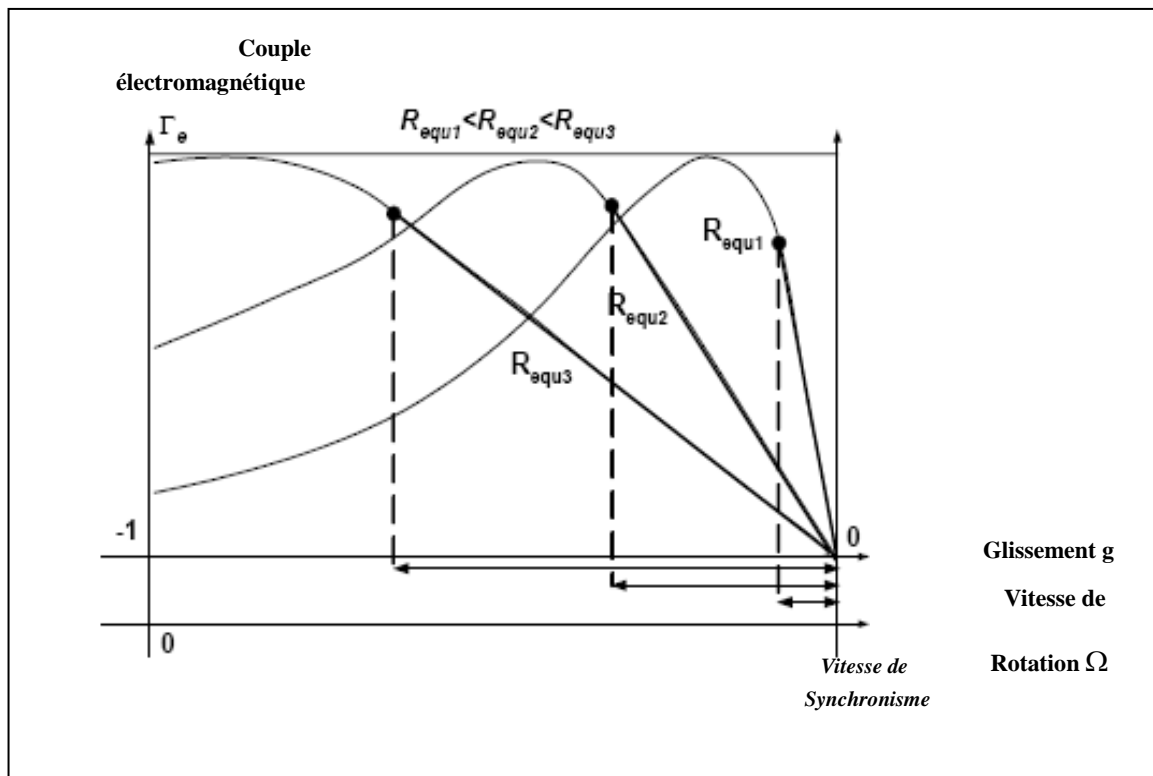


Figure3.8: MADA avec contrôle du glissement par l'énergie dissipée

Si le glissement devient important, la puissance extraite du rotor est élevée et elle est entièrement dissipée dans la résistance R , ce qui nuit au rendement du système. De plus cela augmente la puissance transmise dans le convertisseur ainsi que la taille de la résistance. Le fabricant "VESTAS" dans son dispositif "OPTI-SLIP" a mis en œuvre ce système en utilisant des composants qui tournent avec le rotor et une transmission optique des signaux de commande. Les contacts glissants sont ainsi évités. La variation maximale



du glissement obtenue dans ce procédé est de 10%.

Figure 3.9: Effet de la variation de la résistance rotorique sur le couple électromagnétique

3.7.2.2 Machine asynchrone à double alimentation –structure de Kramer

Dans le but de réduire les pertes d'énergie dues à la structure du système précédent, le hacheur et la résistance sont remplacés par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement Vers le réseau (structure de Kramer, Figure 3.10).

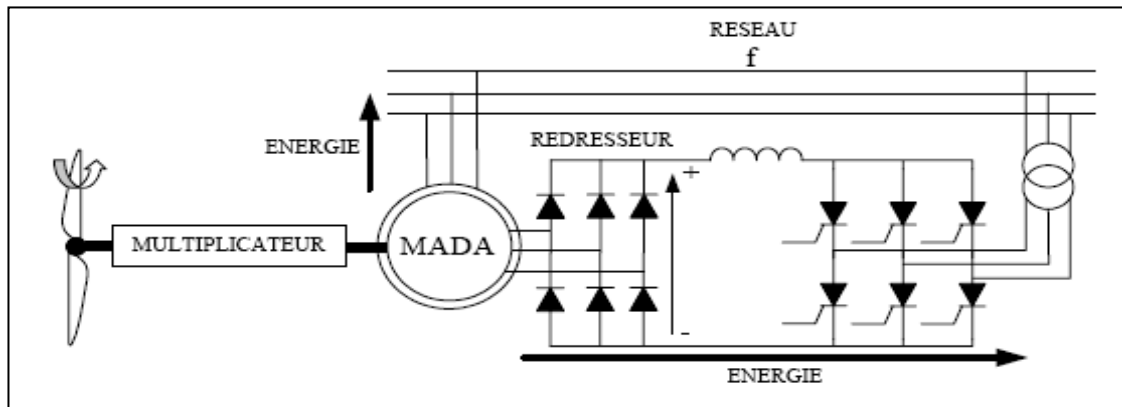


Figure 3.10: MADA, structure Kramer

L'ensemble redresseur-onduleur est alors dimensionné pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Ce système est avantageux s'il permet de réduire la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Afin de respecter cette contrainte, le glissement est maintenu inférieur à 30%. L'utilisation de thyristors pour l'onduleur nuit au facteur de puissance ; de plus le redresseur est unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau) donc le système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures au synchronisme. Cette solution n'est plus utilisée au profit de la structure de Scherbius avec convertisseurs à IGBT.

3.7.2.3 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur Figure 3.11, l'ensemble est alors appelé structure de Scherbius.

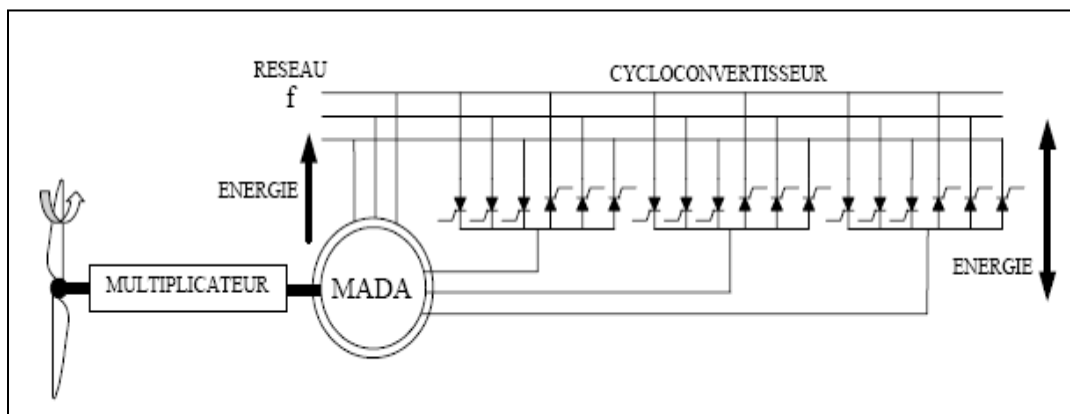


Figure 3.11: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la figure 3.10. En effet si la variation du glissement doit rester inférieure à 30% pour maintenir l'efficacité du système, cette variation peut être positive (fonctionnement hyposynchrone) ou négative (fonctionnement hypersynchrone).

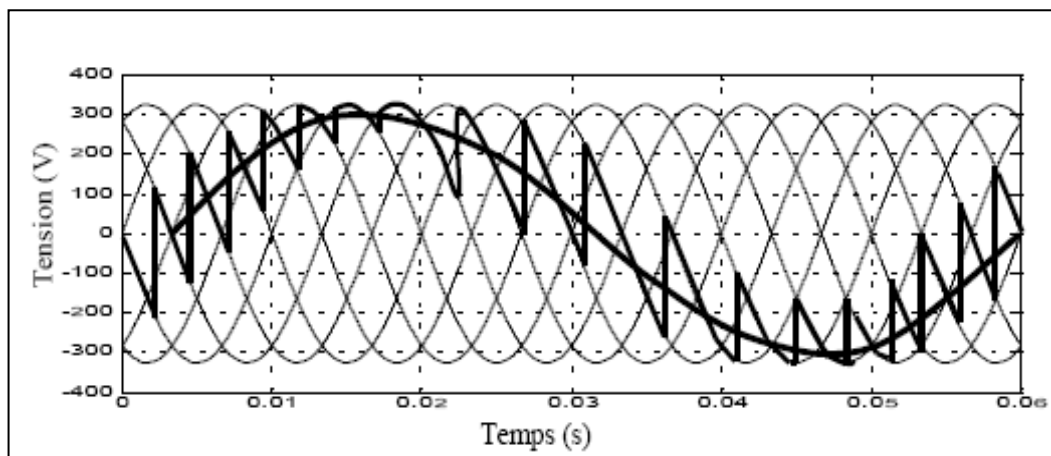


Figure 3.12: Principe de fonctionnement du cycloconvertisseur

Le principe du cycloconvertisseur est de prendre des fractions des tensions sinusoïdales du réseau afin de reproduire une onde de fréquence inférieure (Figure 3.12).

Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT commandés en MLI.

3.7.2.4 Machine asynchrone à double alimentation – structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

Cette configuration Figure 3.13 a les mêmes caractéristiques que la structure de Scherbius avec cycloconvertisseur. Toutefois les interrupteurs utilisés ici (transistors IGBT) peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO. L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en Modulation de Largeur d'Impulsions dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

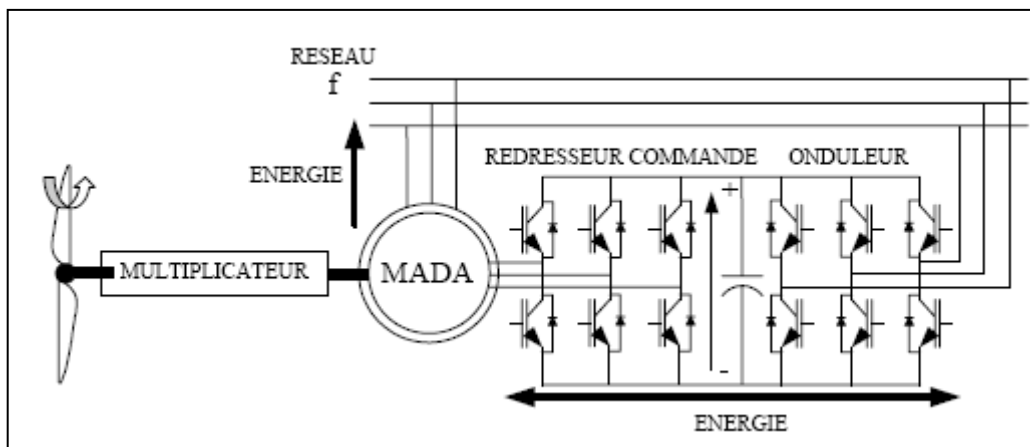


Figure 3.13: Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

La structure du dispositif et la philosophie de fonctionnement sont semblables à celle de la MADA de type "brushless». Toutefois, malgré la présence de contacts glissants qui doivent être entretenus et remplacés périodiquement, la conception de cette machine est plus conventionnelle et plus simple que la machine brushless (un seul bobinage au stator, un autre au rotor).

Plusieurs études récentes, confirmées par des réalisations industrielles, montrent la viabilité de ce dispositif dans un système éolien à vitesse variable. La bi-directionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hyposynchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau.

Si le glissement reste inférieur à $\pm 30\%$ autour du synchronisme, le convertisseur est alors dimensionné pour un tiers de la puissance nominale de la machine et ses pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, le fonctionnement hypersynchrone permet de produire de l'énergie du stator vers le réseau mais également du rotor vers le réseau. La puissance totale ainsi produite peut alors dépasser la puissance nominale de la machine et le facteur de puissance de l'ensemble peut être maintenu unitaire. La présence d'un convertisseur à MLI peut toutefois entraîner des dv/dt importants dans les enroulements rotoriques et faire circuler des courants de fréquences élevés dans ces mêmes enroulements.

3.7.3 Génératrices synchrones

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts.

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup trop rigide.

Une électronique de puissance s'impose pour toutes les applications utilisant ce type de machine qui sont donc à vitesse variable. Mais, contrairement aux génératrices MADA (Machines Asynchrones à Double Alimentation) la chaîne de conversion placée sur le stator doit être dimensionnée pour la totalité de la puissance du système de production. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants (Figure 3.14). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles.

