REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Electrotechnique
Spécialité :Energie Renouvelable

Commande d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aiment permanent

Présentés par :

LAIDANI Mourad

SEGHIER AISSA Ahmed

Proposés et Dirigés par :

Dr. MOUALDIA Abdelhafid

Promotion 2022

Remerciements

Tout d'abord, Nous tient à remercier DIEU le Miséricordieux de nos avoir donné la possibilité de Réaliser Notre projet, d'arriver à notre souhaits et d'atteindre Notre Objectifs.

Nous aimerons dans ces quelques lignes remercier toutes Les Personnes qui d'une manière ou d'une autre, ont Contribué Au bon déroulement de notre travail, tout au niveau Humain qu'au niveau scientifique.

Nous tenons tout d'abord à remercier notre encadreur MONSIEUR, Dr MOUALDIA Abd el hafid, on a pu Bénéficier à la Fois de ses compétences scientifiques, et de sa grande Disponibilité, tant pour résoudre les difficultés Lors de notre réalisation, de répondre à nos questions.

Nous Ajoutons en particulière sa patience et ses Encouragements,

Nous a permis de travailler dans bonnes conditions.

Nos remerciements s'adressent également à tous Membres De Jury, qui ont accepté de nous honorer de leur Présence et Nos remerciements les plus chaleureux vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin à Notre soutien moral.

Dédicaces

Je dédie cet événement marquent de ma vie à la mémoire de mon père pour le gout à l'effort qu'il suscite en moi ; de par sa rigueur qui était en lui . A sa mémoire qui a disparu trop tôt

Je dédie cet événement marquent de ma vie.

. Pour

Le salut de son âme. puisse Dieu le tout puissant l'avoir en sa sainte miséricorde.

-A ma maman et ma femme qui m'ont soutenu Qu'elles trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

-A mes enfants qui m'ont soutenu et encouragé durant ces années d'études.

- A mon encadreur Monsieur moualdia pour son amabilité et sa disponibilité.

- A tous les enseignants qui m'ont aidé de prés ou de loin.

-A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

-A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

-A tous ceux que j'aime

-A tous ceux –qui ont participe à ma réussite.

A mon binôme seghier aissa ahmed pour tous les souvenirs pendant les années d'études ensemble surtout logistiquement les deux dernières années

-A MR bettache qui ma beaucoup soutenu.-A tous

-A tous ceux –qui ont participe à ma reussite.

A mon binôme SEGHIER AISSA ahmed

pour tous les souvenirs pendant les années d'études ensemble

laidani mourad

Dédicaces

Je dédie cet événement marquent de ma vie à la mémoire de mon grand père nadir pour le gout à l'effort qu'il suscite en moi ; de par sa rigueur , a toi ma grand-mère zoulikha ; ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour que ce mémoire soit le meilleur cadeau que je puisse l'offrir.

-A ma maman qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

-A la mémoire de mon père qui a disparu trop tôt. Pour
Le salut de son âme .puisse Dieu le tôt puissant l'avoir en sa sainte miséricorde.

-A mes trois sœurs qui m'avez toujours soutenu et encouragé,

-A Ma femme et mes enfants qui mont soutenu et encouragé durant ces années d'études

-A mon en cadreur Monsieur moualdia pour son amabilité et sa disponibilité.

- A tous les enseignants qui m'ont aidé de prés ou de loin à obtenir mon master en électrotechnique.

-A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité.

-A MR TOUATI KARIM qui ma beaucoup soutenu.-A tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.-A tous ceux que j'aime

-A tous ceux –qui ont participe à ma reussite.

A mon binôme LAIDANI mourad pour tous les souvenirs pendant les années d'études ensemble surtout les deux dernières années

SEGHIER AISSA ahmed

Liste des Abréviations	
CCM	Convertisseur Coté Machine.
VAWT	Les éoliennes à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbines).
HAWT	Les éoliennes à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbines).
GSAP	Machine Asynchrone.
MLI	Générateur Synchrone à Aimants Permanents. Modulation de Largeur d'Impulsion
Liste des Symboles	
Ωs	La vitesse de synchronisme (rad/s).
Cem	Le couple électromagnétique (Nm).
ω	La pulsation du réseau (rad/s).
P	Nombre de paires de pôles.
ρ	La densité de l'air (Kg/m3).
S	La surface circulaire balayée par la turbine (m2), S = Π. R2.
V	La vitesse du vent (m/s).
Cp	Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.
R	Rayon de la pale (m).
Ω méc	La vitesse mécanique (rad/s).
Ω turbine	Vitesse angulaire de la turbine (rad/s).
λ	Ratio de vitesse.
β	Angle d'orientation des pales (degré).
Caer	Le couple aérodynamique (Nm).
[P(Θ)]	La matrice de Park.
Θ	L'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé (rad).
Paer	La puissance aérodynamique de la turbine (w).
Va ,Vb , Vc ,	Tension de la génératrice (v).
Ia ,Ib , Ic	Courant de la génératrice (A).

φa ,φb , φ c	Flux aux phases a, b et c (Web).
Rs	Résistance de chaque enroulement du stator (Ω).
φf	Flux des aimants permanents (Web).
Vd	Tension selon l'axe d (V).
Vq	Tension selon l'axe q (V).
Id	Courant selon l'axe d (A).
Iq	Courant selon l'axe q (A).
φd ,	Flux selon l'axe d (Web).
φq	Flux selon l'axe q (Web).
ω	Vitesse de
Ld	Inductance statorique selon l'axe d (H).
We	Energie emmagasinée dans le circuit magnétique (J).
θge	Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).
Cm	Le couple moteur appliqué sur la génératrice (Nm).
f	Coefficient de frottement visqueux (Nm/rad.s).
Rch	Résistance de charge (Ω).
S	Opérateur dérive de Laplace.
Isd ,Isq	Composant direct du stator dans le repère Park.
Van ,Vbn ,Vcn	Les tensions à l'entrée du convertisseur (V).
Iα ,Iβ	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β).
Vα ,Vβ	Les composantes du vecteur courant de ligne dans le repère stationnaire (α, β).
C	Capacité côté continue (F).
Rch	Résistance de la charge (Ω).
Sa , Sb , Sc,	Etats de commutation du redresseur.
Vdc	Tension redresse (V).
Idc	Courant du bus continu (A).
Pref	La puissance active de référence (w).
qref	La puissance réactive de référence (VAR).

p	Différences da la puissance active (w).
q	Différences da la puissance réactive (VAR).
HP	Bande d'hystérésis pour la puissance active.
Hq	Bande d'hystérésis pour la puissance réactive.
$\hat{p}$	Puissance active instantanée (W).
$\hat{q}$	Puissance réactive instantanée (VAR).

Liste de figures

Figure I- 1 Carte du gisement éolien en Algérie (CDER) **3**
Figure I- 3 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [06] [10] **5**
Figure I- 4 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) [06] [10]. **6**
Figure I- 5 Eoliennes tripales et multi-pales [11]. **6**
Figure I- 6 Configurations à axe horizontal [11]. **7**
Figure I- 7 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ **8**
Et de l'angle de pas des Pales [08] [09]. **8**
Figure I- 8 Composition d'une éolienne **9**
Figure I- 9 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne [13]. **10**
Figure I- 10 machine Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne [6] [13]. **11**
Figure I- 11 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [08]. **12**
Figure I- 12 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [08]. **13**
Figure I- 13 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants[15]. **14**
Forme de la f.é.m b) Variation de l'inductance cycliqueFigure I- 14 f.é.m et inductance cyclique d'une MSRB[15]. **15**
Figure I- 15 Différents types de rotors d'une MSAP [17]. **16**
Figure I- 16 Principe de fonctionnement de la machine à aimants permanents. **17**
Figure I- 17 MSAP classique et discoïde [11] [19]. **18**
Figure I- 18 MSAP à rotor discoïde et double stator [11] [20]. **18**
Figure I- 19 MSAP discoïde avec stator et double rotor [11][21]. **19**
Figure I- 20 MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor [11] [20][21]. **19**
Figure I- 21 MSAP à rotor extérieur [11] [18]. **20**
Figure I- 22 Système éolien basé sur une msap a fréquence variable [07]. **21**
Figure I- 23 Machine synchrone avec redresseur à diodes [07]. **22**
Figure I- 24 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur [07] **22**
Figure I- 25 Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont [07] **23**
Figure I- 26 Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI [07]. **23**
Figure II- 1 Entrées – sorties du modèle [27] **26**
Figure II- 2 colonne d'air animée d'une vitesse *v* [11]. **27**
Figure II- 3 théorie de Betz : schéma de principe [11]. **28**
Figure II- 4 Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aubage (Ωt Rt) [11] **29**
Figure II.5-schema bloc d'une turbine éolienne **32**
Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la (Fig.II.6). **33**
Figure II-7 la modélisation mécanique de la turbine **35**
Figure II.8-profil du vent **36**

Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure II.8 [06]..... 37
Figure II- 9 Schéma bloc du modèle des pales [06]..... 37
Figure II-9 Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse [6]..... 38
Figure II- 10 Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation [11]... 39
Figure II- 11 Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse[34..... 40
Figure II- 12 Schéma bloc d'un régulateur IP [34]..... 41
Figure.II.13: Schéma bloc de la Tourbine. 42
Figure.II.14: SCHEMA BLOCMPPT TURBINE 42
Figure II-15 : Résultats de simulation pour La puissance totale..... 43
Figure II-16 : Résultats de simulation le coefficient de puissance 43
Figure II-17 : Résultats de simulation pour lamda..... 44
Figure II-18 : Résultats de simulation pour la puissance turbine..... 44
Figure II-19: Résultats de simulation pour la puissance turbine/puissance mécanique..... 44
Figure II-20 : Résultats de simulation pour un profil de vent steep attinuer a t=15s 45
Figure III-1: Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents [29]..... 47
Figure III-2 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q). 51
Figure III.3 Schéma bloc d'une GSAP..... 53
Figure III.4 : Résultats de simulation pour la tension du stator 53
Figure III-5 : Résultats de simulation pour variation de la vitesse du rotore 54
Figure III-6 : Résultats de simulation pour le courant du stator 54
Figure III-7 : Résultats de simulation pour $Vabc$ et $Iabc$..... 54
Figure. III.8 : l'allure de tension V..... 55
Figure. III.09 : schéma de la commande DTC applique a la GSAP..... 56
FigIII.10 : Profil du vent et la vitesse de rotation avec sa référence 57
Fig.III.11. Couple électromagnétique et le flux du stator 57
Fig.III.12. Flux statorique dans le plan (α,β) 58

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE I

CHAPITRE I : Eolienne et Equipements de conversion de l'énergie 1

I-1 Introduction 2

I-2 L'énergie éolienne 2

I-2-1 Principe et théorie d'une éolienne 3

I-2-2 Différents types des turbines éoliennes 5

I-2-2-a Eolienne à axe verticale 5

a/Aérogénérateurs à rotor de Darrieus 5

b/Aérogénérateurs à rotor de Savonius 6

I-2-2-b Eolienne à axe horizontal 6

I-3 Eléments constitutifs d'une éolienne 9

I-4 Modes de fonctionnement des éoliennes 10

I.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique 10

I-5 Les éoliennes à vitesse fixe [13] 11

I.6. Les éoliennes à vitesse variable 12

I .7.Aérogénérateur synchrone 14

I.7. 1 Machine synchrone à rotor bobiné 14

Principe de fonctionnement de la MSAP [17]: 17

I.7.2.a Machine synchrone à aimants permanents à flux axial [11] 17

I .7.2.b Types de machines synchrones à aimants permanents à flux axial 18

A/ MSAP discoïde avec deux stators et un rotor [11] 18

B/ MSAP discoïde avec deux rotors et un stator [11] 19

C/MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor [11] 19

D/ MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté stator [11] 20

E/ Machine synchrone à aimants permanents à rotor extérieur [11] 20

I.8. Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) 21

I.8.1. Connecté au réseau électrique 21

I.8.2 Les éoliennes à base de la génératrice synchrone à aimant permanant en fonctionnement isolé et autonome [07] 21

A/Structure avec redresseur à diodes[07] 22

B/Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur [07] 22

C/ Structure avec redresseur à MLI [07] 23

I.9 Avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines [17]. 24

Conclusion 24

CHAPITRE II : Modélisation des éléments de la chaine éolienne 25

II-1 Introduction 26

II-2 La turbine éolienne 26

II-2-1 Conversion de l'énergie éolienne 26

a/Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique 26

b/Loi de Betz 27
d/ Coefficient de couple....30
II.3 Conversion de l'énergie éolienne : 31
II.3.1. Equation dynamique de l'arbre : 33
II-4-1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine....34
II.5 Modélisation de la turbine 35
A/profil du vent: 35
B/ Modèle de la turbine 37
C/ Modèle des pales....37
D / Modèle du multiplicateur de vitesse 37
II-6 Système de contrôle de l'aéroturbine....38
II-6-1 Méthodes de recherche du point maximum de puissance 38
II.6.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse....39
Résultats de simulation....43
CHAPITRE III : Commande DTC 46
III-1 La génératrice synchrone à aimants permanents 47
III-2 Mise en équation de la MSAP en triphasée....47
III-2-1 Equations électriques 47
III-2-2 Equations magnétiques 48
III-3 Transformation triphasé – diphasé 49
III-3-1 Transformation de Concordia 49
III-3-2 Transformation de Park....50
III-4 Modélisation de moteur synchrone à aimant permanent dans le plan dePark....51
III-4-1 Équations électriques 52
III-4-2 Équations magnétiques 52
III-5 Couple électromagnétique de la MSAP....52
III-5-1 Équations du mouvement....52
III-6 Simulation GSAP SUR MATLAB 53
III-7 Conclusion....60
Bibliographie 61
Bibliographie 62

Résumé :

Dans ce travail nous avons étudié, la modélisation et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents.

Le plan de travail constitué de trois parties organisées comme suit :

Dans la première partie, nous avons étudié le système de conversion d'énergie éolienne. Dans la deuxième partie, on a présenté la modélisation des éléments de la chaine éolienne. Dans la troisième partie, on a fait la modélisation de la GSAP et la Commande DTC. Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Mots clés : Système éolien, conversion d'énergie, Turbine, GSAP, DTC

ملخص:

درسنا في هذا العمل النمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح على أساس آلة متزامنة مع المغناطيس الدائم.

تتكون خطة العمل من ثلاثة أجزاء منظمة على النحو التالي:

درسنا في :

الجزء الأول نظام تحويل طاقة الرياح.

في الجزء الثاني ، قدمنا نمذجة عناصر سلسلة الرياح.

في الجزء الثالث ، قمنا بعمل نمذجة GSAP والأمر DTC. ننهي هذا العمل باستنتاج عام.

الكلمات المفتاحية: نظام الرياح ، تحويل الطاقة ، التوربينات ، GSAP، DTC.

Abstract:

In this work we have studied the modeling and control of a wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous machine.

The work plan consists of three parts organized as follows:

In the first part, we studied the wind energy conversion system. In the second part, we presented the modeling of the elements of the wind chain. In the third part, we made the modeling of the GSAP and the DTC command. We end this work with a general conclusion.

Keywords: Wind system, energy conversion, Turbine, GSAP, DTC

INTRODUCTION GENERALE

La demande mondiale en énergie électrique, sans cesse croissante, a contraint certains pays développés à combler leur déficit énergétique par l'utilisation des centrales nucléaires. L'énergie nucléaire a l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique, mais le risque d'accident, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels

Par ailleurs, L'énergie, Un vrai sujet d'actualité que l'univers n'a connue depuis longtemps. Il est clair que notre dépendance aux énergies fossiles ne peut continuer indéfiniment, surtout avec l'épuisement croissant des gisements des ressources énergétiques traditionnelles. Ces dernières, principalement d'origine fossiles contribuent à la détérioration continue de l'environnement et l'écosystème mondial.

Devant ce dilemme, il s'avère nécessaire de faire appel à d'autres sources d'énergie non polluantes et sans danger pour l'homme et l'environnement. Ainsi, dans le souci de se prémunir des problèmes environnementaux, dus aux énergies fossiles, tout en s'assurant un approvisionnement continu en énergie, les gouvernements de la majorité des pays du monde se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergie renouvelables : le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, la marémotrice…etc.

Actuellement, l'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolés que comme appoint pour les réseaux connectés. Elle peut être une alternative compétitive contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité. Le développement et la multiplication de l'utilisation de chaines de conversion de l'énergie éolienne ont conduit les industriels et les scientifiques à s'investir dans l'amélioration des indices technico- économiques de cette conversion et la qualité de l'énergie fournie.

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de systèmes de commande d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) à vitesse variable. Ce choix est justifié par l'intérêt que portent les chercheurs et les industriels à ce type de structures d'éoliennes. En effet, le développement actuel dans le domaine des

Matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation des génératrices synchrones à aimant permanent et à moindre coût pour la construction de grandes et puissantes éoliennes.

Pour ce faire, l'étude en détails d'une chaine de conversion de l'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent est effectuée pour les cas d'un réseau autonome (site isolé) et connectée au réseau électrique. Le fonctionnement en générateur autonome se distingue par ses contraintes et ses spécificités qui sont autres que celles rencontrées dans le cas

des centrales éoliennes connectées au réseau de distribution électrique. En effet, la préoccupation principale de ce type de fonctionnement est le maintien de l'amplitude et la fréquence de la tension générée à des valeurs constantes, quelles que soient la vitesse de rotation de l'éolienne et la puissance demandée.

Dans le but d'approfondir chacun des points mentionnés ci-dessus, le mémoire est organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de Eolienne et Equipements de conversion de l'énergie sur les chaines de conversion de l'énergie éolienne. Il y est décrit les différentes architectures adoptées dans les systèmes éoliens connectés au réseau électrique et isolés ou autonomes. L'intérêt de l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent dans la chaine de conversion de l'énergie éolienne est abordé minutieusement.

Le second chapitre est dédié à l'étude de Modélisation des éléments de la chaine éolienne. Un modèle mathématique du profil du vent, source principale d'énergie, est identifié et choisi pour l'entrainement de la turbine de la chaine. Le modèle mathématique la turbine éolienne doit permettre son contrôle de sorte à ce que son coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent. Ce contrôle se fait à l'aide de deux types de régulateurs : un régulateur proportionnelle intégrale PI puis un régulateur intégrale proportionnelle IP, les deux méthodes de réglage seront respectivement utilisées pour les chaines de conversion isolé et connecté au réseau électrique. Afin de valider le modèle choisi, le principe de la commande vectorielle appliquée à la génératrice est étudié et présenté finement.

Le troisième chapitre sera dédié à l'étude de Commande DTC Différentes techniques de commande, agissant sur l'interface de l'électronique de puissance, sont appliquées. Des résultats de simulation ont été présentés et interprétées.