La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

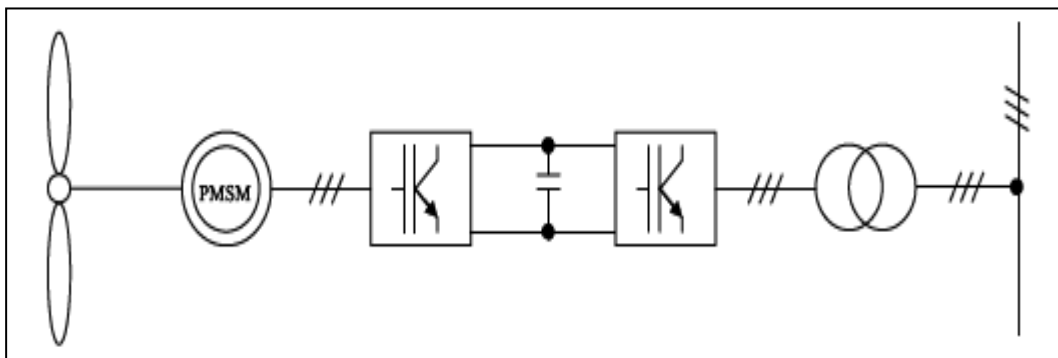


Figure3.14: Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents

Une autre solution (Figure 3.15) 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.

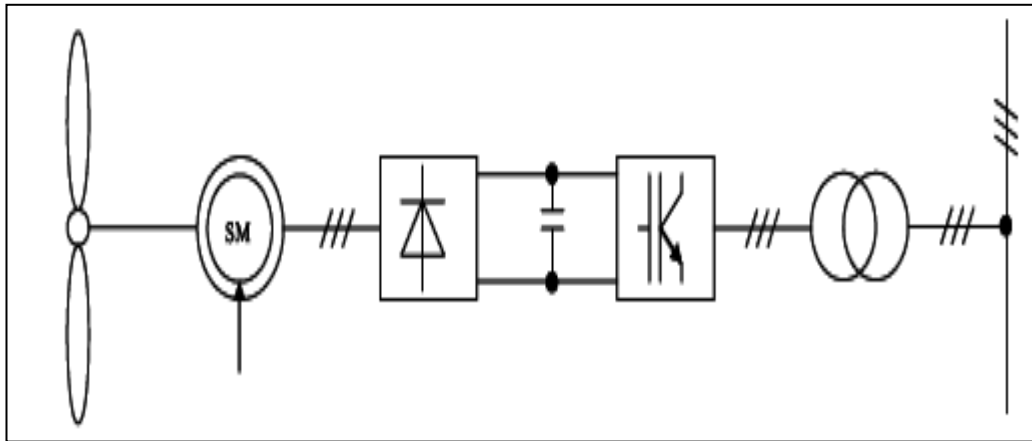


Figure 3.15: Système basée sur la machine synchrone et redresseur à diodes.

Les systèmes de très petite puissance peuvent être simplifiés [radicalement. En choisissant judicieusement les paramètres (paramètres machine et tension continue) du système représenté sur la figure 3.16, un système à vitesse « non constante », à coût minimum et énergétiquement assez performant peut être obtenu .

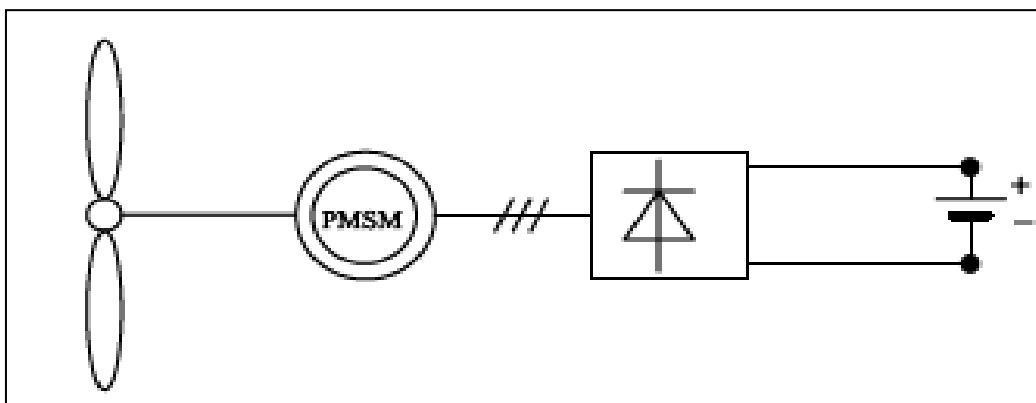


Figure 3.16: Système éolien à coût minimum

3.8 Systèmes de protection et de régulation

Quel que soit le type d'aéromoteur, il est nécessaire pour éviter sa destruction lorsque les vents sont trop violents qu'il soit équipé d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine. Les systèmes peuvent agir de façons différentes et plus ou moins fines avec un degré d'automatisme nul ou intégral,[9].

3.8.1 Système de "régulation" par l'effacement totale ou partiel du rotor

Lorsque la vitesse du vent est supérieure au seuil de "régulation" le rotor entier pivote et présente ainsi une surface réduite au vent.

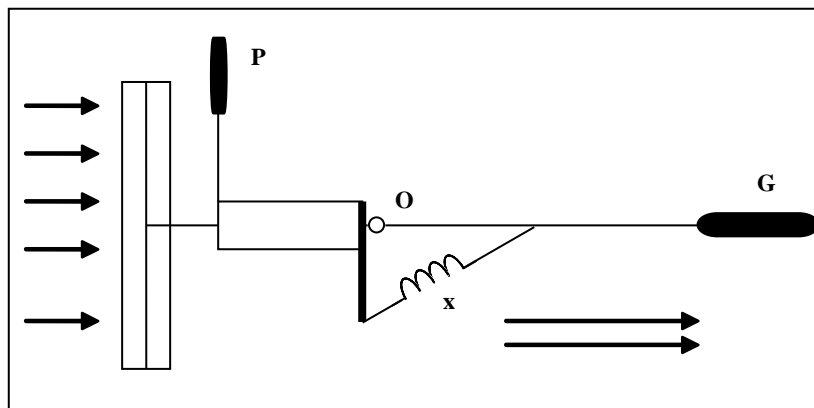


Figure 3.17: Système de régulation

2-8-2 Système de freinage manuel

C'est le moyen le plus simple de préserver une machine de la destruction. Lorsque le vent atteint une certaine force un opérateur immobilise la machine soit à l'aide d'un frein, soit en plaçant l'hélice parallèle au vent (mise en drapeau), soit en modifiant le calage des pales pour obtenir un couple moteur nul (système le plus efficace).

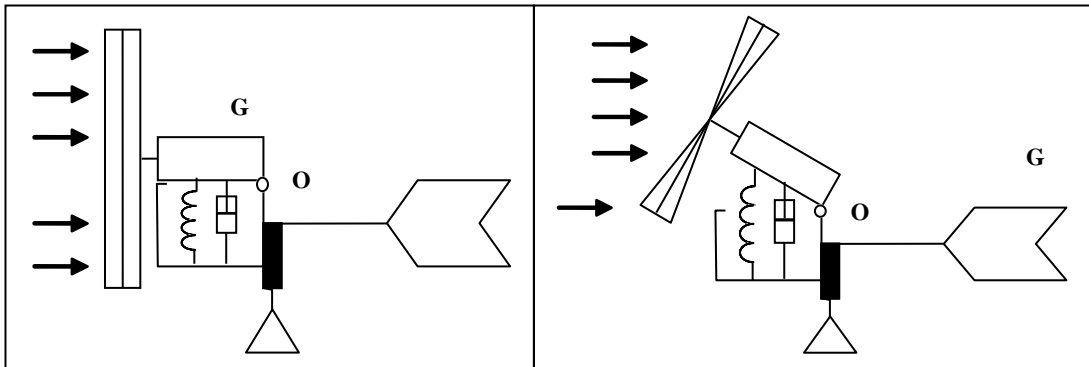


Figure 3.18: Système de freinage manuel

2-8-3 Système de freinage automatique

Les deux moyens cités précédemment peuvent être automatiques par action du vent sur une « palette » de commande.

La palette annexe est parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice. Lorsque la pression du vent sur cette palette, proportionnelle au carré de la vitesse et à la surface de la palette, $K SV^2$, $k \sim 0,9$, atteint un certain seuil, elle peut entraîner la commande d'un frein ou la mise en drapeau. Ce dispositif peut être associé à un ressort qui replace l'hélice dans sa position normale lorsque l'action du vent sur la palette annexe a cessé. Ces systèmes ne peuvent être utilisés qu'avec des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante. D'autre part ils présentent l'inconvénient majeur d'interrompre le fonctionnement de l'aéromoteur au-delà d'une certaine vitesse de vent.

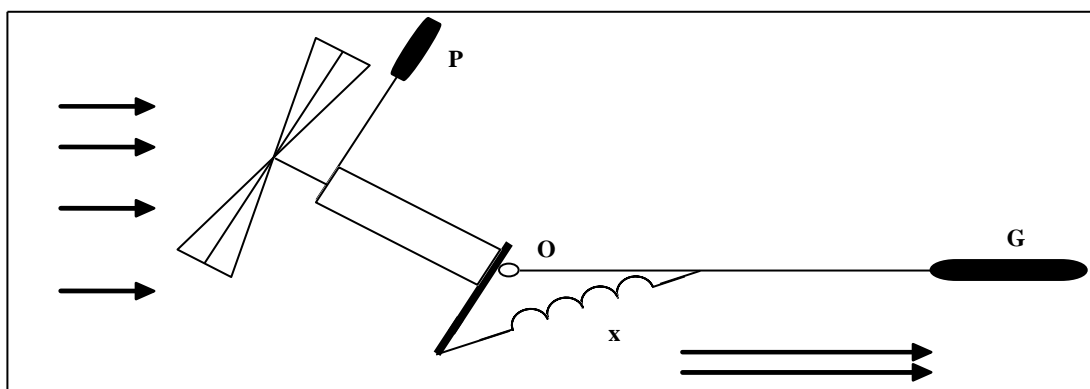


Figure 3.19: Système de freinage automatique

2-8-4 Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge:

Les pales principales sont fixes (calage constant). La régulation comporte 2 palettes P_1 et P_2 articulées en O_1 et O_2 sur un support normal à l'axe des pales principales.

Ces palettes ont leur partie avant un peu plus longue et plus lourde que la partie arrière. Elles sont maintenues à la position repos par les tiges t_1 et t_2 et les ressorts tarés x_1 et x_2 . Jusqu'à une certaine fréquence de rotation f_0 (c'est-à-dire la vitesse de vent correspondante V_0), les palettes restent concentriques. En formant un volant d'inertie, elles tendent à maintenir la fréquence de rotation stable lorsque la vitesse du vent varie pendant de bref instants (petites rafales). Les pales ayant un calage fixe, la fréquence de rotation augmente avec la vitesse du vent.

Lorsque cette vitesse dépasse V_0 , la fréquence de rotation dépasse f_0 , la force centrifuge et la pression de l'air sur les palettes deviennent prépondérantes. Les palettes P_1 et P_2 pivotent autour d' O_1 et O_2 et prennent la position correspondant au freinage (voir figure ci-dessous).

La vitesse diminue alors et l'action des ressorts x_1 et x_2 redevient prépondérante, ramenant les palettes à leur position initiale. Si le vent est toujours supérieur à V_0 le processus recommence. En fait, le mouvement réel ne présente que de faibles variations de position autour d'une position d'équilibre. En fonctionnement, les palettes semblent conserver une position d'équilibre fixe. Mais la vitesse de rotation n'est pas très stable pour toute la plage d'utilisation de vitesse du vent. En plus de ce système de régulation, un frein peut permettre d'immobiliser la machine en cas de tempête, d'arrêt urgent ou de non-utilisation.

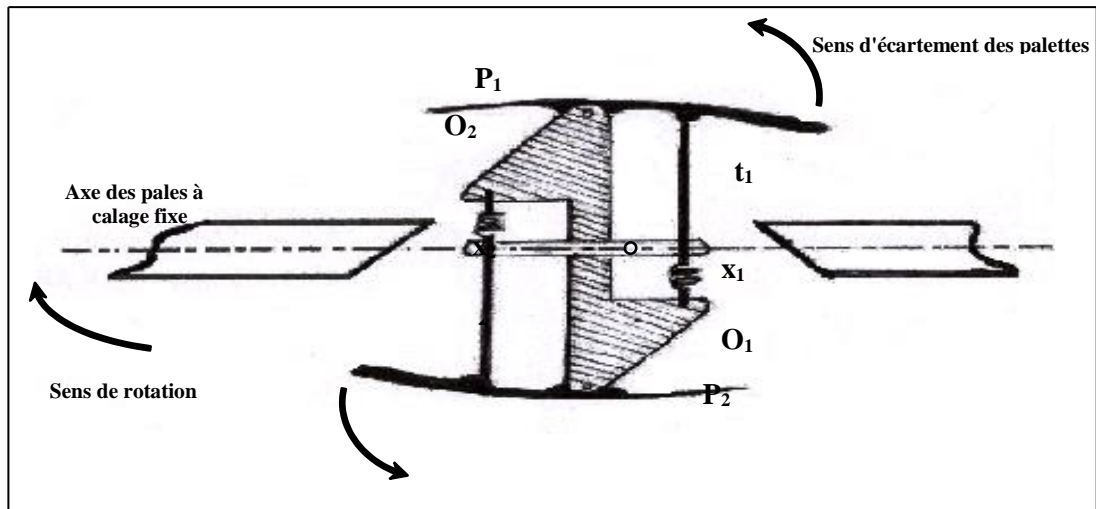


Figure 3.19: Régulation par frein aérodynamique centrifuge où a "frein pneumatique"

2-8-5 Régulation par variation du calage des pales

La régulation consiste à conserver une fréquence de rotation constante de l'hélice pour toute une gamme de vitesses de vent. Cette régulation est obtenue en faisant varier l'angle de calage β , et par suite l'angle d'incidence i qui est l'angle entre la direction de la vitesse du vent relatif et l'axe de la pale.

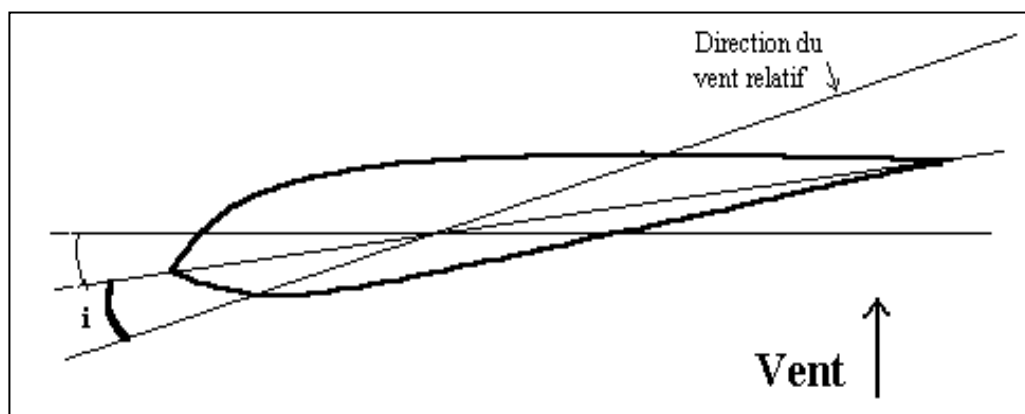


Figure 3.20: Régulation par variation du calage des pales

3.9 Systèmes utilisant la machine asynchrone

3.9.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure 3.21, [10].

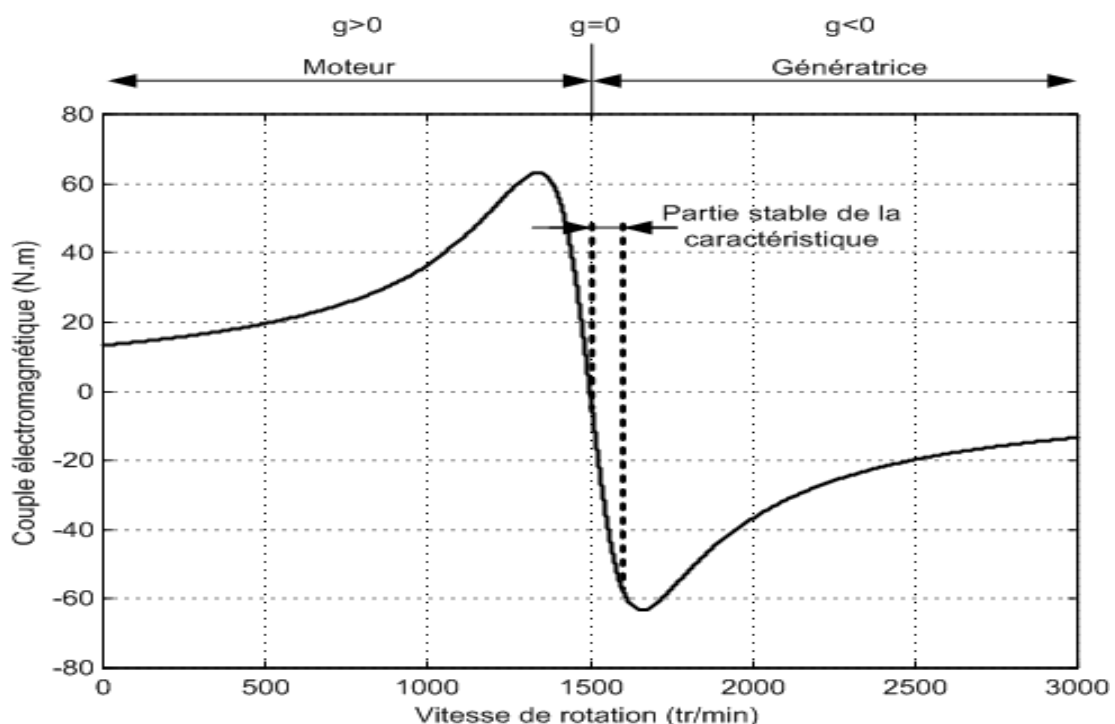


Figure 3.21 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone

à 2 paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure 3.22). La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure 3.22 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

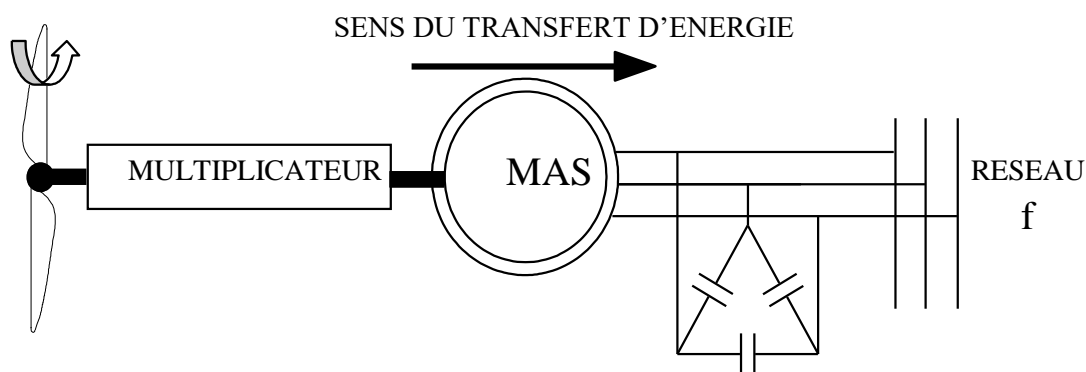


Figure 3.22: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

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

3.10 Eolienne isolée raccordée au réseau

Les éoliennes isolées connectées au réseau de distribution sont souvent en fonctionnement pour tester le potentiel éolien du site considéré, ou appartiennent à des industriels ou des privés qui produisent leur propre électricité et revendent l'excédent au distributeur local.

Ce type de production décentralisée se rencontre de plus en plus avec le développement des primes et autres aides à la production d'énergie électrique propre.

Le prix de rachat du KWh étant important, cela facilite et encourage le développement de l'éolien.

Les puissances de ces éoliennes peuvent varier selon qu'il s'agit d'un exploitant peuvent varier selon qu'il s'agit d'un exploitant privé ou d'industriel, de 50 KW à 4,5 MW pour les plus récentes éoliennes du marché. Les amortissements qui s'étalent normalement sur 20 à 30 années sont considérablement réduits par toutes les aides. Une telle installation peut être rentable en 10 à 15 ans.

Ces éoliennes fonctionnent en permanence et ont, le plus souvent, besoin d'être raccordées à un réseau puissant, dans le cas d'utilisation de génératrices asynchrones par exemple. Il n'y a pas d'unité de stockage pour ce type de production et la puissance produite fluctue beaucoup au gré du vent,[11].

3.11 Parc éolien important

En ce qui concerne les parcs éoliens , aussi appelés fermes éoliennes , on peut rencontrer différentes structures d'éoliennes , de génératrices et de modes de connexion au réseau . Les types de machines sont ceux précités . Pour ce qui est des modes de raccordement , il peut y avoir différentes stratégies selon la situation du parc et la technologie employée [11] .

Principalement , on peut observer les structures suivantes :

-Les éoliennes connectées ensemble par un bus continu , alimentant un onduleur assurant la connexion avec le réseau.

-Des solutions mixtes existent afin d'avoir des onduleurs de taille modérée fonctionnant proche de leurs charges nominales .

Ces parcs peuvent se situer sur terre comme en mer . Ainsi , une partie du transport de l'énergie peut être faite par un bus continu qui relie le parc éolien au littoral ou peut se situer l'onduleur pour le raccordement au réseau .

3.12 Stockage d'énergie

Nous allons nous intéresser ici aux modes de stockage qui peuvent être associés à une éolienne . Le but est double : stocker de l'énergie électrique dans les périodes de fort vent pour pouvoir la restituer dans les périodes de vent plus faible et lisser au maximum la puissance produite par l'ensemble éolienne plus stockage . Le stockage se fait le plus souvent sous une forme autre que l'énergie électrique et demande donc des conversions énergétiques . Le rendement global du stockage est donc très variable en fonction de procédés choisis [11] .

Il apparait donc deux types de stockage , l'un à court terme et l'autre à long terme . Ils mettent en œuvre des méthodologies et des contrôles différents .

3.12.1 Stockage à court terme

Les systèmes de stockage à court terme permettent de transférer rapidement des puissances élevées sur des durées pouvant aller de la seconde à la dizaine de minutes . On trouve principalement des systèmes à stockage inertiel mais le développement récent de nouveaux composants tel que les super – capacités permet d'envisager des solutions de stockages électrochimiques [11] .

Les systèmes inertiels sont eux aussi en grande évolution avec l'utilisation de machines rapides . Effectivement , le stockage qui s'effectuait classiquement dans de très lourds volants d'inertie tournant à 3000 tr/min accouplés à des machines classiques , s'effectue désormais à très grande vitesse avec des machines complexes comportant plusieurs rotors concentriques à des vitesses différentes .

L'alimentation se fait par de l'électronique de puissance permettant d'obtenir de plus grandes puissances et de stocker encore plus d'énergie .

Il est désormais possible de stocker et restituer une puissance de plusieurs dizaines de KW pendant plus de dix minutes . Ces systèmes permettent donc de lisser la puissance fluctuante du vent .

Les super capacités sont elles aussi un grand intérêt pour le lissage des fluctuations de puissance de par leur dynamique plus rapide que celle des batteries . Leurs capacités augmentent et l'on trouve désormais des super capacités de 1800 F , utilisées en association avec un convertisseur alternatif /continu permettant l'échange avec le réseau .

3.12.2 Stockage à long terme

Pour ce qui est des systèmes de stockage à long terme , on connaît bien les batteries et l'on voit se développer des systèmes complexes tels que les systèmes à air comprimé ou encore l'électrolyse associée à une pile à combustible .

Les batteries ont évolué durant cette dernière décennie et offrent désormais des capacités volumiques et massiques très importantes notamment avec les dernières générations du type lithium polymère .

Elles permettent aussi un fonctionnement en cyclage sans grande contrainte avec des chargeurs optimisant leur durée de vie [11] .

Les systèmes à air comprimé utilisent différents procédés afin de stocker et restituer l'énergie en utilisant ou non l'énergie d'échauffement que la compression procure . Des fois , un compresseur est utilisé pour le stockage et une turbine associée à une génératrice pour le déstockage.

Les systèmes utilisant un électrolyseur pour le stockage d'énergie sous forme d'hydrogène et la restitution d'énergie à l'aide d'une pile à combustible sont aussi à l'étude.

Pour ce qui est des systèmes à air comprimé ou électrolyse , ils ont encore en développement et le rendement global pour la restitution est relativement faible .

Par contre , ils permettent d'obtenir des capacités importantes à moindre frais car le stockage se fait dans des réservoirs qui peuvent être dimensionnés en fonction de l'énergie que l'on veut stocker .

Il existe donc plusieurs solutions pour le stockage .

Elles peuvent être associées afin d'obtenir une unité permettant simultanément de lisser les fluctuations de puissance (court terme) et d' atténuer les effets des périodes de faible ou forte production (long terme) .

En tous cas , il ne faut pas écarter un système de stockage associé à l'éolien à cause de son faible rendement global car les pertes dans les systèmes de conversion peuvent globalement ne pas être si pénalisantes si cela nous permet de maintenir constante la production en permanence .

3.13 Les aspects économiques

Techniquement fiable, la filière voit sa compétitivité faire des progrès continus.

3.13.1 Cout et rentabilité

La rentabilité d'un investissement dans un projet éolien dépend des prix de revient et de vente du kWh. Le prix de revient va continuer à baisser.