Pour valider L'efficacité des stratégies de contrôle adoptées a été validée par les résultats obtenus des simulations effectuées.

Enfin, une synthèse des travaux réalisés et des perspectives de recherche concluront cette mémoire

CHAPITRE I :

Eolienne et Equipements de conversion de l’énergie

I-1 Introduction

Les ressources énergétiques fossiles proviennent de la combustion des matières premières comme le pétrole, le gaz et le charbon. Ces dernières sont polluantes, leurs réserves déclinantes et malheureusement non renouvelables. Par ailleurs, il existe une forte opposition politique contre le renforcement de l'énergie nucléaire dans de nombreuses parties du monde. Pour répondre à une demande mondiale continuellement croissante de l'énergie, les industriels s'investissent de plus en plus dans les énergies renouvelables [1].

Le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ce qui se traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien [02].

Dans ce présent chapitre, les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants de l'aérogénérateur sont présentés. Les différents types, les stratégies de fonctionnement (vitesse fixe, vitesse variable) et les différentes topologies utilisées pour la conversion éolienne sont abordées. Vu ses avantages incontestés pour la conversion éolienne, la machine synchrone à aimant permanent est particulièrement étudiée en détail dans ce chapitre.

I-2 L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [03] [04] L'électricité produite par le vent à travers le monde a atteint, à la fin de 2004, 48 GW, représentant 0,57% de l'offre mondiale d'électricité totale. Le chiffre peut ne pas sembler impressionnant, mais par rapport à d'autres technologies d'énergie renouvelable, il devient clair que l'énergie éolienne est la plus prometteuse. A titre d'exemple l'énergie électrique produite par conversion éolienne reste minime sur le marché européen, soit 2,4% de sa production totale d'électricité. Dans sa nouvelle politique énergique, l'Union européenne a décidé pour rendre l'énergie éolienne, une source de production majeure d'électricité, avec unepart de marché de 12% en 2020 et 20% en 2030[05].

L'Algérie compte s'investir dans le domaine de la production électrique par conversion éolienne pour atteindre 3% de la production nationale à l'horizon 2027. Dans ce cadre, le groupe Sonelgaz a confié la réalisation d'une première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW,

au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar [06]

Le potentiel éolien en Algérie est très diversifié. La carte de la figure I.1 publiée par le Centre de développement des énergies renouvelables (CDER) montre que le sud du pays et particulièrement le sud-ouest sont caractérisés par des vitesses qui varie entre 4 m/s et 6 m/s, tandis que les sites côtiers d'Oran, de Bejaïa et d'Annaba, les hauts plateaux des régions de Tiaret et El Kheiter et la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud, sont prometteurs en termes de production si la hauteur des éoliennes est bien choisie.

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour l'installation des parcs éoliens pour alimenter certaines régions isolées et leur permettre, grâce à l'énergie éolienne d'avoir une autonomie énergétique.

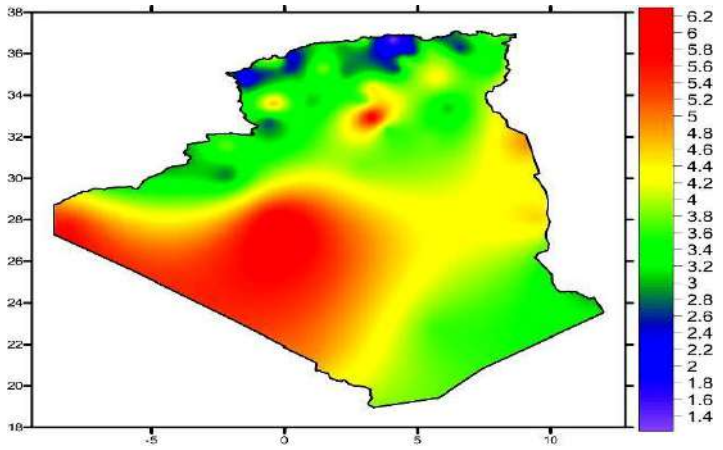


Figure I- 1 Carte du gisement éolien en Algérie (CDER)

I-2-1 Principe et théorie d'une éolienne

Un aérogénérateur, couramment appelé «éolienne», est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique. D'une manière générale, une chaine de conversion éolienne est constituée d'une turbine (T), d'un multiplicateur de vitesse (M), d'une génératrice électrique (GE), généralement triphasée, et d'un circuit d'électronique de puissance (EP). Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome. Le schéma synoptique est représenté par la figure I.2 [07]

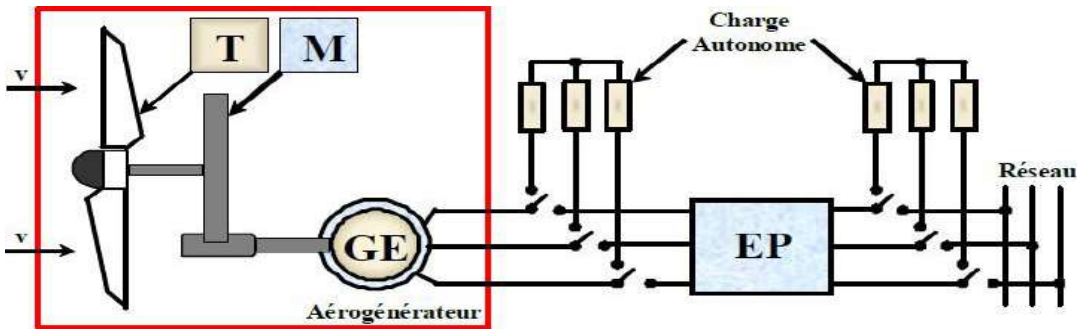


Figure I- 2 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [07].

La puissance aérodynamique capturée par une turbine s'exprime par [08] :

$$Paero = \frac{1}{2}\rho CpV3 \qquad (I.1)$$

Où

- C_p est le coefficient de puissance aérodynamique,
- ρ la masse volumique de l'air (environ 1,2 kg/m^3),
- S la surface active de l'éolienne et V_v la vitesse du vent.Le coefficient Cp ne peut théoriquement pas dépasser la limite dite de Betz [08] [09]:

$$Cp_{limite} = 0.59 \qquad (I.2)$$

Une turbine est typiquement caractérisée par sa courbe Cp = f(λ)Avec :

$$\lambda = \frac{R.\Omega}{V_v} \qquad (I.3)$$

- Ω est la vitesse angulaire de rotation,
- λ est le rapport de la vitesse (linéaire) périphérique en bout de pale sur la composantenormale de la vitesse du vent.

Les turbines sont généralement placées face au vent (par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel). V_v est la vitesse du vent supposée constante (hors turbulences) [08].

I-2-2 Différents types des turbines éoliennes

Les éoliennes se divisent en général en deux grands groupes selon l'axe sur lequel est montée à l'hélice

- Eolienne à axe verticale
- Eolienne à axe horizontal.

I-2-2-a Eolienne à axe verticale

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour, mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation. Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924) [06].

a/Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil (Fig. I.3). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

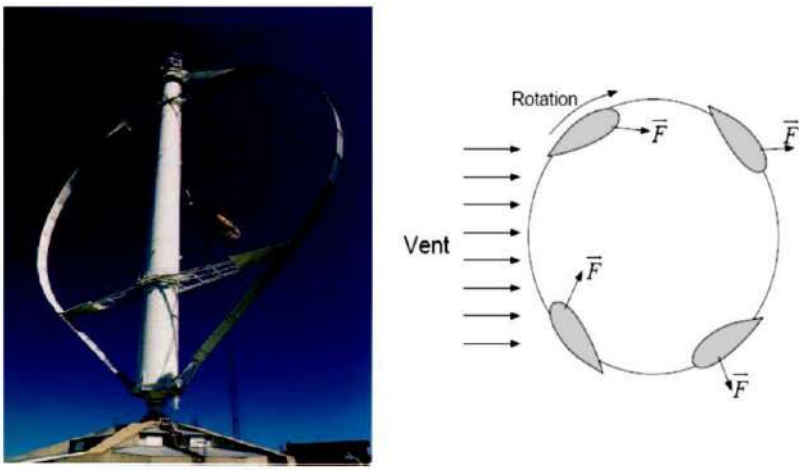


Figure I- 3 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) [06] [10]

b/Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (Figure I.4).



Figure I- 4 Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) [06] [10].

Avantages [07]

- Faible encombrement,
- Démarre à de faibles vitesses de vent contrairement à l'éolienne de type Darrieus,
- Système peu bruyant,
- Pas de contraintes sur la direction du vent.

Inconvénients [07]

- Faible rendement,
- Masse non négligeable.

I-2-2-b Eolienne à axe horizontal

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal [11]. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pâles (Figure I-5).



Figure I- 5 Eoliennes tripales et multi-pales [11].