Les couts d'exploitation, d'entretien et de maintenance représentent 3 % par an du cout d'investissement total .



Dans les années qui viennent (progrès techniques, diminution régulière du cout du kW installé consécutive aux volumes installés, effets d'apprentissage, etc.). Le tarif d'achat par EDF est fixé par les pouvoirs publics, qui soutiennent les énergies renouvelables, dont l'éolien. Ce soutien est de même nature que celui apporté aux autres filières énergétiques .

Comme toutes les nouvelles techniques de production d'électricité à leurs débuts, le kWh éolien est plus cher que celui produit par les centrales classiques dont tous les couts environnementaux ne sont pas pris en compte. Ce « surcout » temporaire est pris en charge par tous les consommateurs d'électricité, au même titre que les autres charges du service public de l'électricité. Il en représente actuellement une partie minime. En 2020, pour 2 000 MW installés dont 6 000 en mer et pour un foyer consommant 2 00 kWh / an (ce qui représente la consommation moyenne d'un foyer ne se chauffant pas à l'électricité), le cout sera de 5,4 € / an et, pour un foyer se chauffant à l'électricité, 26 € / an.



De plus cette valeur ne tient pas compte des retombées économiques engendrées ni de moindres impacts sur l'environnement d'un tel programme.



3.13.2 Retombées économiques

La filière éolienne est créatrice d'emplois, pour la fabrication et pour l'installation. Elle employait fin 2007 environ 150 000 personnes en Europe et 350 000 dans le monde. Plus de 80 % du marché des éoliennes sont contrôlés par les constructeurs européens (Danemark, Allemagne, Espagne). Historiquement, l'industrie éolienne française s'est spécialisée dans la fabrication de composants (mâts, pales, générateurs, etc.). Aujourd'hui AREVA (Multibrid), Alstom (Ecotècnia) et Vergnet se positionnent sur le marché de la fabrication et de l'assemblage des composantes des éoliennes. Fin 2008, la filière éolienne française (fabrication et installation) employait environ 7 000 personnes .

Les parcs éoliens sont une source de revenus pour les collectivités locales par le biais de la taxe professionnelle. Elle rapporte, pour une éolienne de 1 MW, environ 6 000 € pour la commune ou la communauté de commune, 6 000 € pour le département et 1 200 € pour la région. Cette source de revenus contribue souvent de manière importante au développement économique des communes.

Les propriétaires fonciers touchent de 2 000 à 3 000 € par an et par éolienne implantée sur leur terrain. Ce revenu fixe est très apprécié dans le secteur agricole soumis aux aléas des marchés mondiaux des matières premières,[12].

3.14 Perspectives d'avenir

Pour atteindre les objectifs fixés par le Grenelle Environnement (puissance installée fin 2012 : 11500 MW), il faudra installer environ 1 800 MW en moyenne annuelle, alors qu'environ 1 800 MW ont été installés en 2008 . Il faut donc sensiblement accélérer le rythme des installations.

Les perspectives pour l'emploi dans ces conditions sont prometteuses : la filière éolienne pourrait en 2012 générer 16 000 emplois directs (plus de 20 000 si l'on compte les emplois indirects) dont 2150 environ dans la gestion et la maintenance des parcs .

3.15 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'composants d'un système éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que le mode de régulation de la vitesse de rotation.

Les troisièmes chapitres de nous travaux, peuvent concrétiser à la modélisation et simulation d'un système éolien à vitesse variable intègre une machine asynchrone à cage d'écureuil.



Chapitre quatre

Modélisation du système éolienne

4.1 Introduction

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse incidente du vent et des conditions de fonctionnement, sa vitesse de rotation en particulier.

Une machine asynchrone à cage est constituée de 2 parties : le stator et le rotor. Le stator, représente la partie statique de la machine. Il est constitué d'un circuit magnétique comportant de multiples encoches à l'intérieur desquelles sont placées 3 bobinages formant l'enroulement triphasé du stator. Le rotor, partie mobile, est formé d'un circuit magnétique où est logé des barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit. Les barreaux visibles sur la Figure (4.1) sont les branches des boucles qui se déplacent à l'intérieur du champ magnétique tournant du stator.

Dans une vraie génératrice asynchrone (GAS), les barreaux de la cage ne sont pas apparents, car ils sont habillés d'un matériau magnétique qui favorise la formation de pôles magnétiques sur la surface du rotor [13].

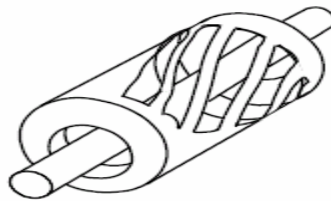


Figure 4.1: Rotor d'un moteur à cage d'écureuil [13]

Dans ce chapitre présente la modélisation de la turbine et la modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans le repère naturel (a - b - c) et dans le repère de Park (d - q), modélisation du système éolienne (Turbine plus MAS)

4.2 Modélisation d'une turbine éolienne

4.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse $\Omega_{turbine}$ qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (figure 4.1).

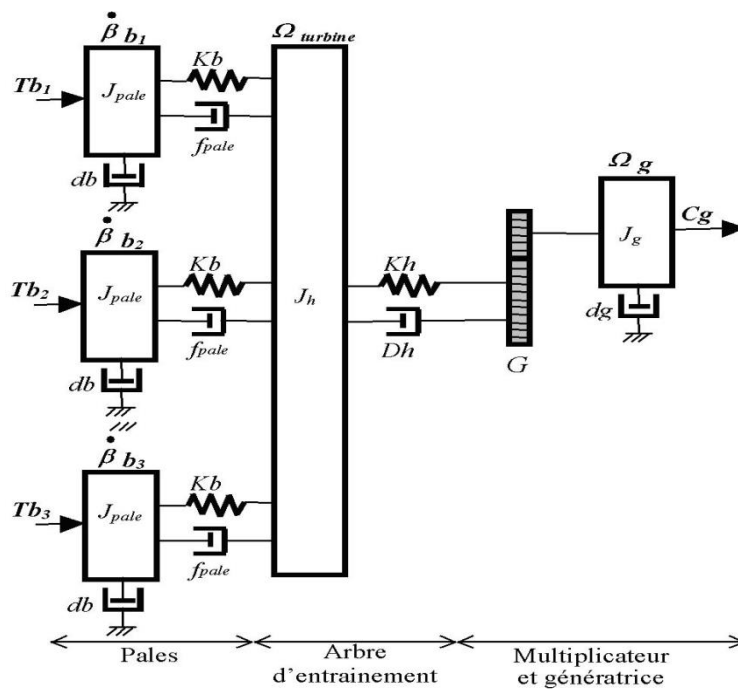


Figure 4.1 : Système mécanique de l'éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- la même inertie J_{pale}
- la même élasticité Kb
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées $\dot{\beta}_1, \dot{\beta}_2, \dot{\beta}_3$. Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée .

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- son inertie J_h
- son élasticité Kh
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur Dh

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_g
- un coefficient de frottement dg

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1=Tb_2=Tb_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (figure 4.2) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [Sal.E].

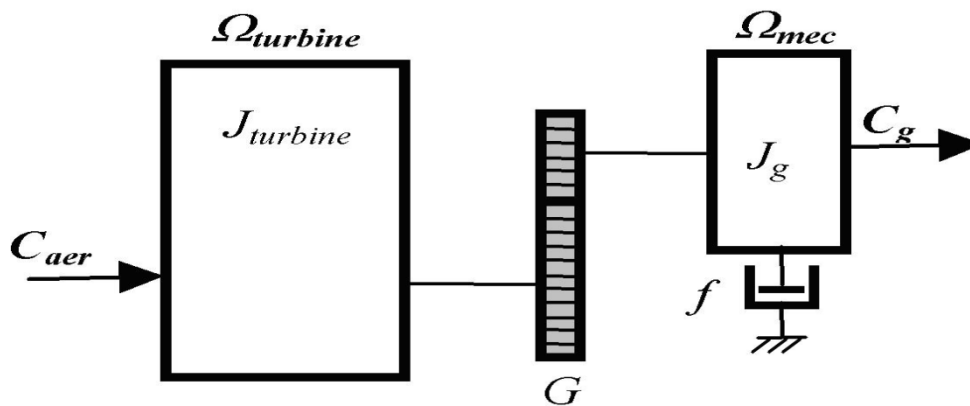


Figure 4.2 : Modèle mécanique simplifié de la turbine

4.2.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G figure 4.3 .

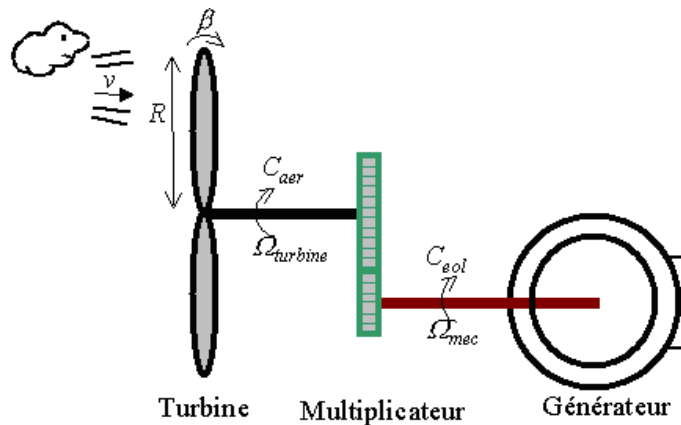


Figure 4.3 : Schéma de la turbine éolienne

La puissance du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [Sal.E] :

$$P_v = \frac{\rho * s * v^3}{2} \quad (4.1)$$

Où

- ρ est la densité de l'air (approx. 1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).
- s est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- v est la vitesse du vent.

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = C_p * P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho * s * v^3}{2} \quad (4.2)$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Il dépend de la caractéristique de la turbine [Sal.E]. La figure 3.4 représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse et de l'angle de l'orientation de la pale β .

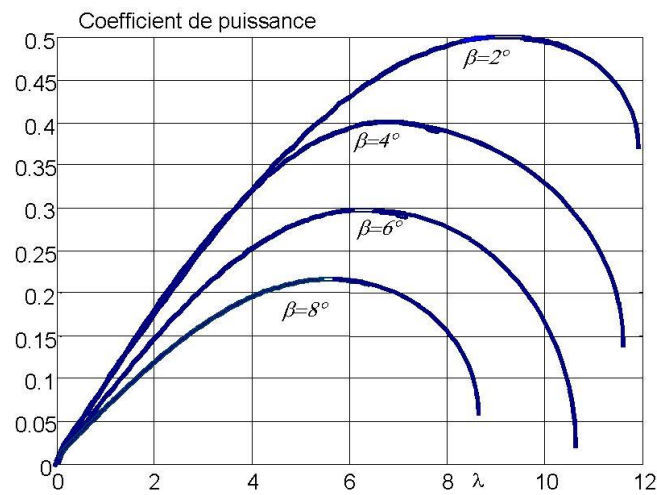
Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} * R}{V} \quad (4.3)$$

Où $\Omega_{turbine}$ est la vitesse de la turbine.

Figure 4.4: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine

A partir de relevés réalisés sur une éolienne de 1.5 MW , l'expression du coefficient de



puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante :

$$C_p = (0,5 - 0,167) * (\beta - 2) * \sin \left[\frac{\pi * (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3(\beta - 2)} \right] - 0,00184 * (\lambda - 3) * (\beta - 2) \quad (4.4)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p * \frac{\rho * s * v^3}{2} * \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (4.5)$$

4.2.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice (figure 3.5).

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_a e r}{G} \quad (4.6)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (4.7)$$

4.2.4 Equation dynamique de l'arbre

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

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (4.8)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. A titre illustratif, pour une éolienne Vestas de 2 MW, une pale a une longueur de 39m et pèse 6.5 tonnes [Sal.E].

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

$$J * \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (4.9)$$

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vix} \quad (4.10)$$

Le couple résistant du aux frottements C est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vix} = f * \Omega_{mec} \quad (4.11)$$

4.2.5 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (4.12)$$

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine;ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} * (C_g - f * \Omega_{mec} - C_{em}) \quad (4.13)$$

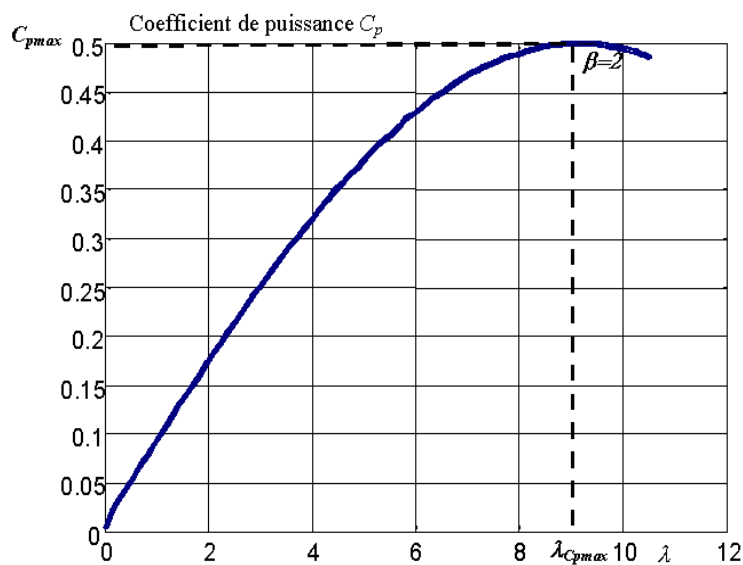


Fig 4.5: Fonctionnement optimal de la turbine

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse C_{pmax} (à constant et égal à 2^{\pm}) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p (figure 4.5).

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{cp\max} * v}{R} \quad (4.14)$$

4.2.6 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse

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

– L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui errone la lecture de la vitesse du vent.

– Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente.

C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse .

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J * \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (4.15)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_{vis} \approx 0$), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (4.16)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estimé}}{G} \quad (4.17)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équations (4.17) :

$$C_{aer-estimé} = C_p * \frac{\rho * S}{2} * \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} * v_{estimé}^3 \quad (4.18)$$

Une estimation de la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine;estime}$ est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (4.19)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation (3.19)

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} * R}{\lambda} \quad (4.20)$$

En regroupant ces quatre équations(4.20),(4.18),(4.17),(4.19), on obtient une relation globale de contrôle:

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} * \frac{\rho * \pi * R^5}{2} * \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (4.21)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur C_{pmax} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em-ref} = \frac{C_p}{\lambda_{cp\max}^3} * \frac{\rho * \pi * R^5}{2} * \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3}$$

(4.22)

L'expression du couple de référence devient alors proportionnelle au carré de la vitesse de la généra-trice :

$$C_{em-ref} = A * \Omega_{mec}^2 \tag{4.23}$$

$$A = \frac{C_p}{\lambda_{CP\max}^3} * \frac{\rho * \pi * R^5}{2} * \frac{1}{G^3} \tag{4.24}$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure 4.6.