La voilure peut être placée avant la nacelle (Eolienne « amont ») et alors un système mécanique d'orientation de la surface active de l'éolienne « face au vent » est nécessaire. Une autre solution qui permet d'alléger la construction par la suppression de toute dispositif mécanique

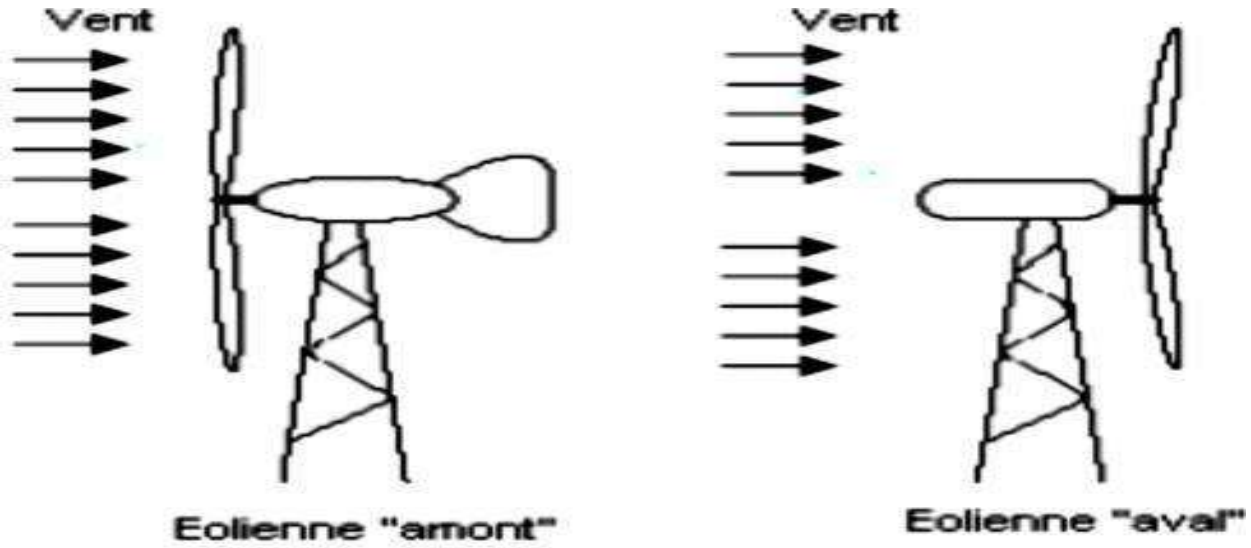


Figure I- 6 Configurations à axe horizontal [11].

D'orientation est l'emplacement de la turbine derrière la nacelle (Eolienne « aval »). Dans ce cas la turbine se place automatiquement face au vent. Les éoliennes de ce type sont assez rares car des vibrations importantes sont à noter qui sont dues au passage des pales derrière le mat. La figure (1-6) montre les deux procédés [11].

Sur le plan aérodynamique, les différents types de turbines peuvent être comparés selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée λ [08].

Il est à noter que :

Les courbes $C_p(\lambda)$ montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en terme de puissance, même si ce jugement est à nuancer lorsqu'on observe l'énergie restituée, en particulier en sites peu ventés (zones urbaines,) ;

Les courbes $C_p(\lambda)$ sont plus plates pour les « axes horizontaux » à faible nombre de pales (1, 2,3) (Figure I-7) par rapport aux « axes verticaux » ou aux multipales.

Elles sont donc moins sensibles aux variations de λ autour de λ opt [08].

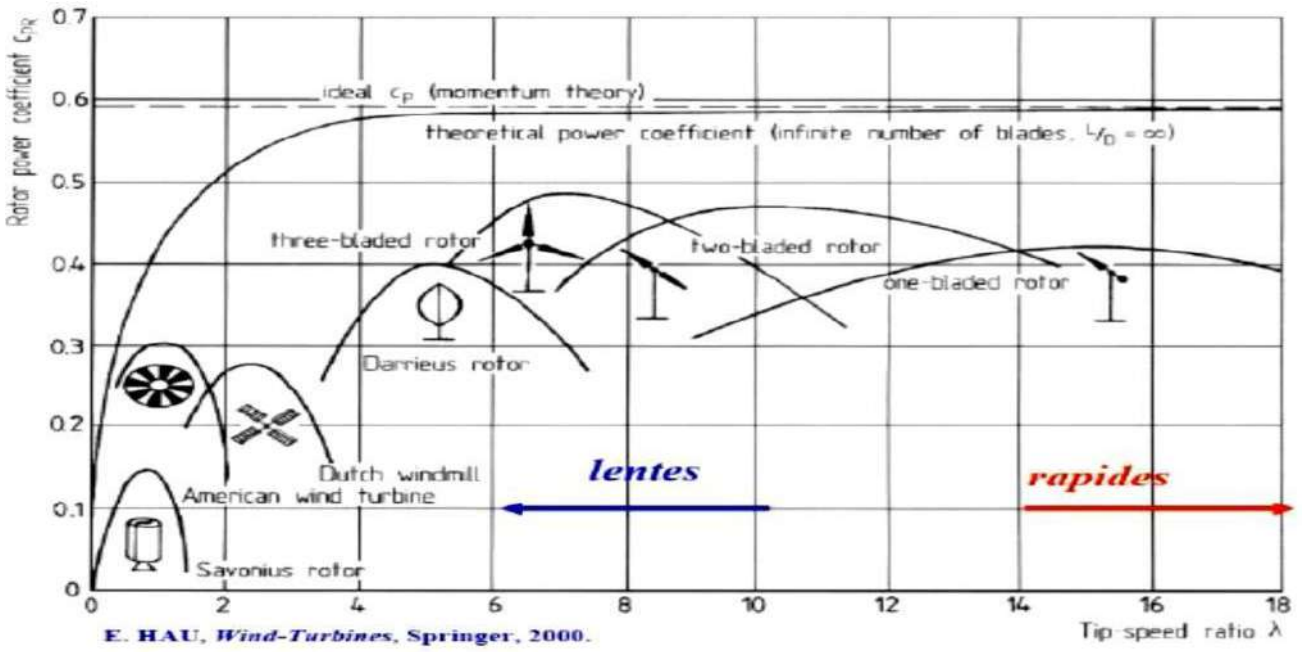


Figure I- 7 Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ

Et de l'angle de pas des Pales [08] [09].

Avantages [07]

- Coût limité,
- Peu de contraintes mécaniques,
- Grande efficacité.

Inconvénients [07]

- Bruit conséquent,
- Vibrations non négligeables,
- Grande sensibilité au flux éolien et sa variation

I-3 Eléments constitutifs d'une éolienne

Une éolienne est composée de plusieurs éléments représentés sur la Figure I-8 :

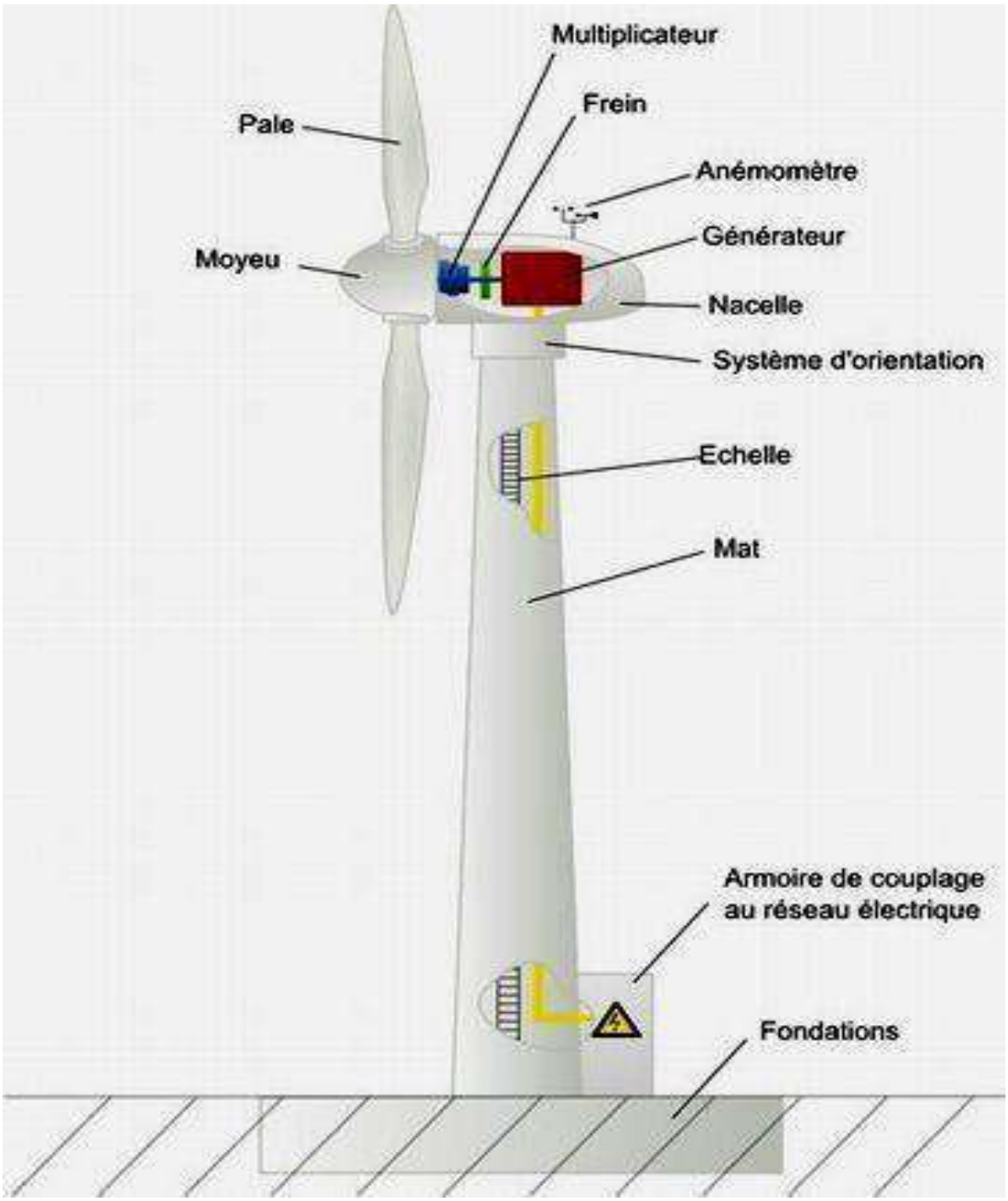


Figure I- 8 Composition d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux :

- Le mât, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise

en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement Supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur) [12].