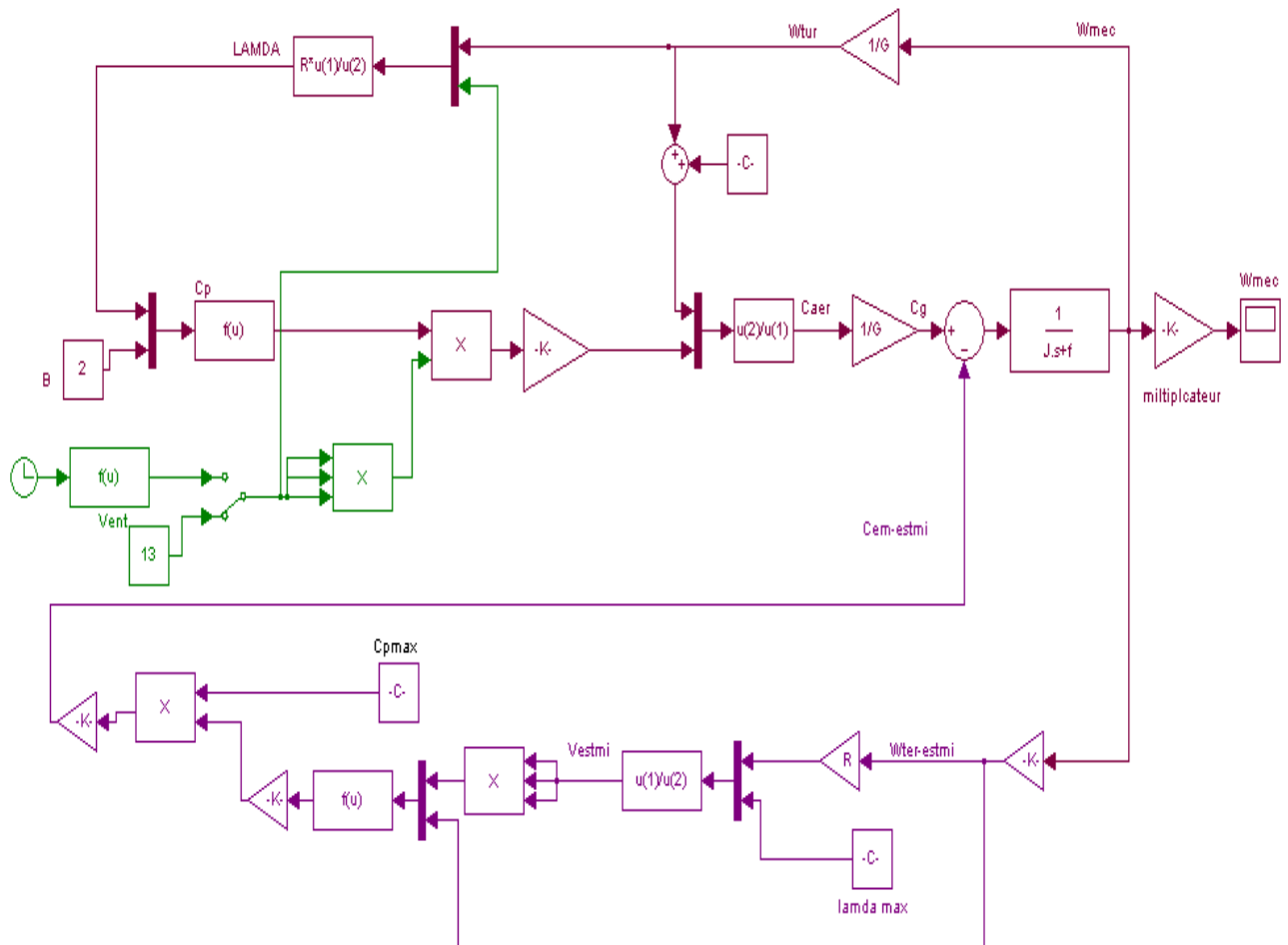


Figure 4.6: Schéma bloc de la turbine

4.2.7 Résultats de simulation

4.2.7.1 vitesse du vent variable

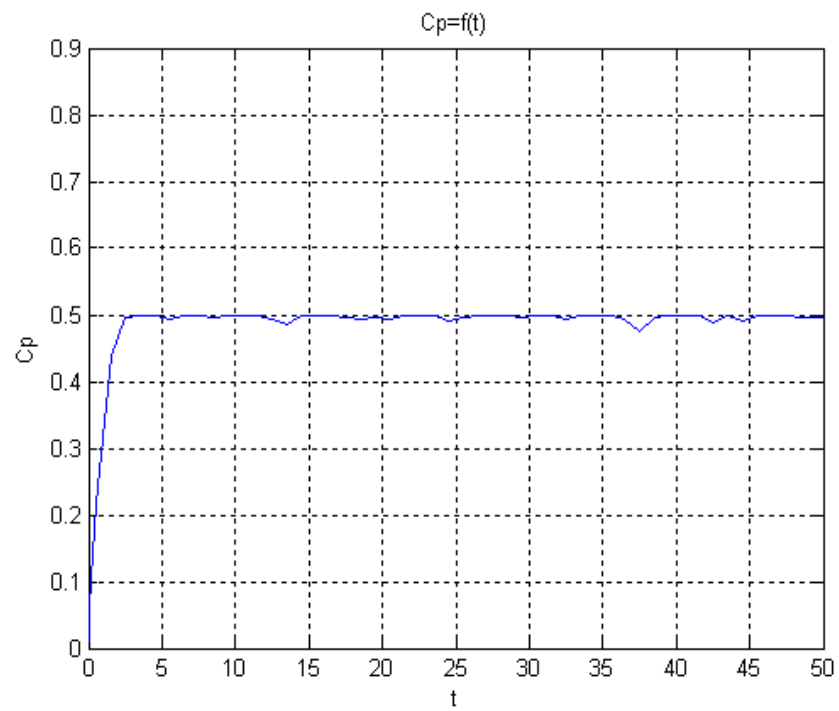


Figure 4.7: Coefficient de puissance en fonction de temps

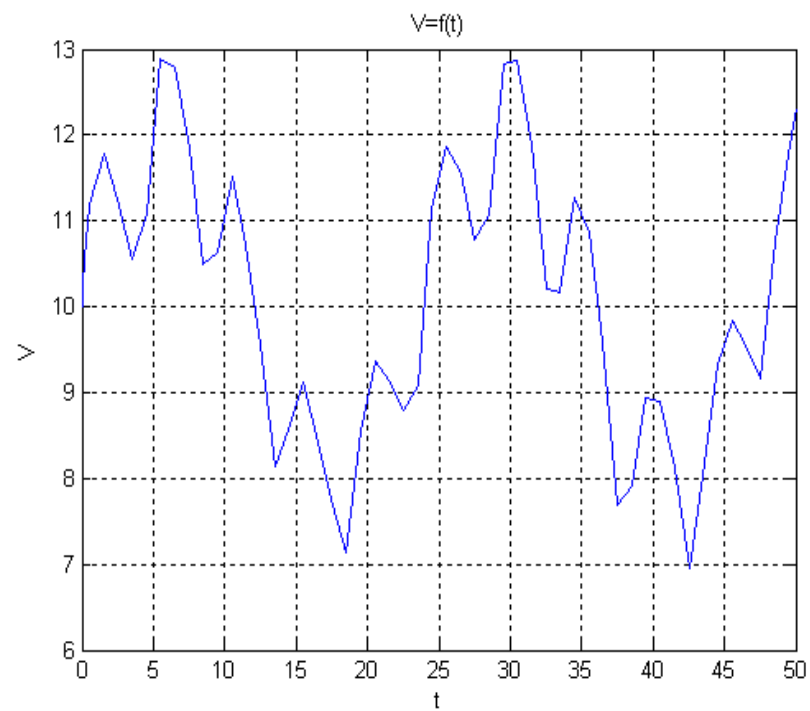


Figure 4.8 :Vitesse du vent

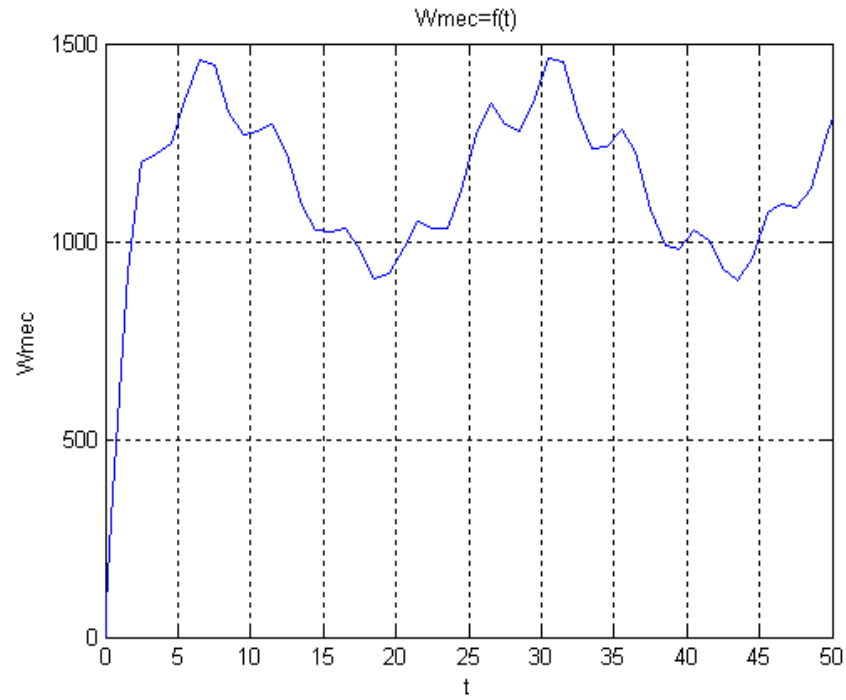


Figure 4.9 :Vitesse mécanique de la turbine

4.2.7.2 Vitesse du vent fixe

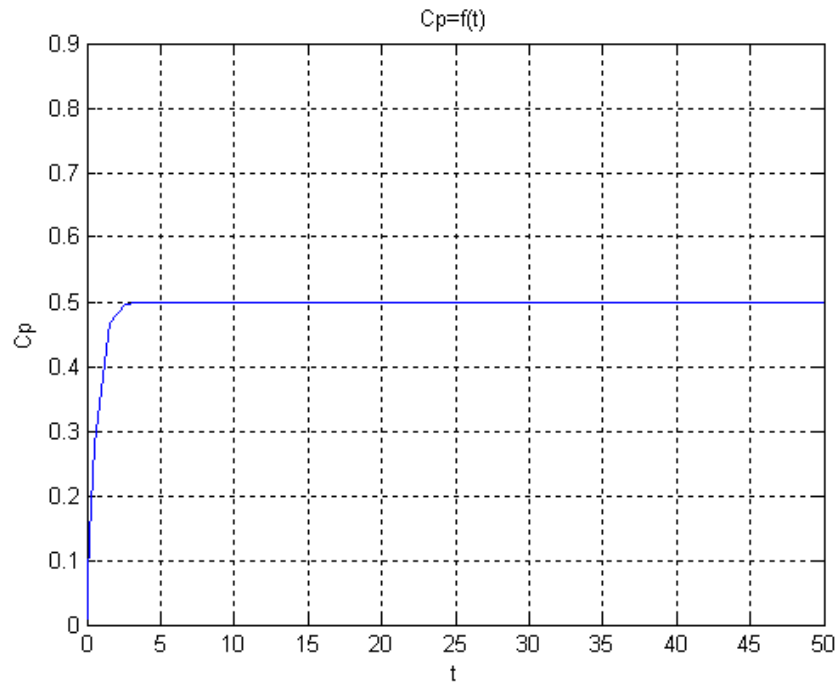


Figure 4.10 : Coefficient de puissance en fonction de temps

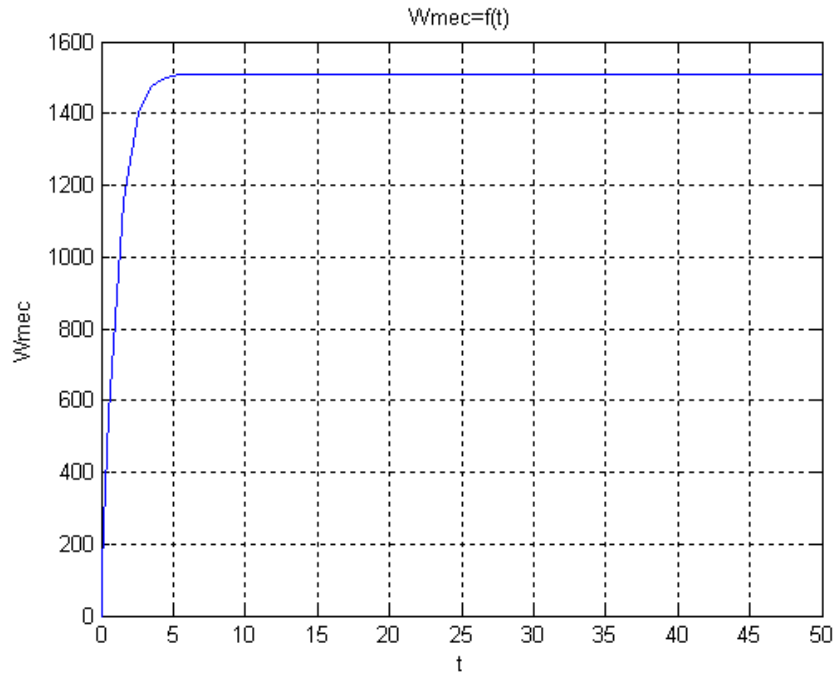


Figure 4.11: Vitesse mécanique de la turbine

4.3 Modélisation de la machine asynchrone

4.3.1 Représentation de la machine asynchrone

La machine asynchrone utilisée est triphasée au stator et au rotor (Figure 4.12). Les bobines statoriques sont réparties régulièrement à la périphérie de l'entrefer cylindrique. La machine est représentée par trois phases statoriques (**as**, **bs**, **cs**), et trois phases rotoriques (**ar**, **br**, **cr**) qui tournent à la vitesse

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (4.25)$$

$$\omega = P\Omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.26)$$

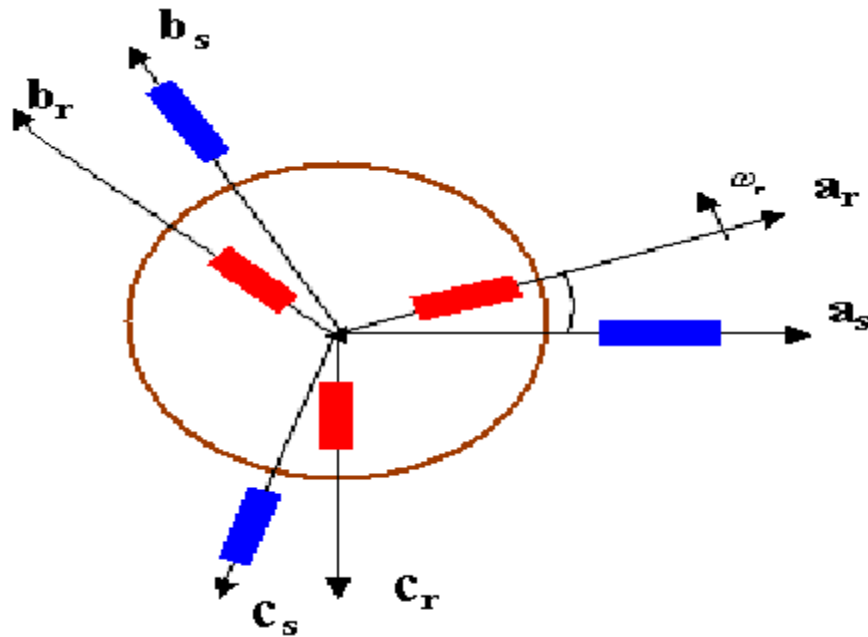


Figure 4.12: Représentation de la machine asynchrone triphasée

Le fonctionnement est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique. Cette interaction électromagnétique n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant diffère de celle du rotor.

4.3.2 Equations générales de la machine asynchrone

On écrit les équations par phase de la machine sous forme matricielle

$$\begin{cases} [V_s] = [r_s] * [i_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [0] = [r_r] * [i_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases}$$

Où les flux $s \Phi$ et $r \Phi$ s'expriment par

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] * [i_s] + [M_{sr}] * [i_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] * [i_r] + [M_{rs}] * [i_s] \end{cases}$$

avec $[V]$, $[i]$, $[\Phi]$, $[r]$: sont respectivement Les vecteurs des tensions, courants, flux et matrice des résistances.

s, r : désignent les grandeurs statoriques, rotoriques.

$$[i_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad [v_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix} \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[r_s] = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 \\ 0 & 0 & r_s \end{bmatrix} \quad [r_r] = \begin{bmatrix} r_r & 0 & 0 \\ 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

Les matrices $[L_{ss}]$ et $[L_{rr}]$ s'écrivent

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{aas} & L_{abs} & L_{acs} \\ L_{bas} & L_{bbs} & L_{bcs} \\ L_{cas} & L_{cbs} & L_{ccs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{aar} & L_{abr} & L_{acr} \\ L_{bar} & L_{bbr} & L_{bcr} \\ L_{car} & L_{cbr} & L_{ccr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

L_s, L_r : Inductance propre statorique, et rotorique.

L_s, L_r : Inductance mutuelle entre phases statoriques, et ou rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles stator - rotor est définie par :

$$[M_{sr}] = L_m \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

L : Maximum de l'inductance mutuelle stator-rotor

En introduisant les expressions des flux de (1-2) dans (1-1) nous obtenons le système

$$\begin{cases} [V_s] = [r_s] * [i_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}] * [i_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] * [i_r] \} \\ [V_r] = [v_r] * [i_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}] * [i_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] * [i_s] \} \end{cases}$$

La variation sinusoïdale des inductances mutuelles de la machine, suivant la position angulaire introduit les coefficients dépendants du temps dans le système différentiel régissant le fonctionnement dynamique de la machine, ce qui rend la formulation modèle très complexe.

Par un changement de variable adéquat, les coefficients intervenant dans le système différentiel deviennent indépendants du temps.

Les grandeurs tension, courant et flux, des deux armatures seront transformées dans un système de référence choisi selon l'application envisagée, [13].

4.3.3 Modèle diphasé équivalent de la machine

Après l'application de la transformation de Park, le système réel d'enroulement triphas est substitué par un système biphasé équivalent, disposé selon deux axes (d et q) tournant à une vitesse angulaire ω fixée (Figure 3.13).

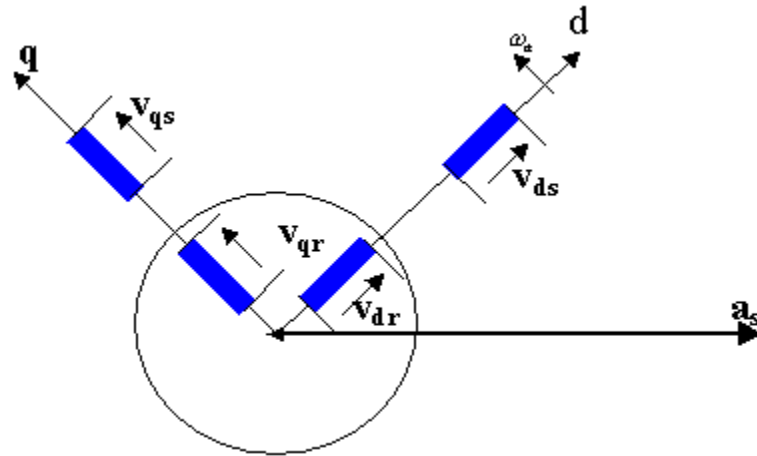


Figure 4.13: Modèle de la machine après la transformation de Park

D'après la théorie de Park, la matrice orthogonale de transformation ($[P(\theta)]$) est définie par :

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

avec θ l'angle entre les deux axes \mathbf{d} et \mathbf{a}_s .
Les grandeurs transformées sont données par :

$$[v_{dq_0}] = [P(\theta)] * [v_s] \quad [i_{dq_0}] = [P(\theta)] * [i]$$

$$\text{et } [\Phi_{dq_0}] = [P(\theta)] * [\Phi]$$

En multipliant les deux membres de (1-4) par $[P(\theta)]$, et après des simplifications, on obtient :

$$\begin{cases} [v_{ds}] = r_s * i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega * \Phi_{qs} \\ [v_{qs}] = r_s * i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega * \Phi_{ds} \end{cases}$$

D'une façon analogue on obtient le système suivant pour les grandeurs rotoriques.

L'expression des flux totaux prend la forme :

$$\begin{cases} [v_{dr}] = r_r * i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_a - \omega_r) * \Phi_{qr} \\ [v_{qr}] = r_r * i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_a - \omega_r) * \Phi_{dr} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = l_s * i_{ds} + M * i_{dr} \\ \Phi_{qs} = l_s * i_{qs} + M * i_{qr} \\ \Phi_{dr} = l_s * i_{qr} + M * i_{ds} \\ \Phi_{qr} = l_s * i_{dr} + M * i_{qs} \end{cases}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} l_s = L_s - M_s \\ l_r = L_r - M_s \\ M = \frac{2}{3} * L_m \end{cases}$$

l_s, l_r : L'inductance cyclique propre d'une phase du stator et du rotor respectivement

M : L'inductance mutuelle cyclique stator – rotor, [13].

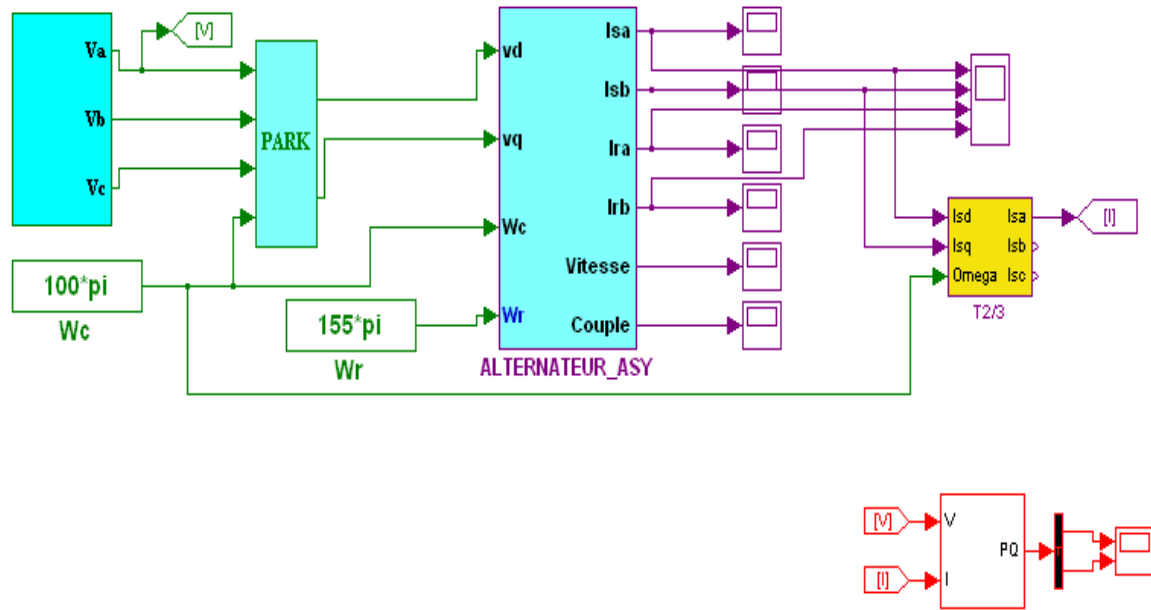


Figure 4.14: Schéma bloc de la Alternateur Asynchrone

4.3.4 Résultats de simulation

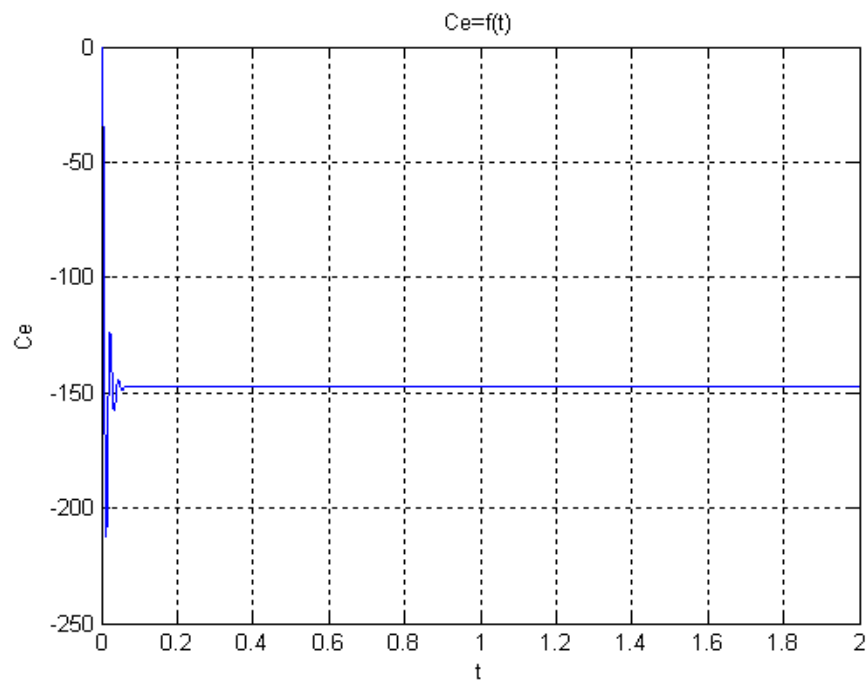


Figure 4.15: Le couple électrique

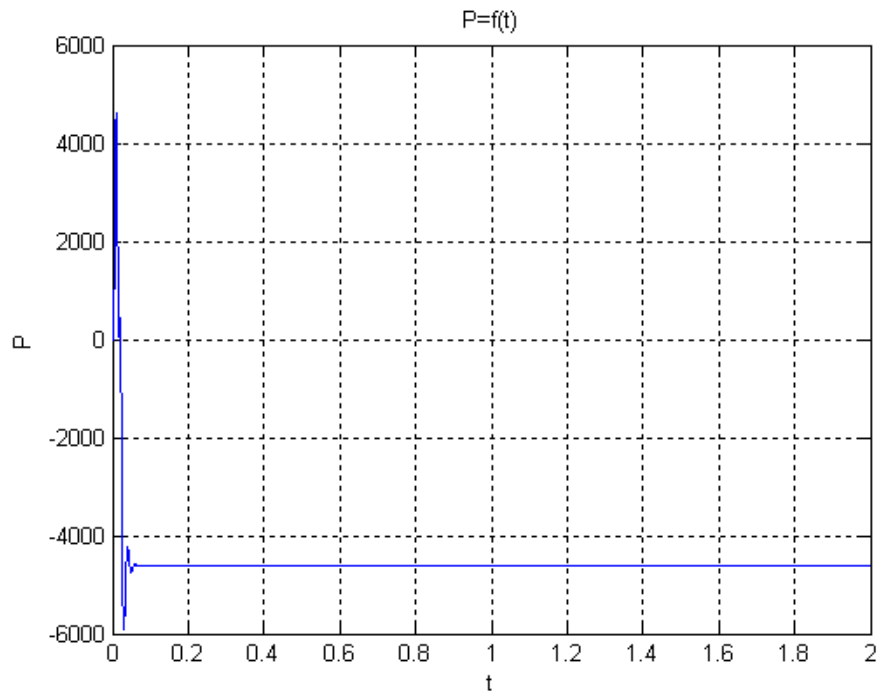


Figure 4.16 : La puissance active

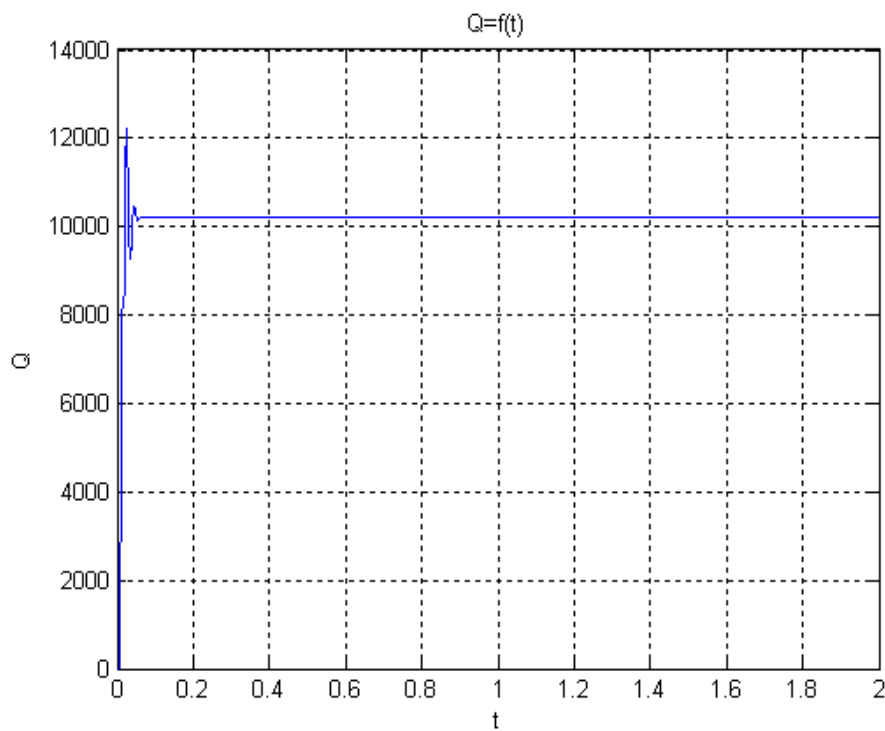


Figure 4.17 : La puissance réactive

4.4 Modélisation de la systèmes éolienne

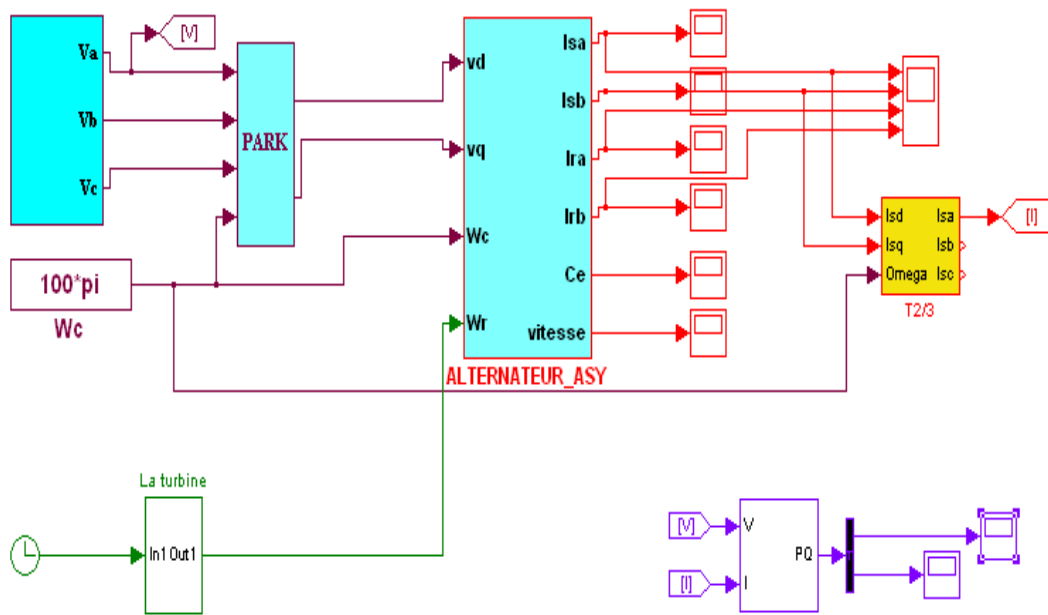


Figure 4.18: Schéma bloc de la système éolienne

4.4.1 Résultats de simulation

4.4.1 Vitesse du vent fixe

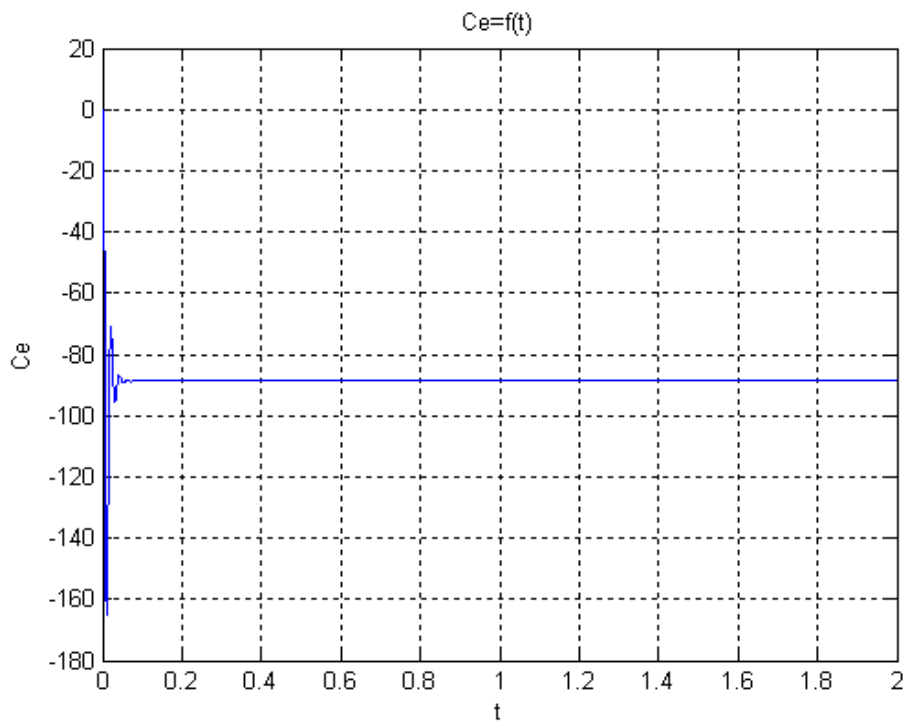


Figure 4.19: Le couple électrique

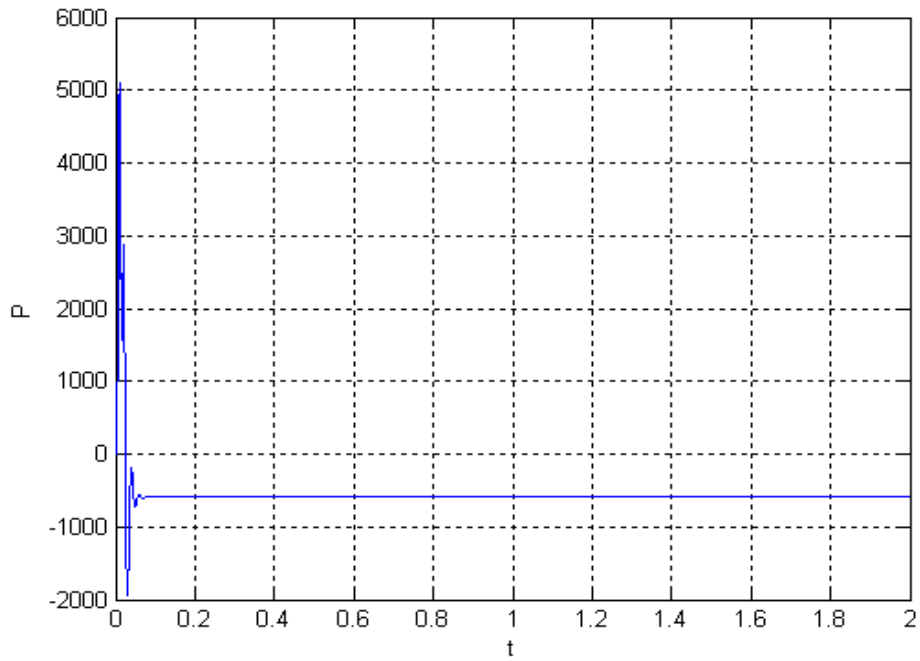


Figure 4.20: La puissance active

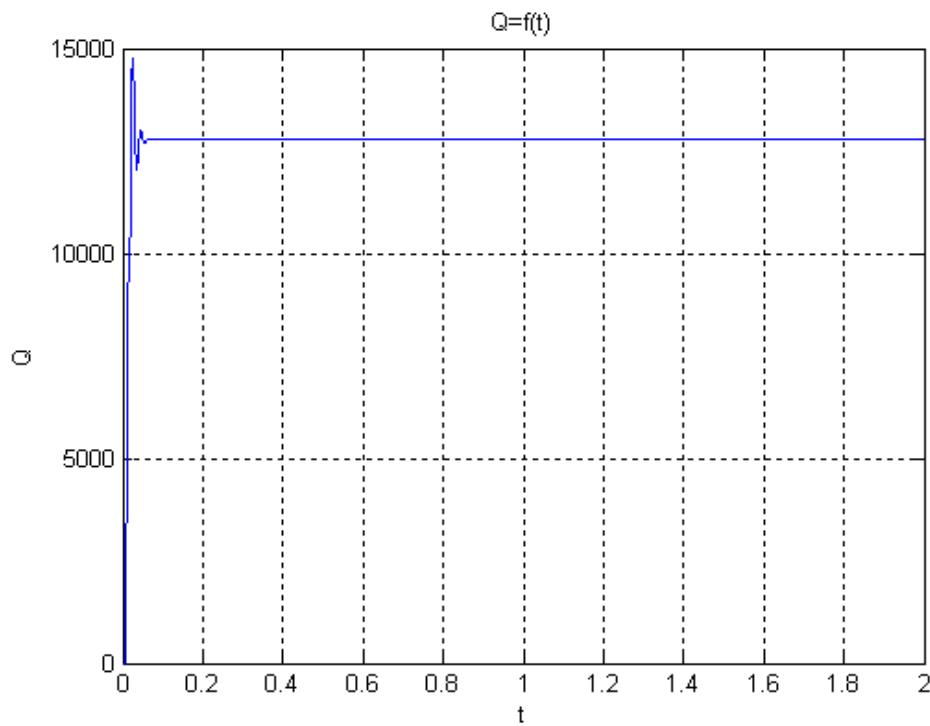


Figure 4.21 : La puissance réactive

4.4.2 vitesse du vent variable

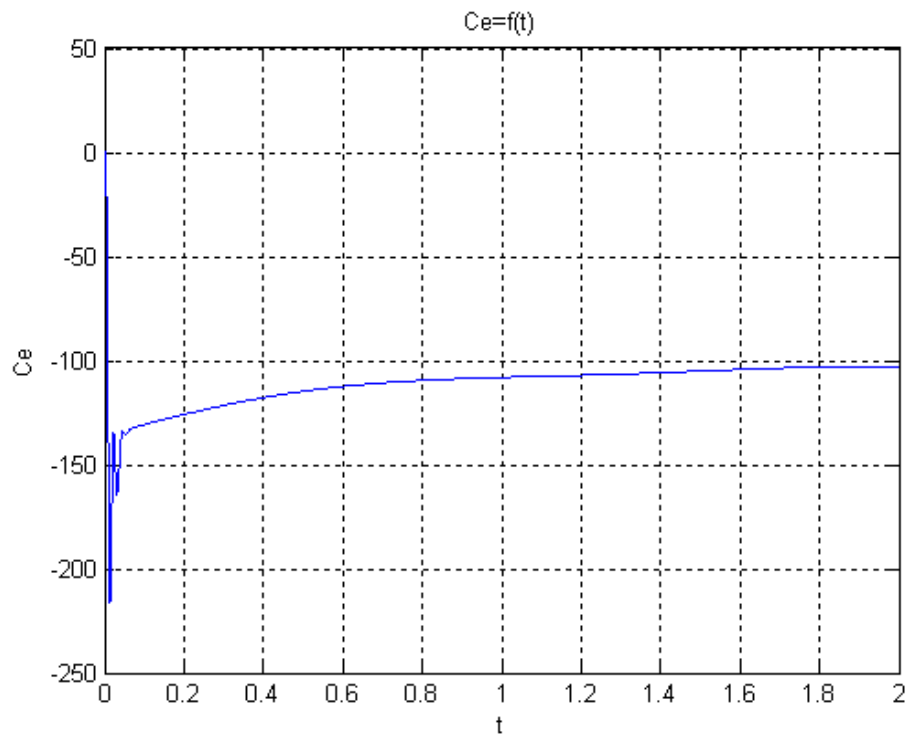


Figure 4.22: Le couple électrique

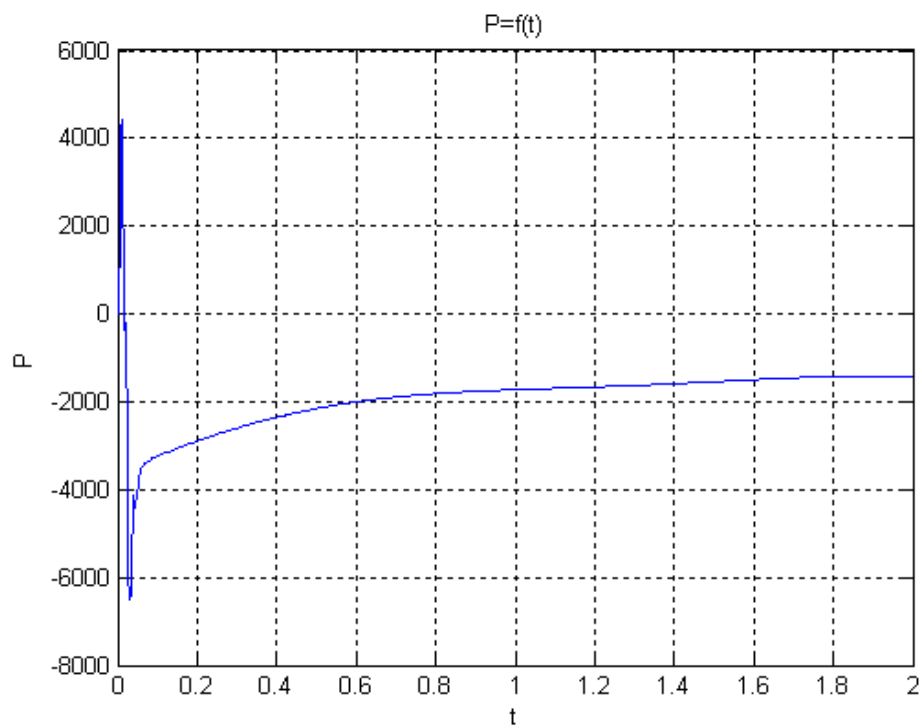


Figure 4.23 : La puissance active

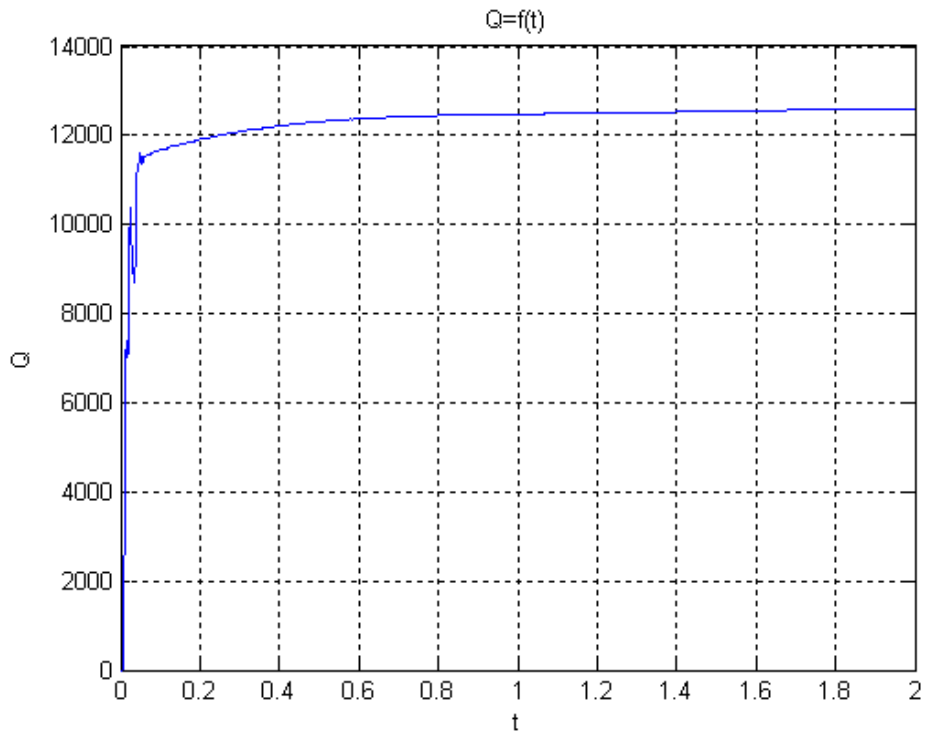


Figure 4.24 : La puissance réactive

4.5 Interprétation des résultats obtenus

La figure 4.7 présente la coefficient de puissance en fonction du temps.

La coefficient de puissance à un maximum la valeur de 0.5 atteint à l'instant $t=3S$.

A l'instant $t=5S$, la coefficient au régime permanent en couvrant une enveloppe de valeur de maximum de 0.5 et minimum de 0.48.

La figure 4.8 montre l'allure de vitesse du vent en fonction du temps.

Elle refuit un autre régime transitoire un maximum de 12.9 m/s à $t= 5.2 S$, et de valeur minimum de 7m/sà $t= 43 S$.

La figure 4.9 montre l'allure de la vitesse mécanique en fonction du temps.

Elle passe par son maximum de 1450rd/s à $t=6.5S$, elle prend une valeur minimum de 900rd/s à $t=18.5S$

La figure 4.10 D'écrit l'évolution de coefficient de puissance en fonction du temps.

En régime transitoire la coefficient de puissance peut atteindre un maximum de 0.5 à $t=2.5 S$, et se stabilise à $t=5S$ à une valeur 0.5

La figure 4.11 indique le développement de la vitesse mécanique en fonction du temps. Le régime transitoire est caractérisé par un pic dont celui a amplitude maximale de 1490 rd/s à $t=3S$.

A l'instant $t=5S$, la vitesse passe en régime permanent avec valeur de 1500 rd/s.

La figure 4.15 montre la variation du couple électrique en fonction du temps.

Elle -149 point compris entre 0S et 0.95S.