- La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela s'ajoute le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne [12].
- Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [12].

I-4 Modes de fonctionnement des éoliennes

I.4.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique

L'énergie cinétique du vent, captée par les pales, est transformée en énergie mécanique. La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique est assurée par un générateur de type synchrone ou asynchrone [13].

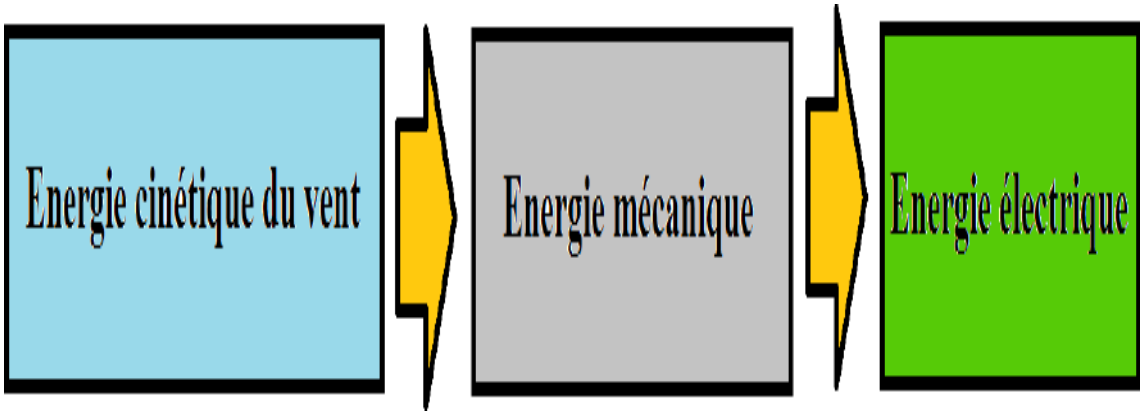


Figure I- 9 Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne [13].

I-5 Les éoliennes à vitesse fixe [13]

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (Figure. I-10). Cette machine est entrainée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système d'orientation des pales (pitch contrôle). La machine fonctionne alors en hyper synchronisme à une vitesse $\Omega_s(1-g)$ avec Ω_s vitesse de synchronisme (souvent ns=1500 tr/min^{-1}) et g le glissement, avec $g < 0$ pour un fonctionnement en génératrice et $|g| \leq 1\%$ en moteur. La rotation des pales par des actionneurs, hydraulique ou électrique, permet l'augmentation de l'angle de calage β. La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice. Lors de forts vents, cette technique permet la mise en drapeau des pales (β=90°).

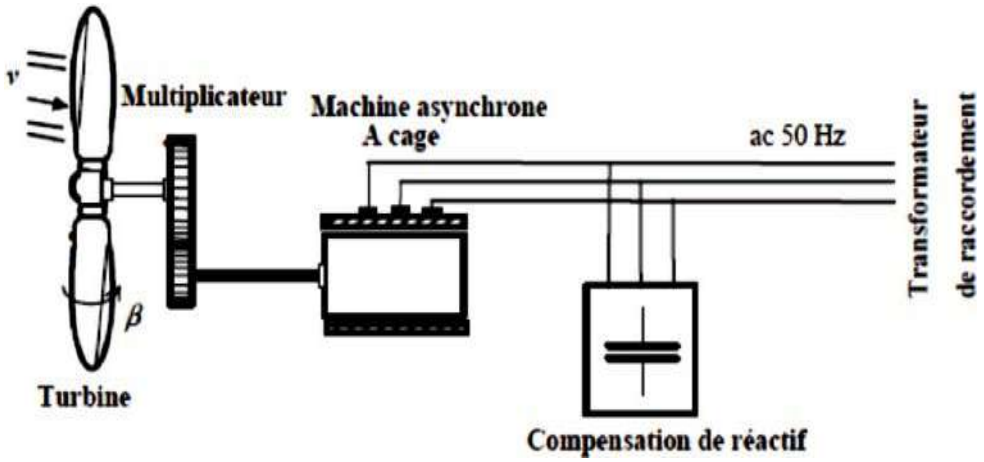


Figure I- 10 machine Principe de la conversion de l'énergie dans une éolienne [6] [13].

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes. En conséquence, en cas de rafales de vent, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée [06].

Cette configuration présente les inconvénients suivants [06] :

- Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone,
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité, Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau, Impossibilité de réglage de la puissance générée.

Les avantages principaux de ce type [11]:

- système électrique plus simple,
- faible coût,
- pas besoin de système électronique,
- plus fiable (moins d'entretien).

I.6. Les éoliennes à vitesse variable

Selon les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ, il y a nécessité d'un réglage de la vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}) [08].

La Figure I-11 montre que la position du maximum de la courbe puissance en fonction de la vitesse de rotation change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques. Il existe différents ensembles de convertisseurs-machines utilisés ou utilisables dans la génération éolienne d'énergie électrique [08].

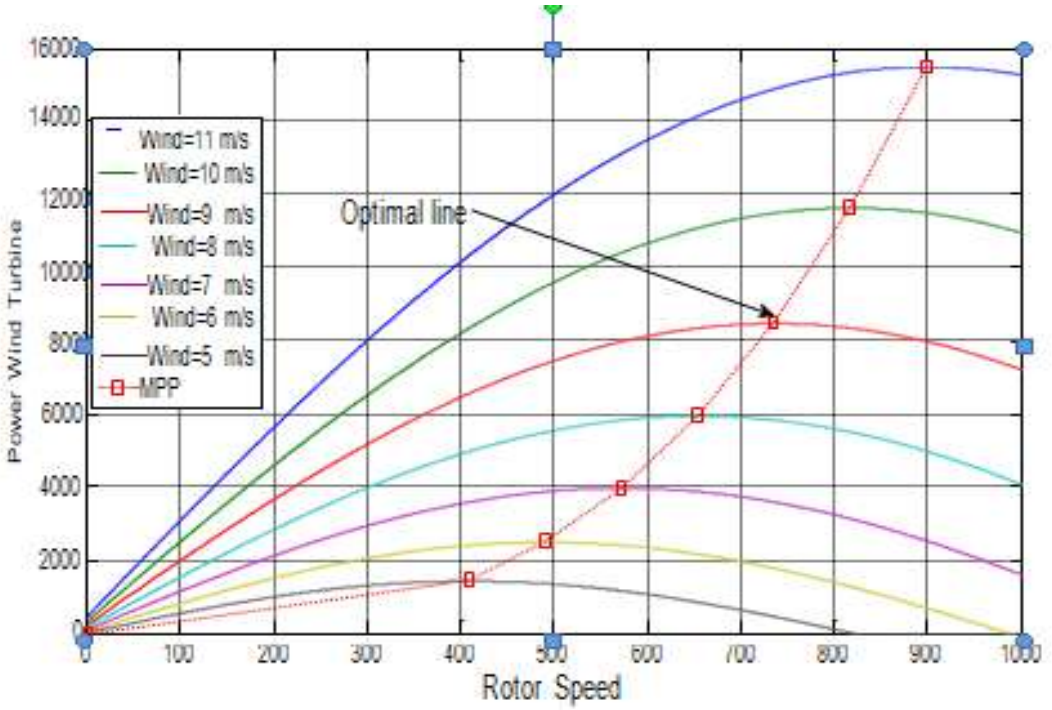


Figure I- 11 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [08].

Avantages [11]

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Obtention d'une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité

Réduction des bruits acoustiques.

Inconvénients [11]

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,..).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

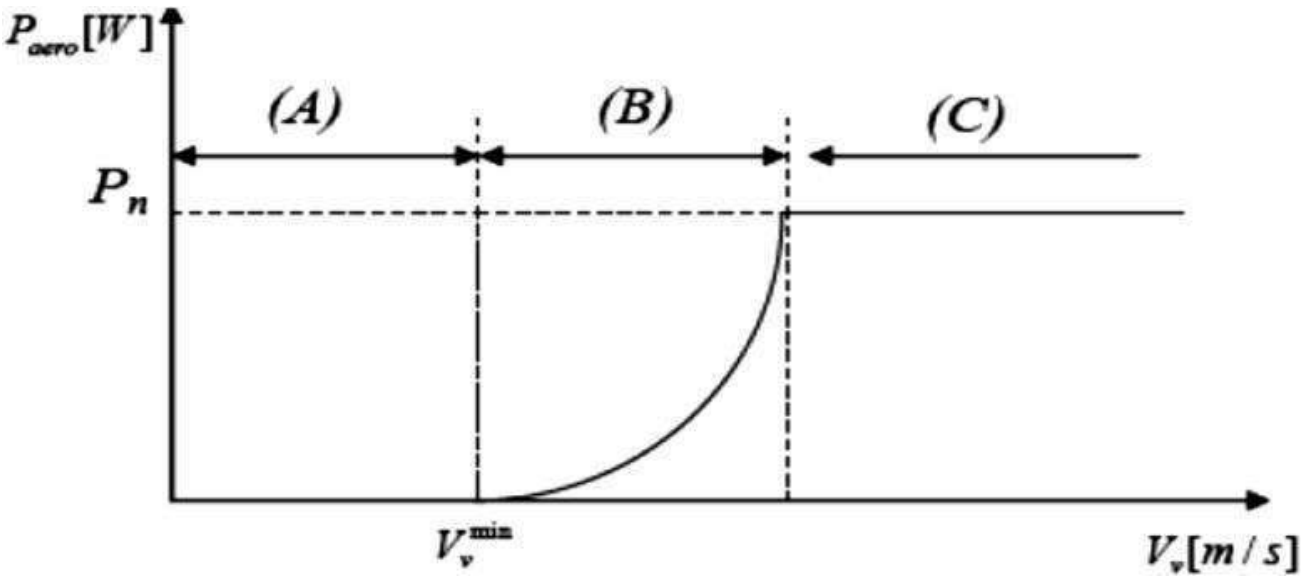


Figure I- 12 Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne [08].

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée par la figure I.12.

Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées :

- **La zone A** correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance.
- **La zone B** correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer.
- **La zone C** correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

I .7.Aérogénérateur synchrone

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes[14] [11] Les différentes types dela machine synchrone ainsi que les topologies utilisées seront abordées dans cette section.

I.7. 1 Machine synchrone à rotor bobiné

Ce genre de machine est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. Ces bobines sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Il y a deux types de machines synchrones à rotor bobiné : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants. [15].

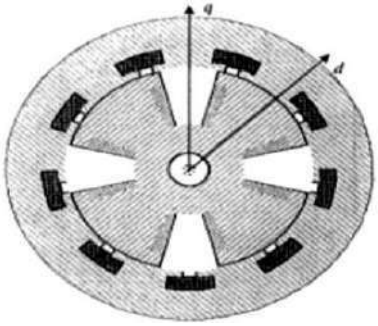
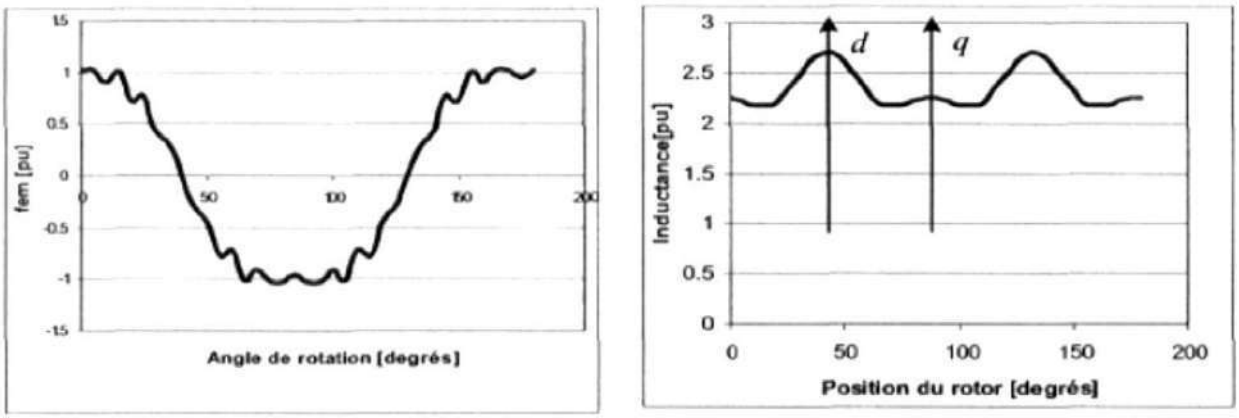


Figure I- 13 Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants[15].

Dans l'exemple de la figure I.14, il est à remarqué que la variation de la valeur de l'inductance, selon l'angle de rotation, est relativement faible bien que cette structure soit à pôles saillants, bien que l'inductance selon l'axe d est plus grande que l'inductance selon l'axe q, contrairement aux machines à aimants permanents[15].

Forme de la f.é.m **b) Variation de l'inductance cyclique** **Figure I- 14**



f.é.m et inductance cyclique d'une MSRB[15].

I.7.2 Machines synchrones à aimants permanents

Aujourd'hui, les machines synchrones représentent une partie importante du marché des convertisseurs électromécaniques d'énergie et couvrent une gamme de puissance très large qui s'étend de quelques MW jusqu'à 1GW environ. Traditionnellement, les fortes puissances restent le domaine réservé pour la production d'électricité. En fonctionnement moteur, en revanche, les puissances installées dépassent rarement quelques dizaines de MW. Le moteur synchrone fonctionnant en vitesse variable, le plus puissant connu à ce jour, à une puissance d'environ 100 MW, il est conçu pour une soufflerie de la NASA [16].

Une machine synchrone est une machine électrique dont les vitesses de rotation du rotor et du champ magnétique tournant du stator sont égales. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est génère soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position de ce champ est alors fixe par rapport au rotor, ce qui entraîne le synchronisme entre le champ magnétique tournant statorique et le rotor [17]. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants dans Le stator, partie fixe de la machine, où sont logés est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans les quelles sont logés trois enroulements identiques

décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$ Ces enroulements sont reliés à une source d'alimentation électrique

Le rotor, partie mobile de la machine, est composé d'aimants permanents. Les aimants permanents apporte beaucoup de simplicité comme l'élimination des balais (donc les pertes rotoriques). Ce pendant, le flux rotorique n'est plus commandable. Le rotor possède différentes configurations.

Une configuration du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux (Fig. I.15.a). Les aimants permanents sont magnétisés dans le sens radial.

- Les aimants permanents sont disposés radialement (aimants noyés dans le rotor). Les aimants sont magnétisés tangentiellement (Fig.I.15.b).
- Les aimants permanents sont distribués uniformément sur la surface cylindrique du rotor. L'aimantation des aimants est radiale Fig.1.15.c).
-

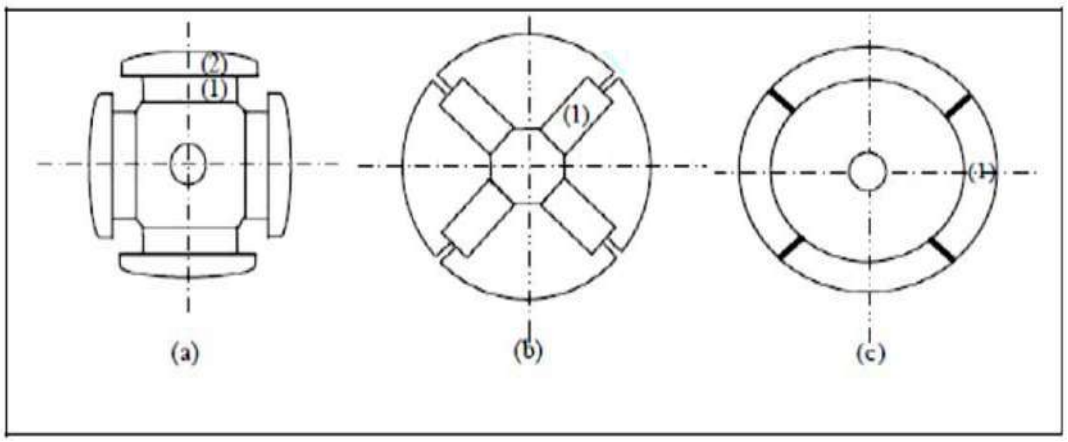


Figure I- 15 Différents types de rotors d'une MSAP [17].

(a) *aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2),*

(b) *aimants permanents (1) noyés,*

(c) *aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor.*

Principe de fonctionnement de la MSAP [17]:

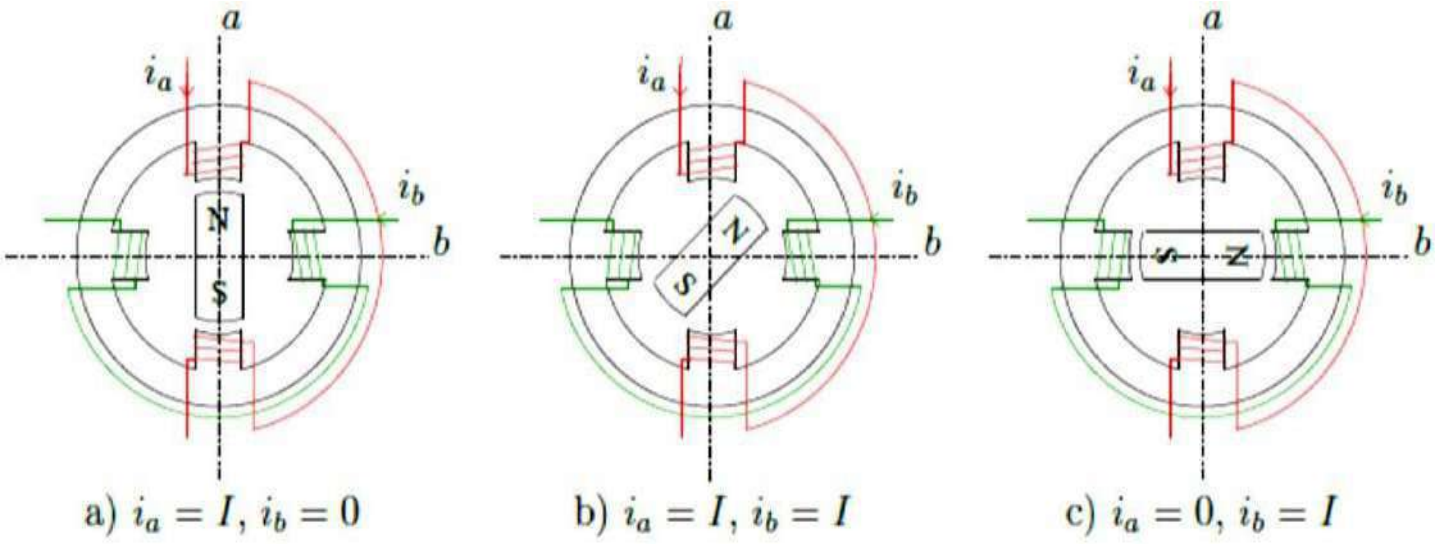


Figure I- 16 Principe de fonctionnement de la machine à aimants permanents.