A $t=0.01S$ elle passe par maximum de -35N.M puis par minimum de -215N.M à $t=0.7S$.

Après le régime transitoire le couple électrique passe un régime permanent à $t=0.03S$ avec une valeur de -149N.M.

La figure 4.16 montre la variation de puissance active en fonction du temps.

Cette courbe est caractérisée par un maximum de valeur 4350W à $t=0.012S$, et un valeur minimum de -5999W à $t=0.025S$.

Et le régime permanent la puissance active prend une valeur -4500W.

Figure 4.17 montre le développement, de puissance réactive en fonction du temps.

Le régime transitoire dure le 0.05 premières secondes, il caractérisé par deux valeurs une valeur maximale de 12100VAR à $t=0.02S$ et une minimale de 9000VAR à $t=0.05s$

La puissance réactive se stabilisé à l'instant $t=0.07S$, à une valeur de 10100VAR.

Figure 4.19 montre l'allure de le couple électrique en fonction du temps.

Elle passe par un son maximum de -57N.M à $t=0.01S$, et prend sa valeur constant de -87N.M des l'instant $t=0.05S$

Figure 4.20 montre la forme de puissance active en fonction du temps.

La puissance active prend une valeur 5100W à $t=0.05S$ elle prend une valeur fixe de -500W à l'instant $t=0.1S$

Figure 4.21 montre le développement de la puissance réactive en fonction du temps.

Cette courbe est caractérisée par maximum de 14950VAR à $t=0.05S$ et un minimum valeur 1200VAR à $t=0.08S$

Figure 4.22 présente la forme de couple électrique en fonction du temps.

La valeur maximale que peut atteindre le couple électrique est de -20N.M à $t=0.01S$, et une valeur minimale de -215N.M à $t=0.02S$, elle converge et prend une valeur de -101 à $t=2S$.

Figure 4.23 présente la forme de la puissance active en fonction du temps.

La valeur maximale qui peut atteindre la puissance active est de 4600W à $t=0.01S$, et la valeur minimale de -6700W à $t=0.04S$, cette converge et prend une valeur de -1500W à $t=2S$.

Figure 4.24 présente la forme de la puissance réactive en fonction du temps.

La valeur maximale qui peut atteindre la puissance réactive est 10400VAR à $t=0.03S$, et le valeur minimale de 8900VAR à $t=0.05S$, elle converge est prend une valeur de 12500VAR à $t=2S$.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

L'autre partie du chapitre présente les machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien.

Afin, nous allons étudier le fonctionnement d'une chaîne de conversion éolienne, relié au réseau, et basée sur génératrice asynchrone à cage.