Le principe des moteurs à aimants permanents est assez simple. Seules les bobines sont alimentées. Le champs créé par les enroulements du stator interéagit avec les aimants du rotor et oriente ce dernier. La Figure représente un moteur ayant un rotor bipolaire et un stator tetrapôlaire. Les phases a et b sont portées par des enroulements opposés. La présence de courants dans les phases oriente le rotor. On définit un "pas" élémentaire θp comme étant le déplacement angulaire du rotor lorsque l'alimentation est commutée d'une phase à la suivante. Nous obtenons pour cette structure θp = 90

I.7.2.a Machine synchrone à aimants permanents à flux axial [11]

Cette machine possède la particularité d'avoir un champ magnétique axial contrairement à la machine synchrone classique où le champ est radial (figures I.17-18) [19],[20], [21].

L'interaction engendrée par le courant traversant une bobine statorique, et le flux créé par les aimants permanents, produit une force magnétomotrice sur la périphérie du rotor qui le fait tourner.

I .7.2.b Types de machines synchrones à aimants permanents à flux axial

Parmi les machines synchrones à aimants permanents à flux axial, on trouve [11]

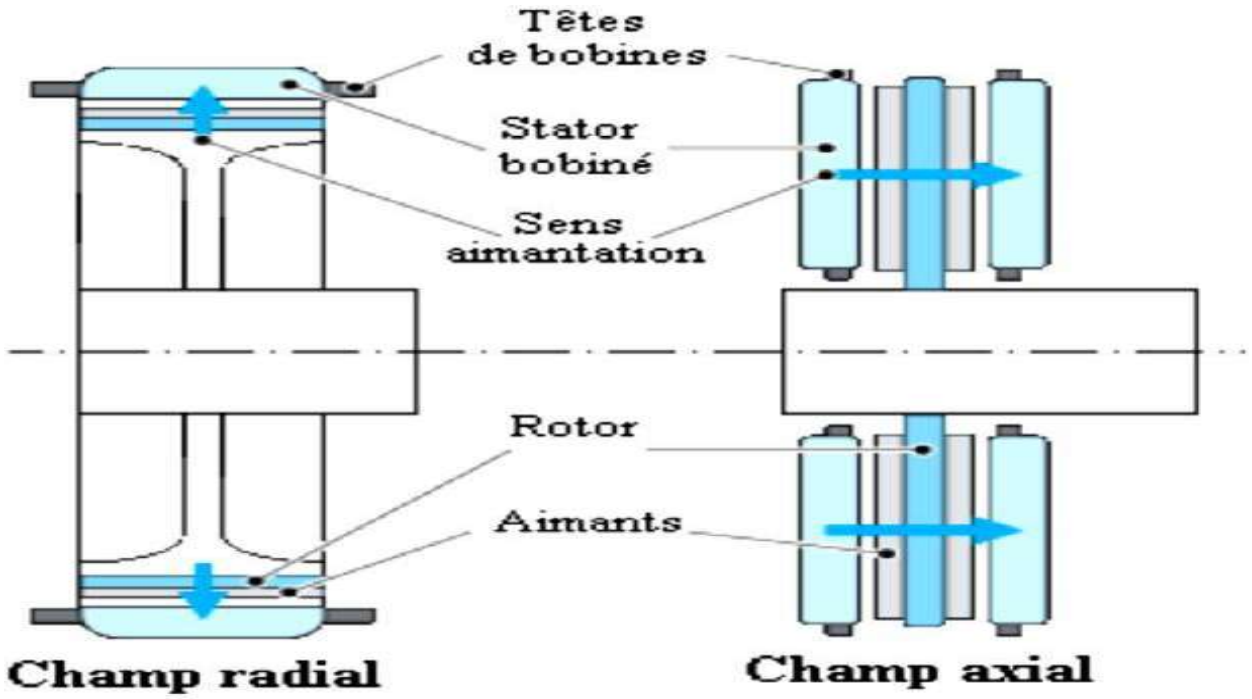


Figure I- 17 MSAP classique et discoïde [11] [19].

A/ MSAP discoïde avec deux stators et un rotor [11]

La structure de cette machine est illustrée sur la figure I.18. Elle est composée d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques **[20], [21]** Le disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques.

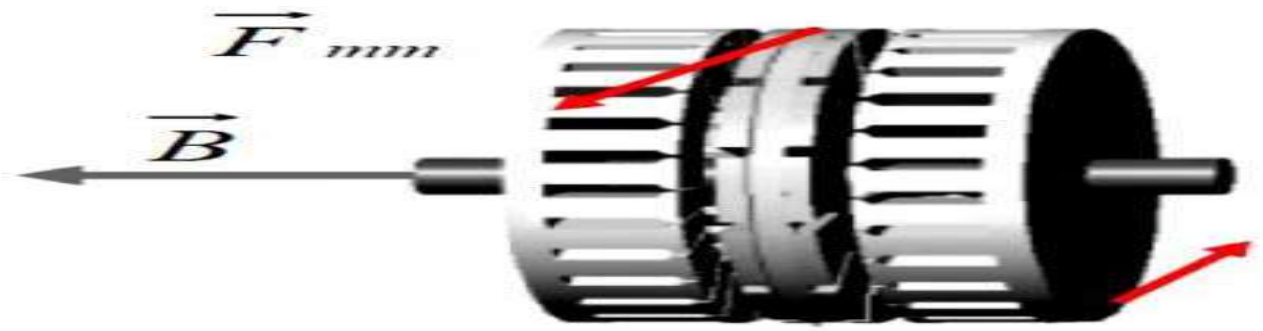


Figure I- 18 MSAP à rotor discoïde et double stator [11] [20].

B/ MSAP discoïde avec deux rotors et un stator [11]

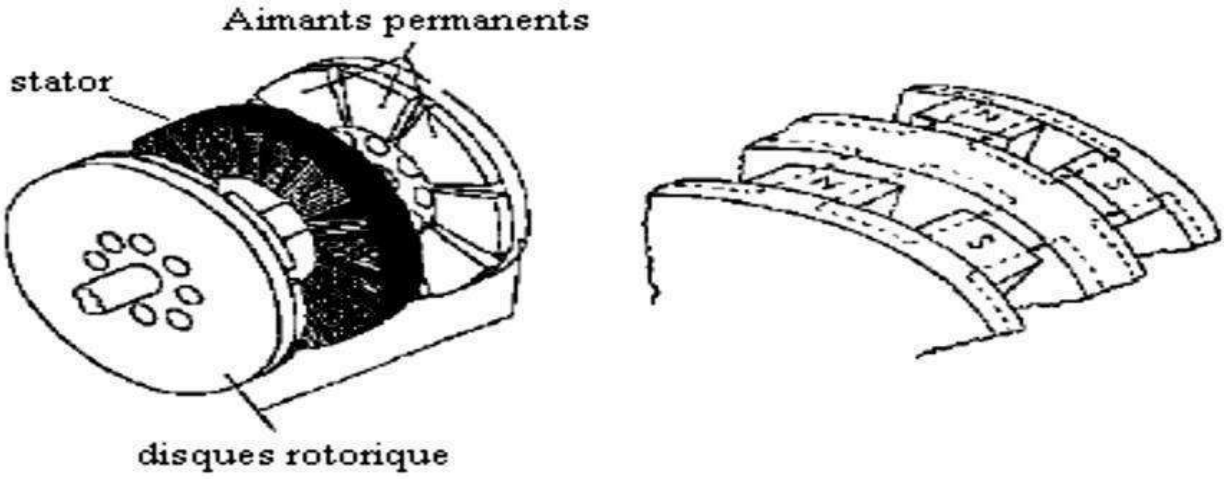


Figure I- 19 MSAP discoïde avec stator et double rotor [11][21].

Cette configuration consiste en un disque statorique entouré par deux disques rotoriques

C/MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor [11]

Dans cette configuration simple, on ne trouve qu'un seul stator et un seul rotor. Cependant, une grande force d'attraction est appliquée entre le stator et le rotor. Pour créer une force de

contre réaction et éviter ainsi le déplacement axial du rotor, il est nécessaire de placer un contrepoids de l'autre coté du rotor (Fig.I.20) [20] , [21].

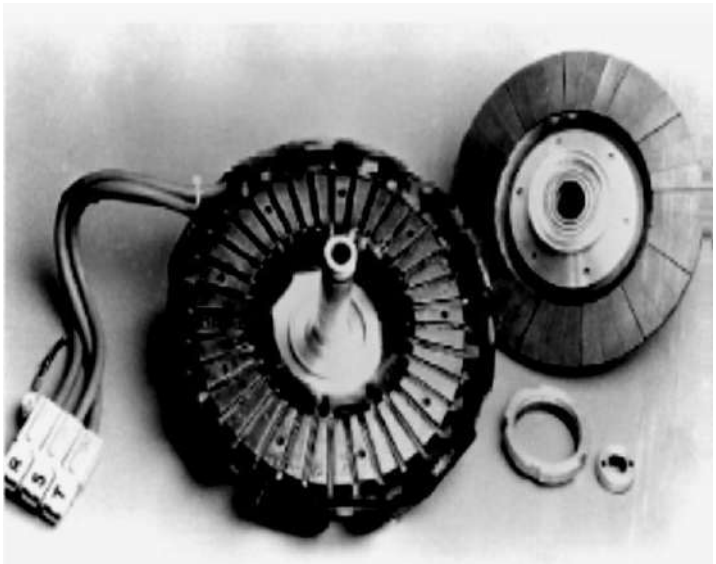


Figure I- 20 MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor [11] [20][21].

D/ MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté stator [11]

contrepoids est remplacé par un rotor additif [20],[21].

E/ Machine synchrone à aimants permanents à rotor extérieur [11]

Comme illustré par la figure I.20, le bobinage statorique est fixé dans le centre de la machine, tandis que les aimants du rotor sont placés régulièrement le long de la circonférence interne du tambour rotatif, et sont ainsi exposés directement au vent, ce qui améliore leur refroidissement [20]. Les pales de la turbine éolienne sont bien boulonnées sur le tambour, ce qui réalise un accouplement direct entre la turbine et la génératrice. La périphérie étendue du rotor, offre la possibilité de prévoir des structures multipôles [20], [21].

Ces machines sont conçues spécialement pour être employées dans un ensemble éolien à axe vertical de type Savonius [18]. Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques et d'augmenter la durée de vie du système. La génératrice est conçue pour un fonctionnement vertical; elle est équipée d'un jeu de roulements internes adaptés.

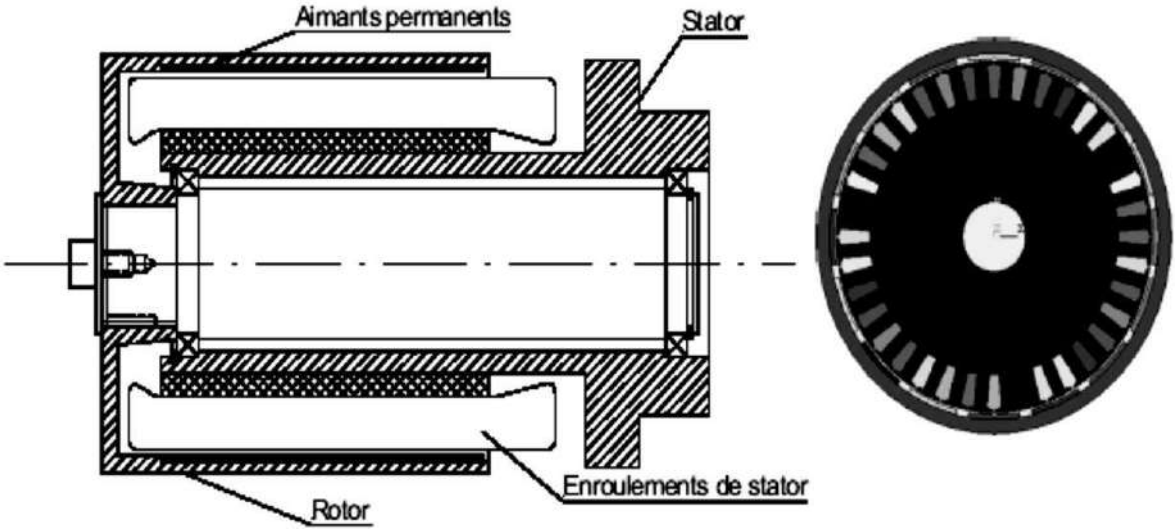


Figure I- 21 MSAP à rotor extérieur [11] [18].

I.8. Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP)

I.8.1. Connecté au réseau électrique

la machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs [19]. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [20], [14]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur[11] [14], [20], [21].

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure. I.22). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que celui connecté àla génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau [22].

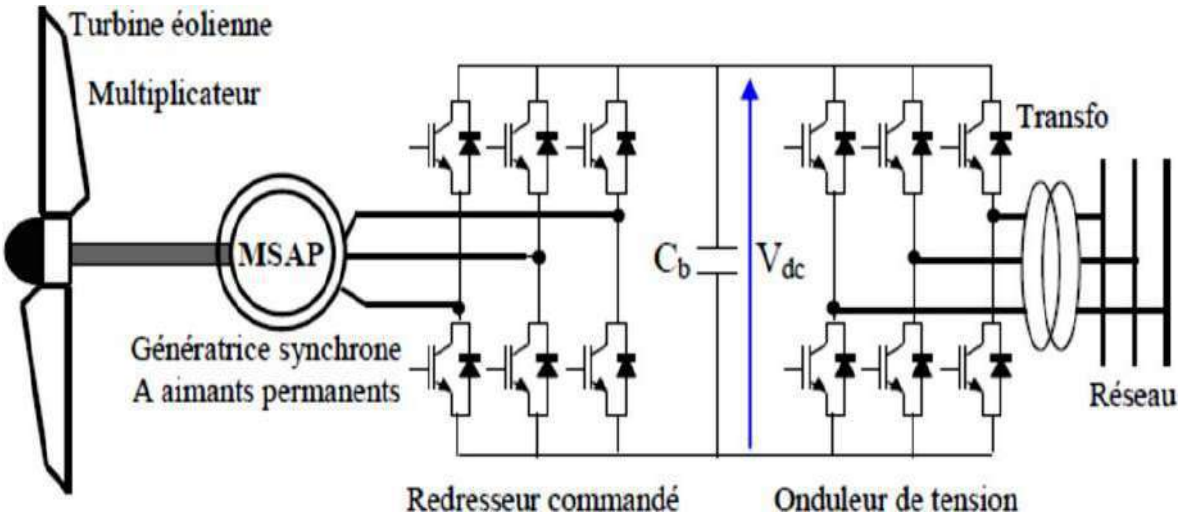


Figure I- 22 Système éolien basé sur une msap a fréquence variable [07].

I.8.2 Les éoliennes à base de la génératrice synchrone à aimant permanant en fonctionnement isolé et autonome [07]

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications

éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation.

A/Structure avec redresseur à diodes[07]

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances [23]. comme illustré sur la figure

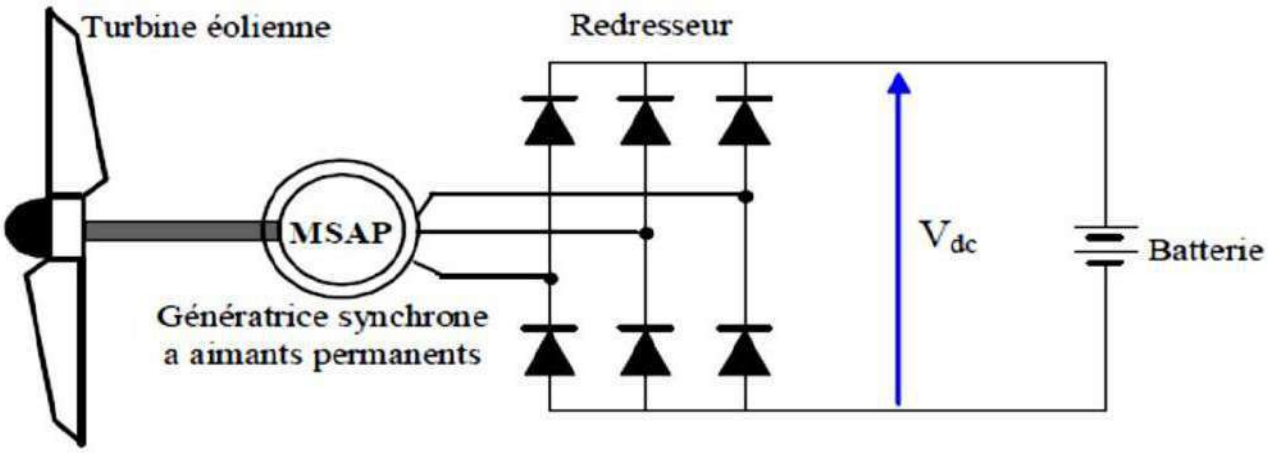


Figure I- 23 Machine synchrone avec redresseur à diodes [07].

B/Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur [07]

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). [23] [18]

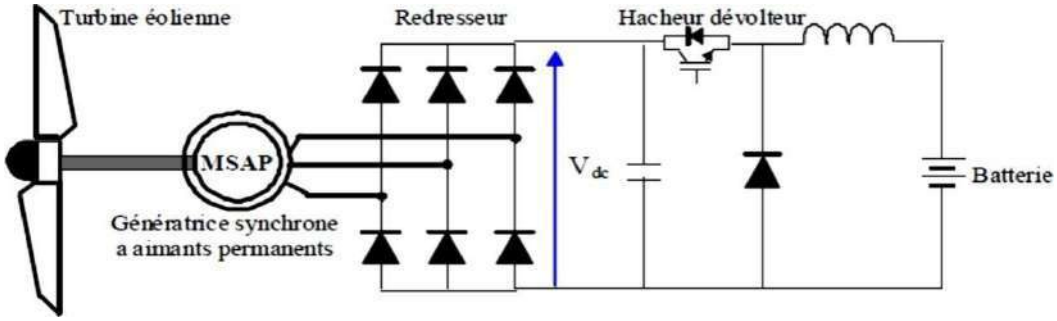


Figure I- 24 Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur [07]

L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (figure. I.24) Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont

[07] Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une

structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées [18].

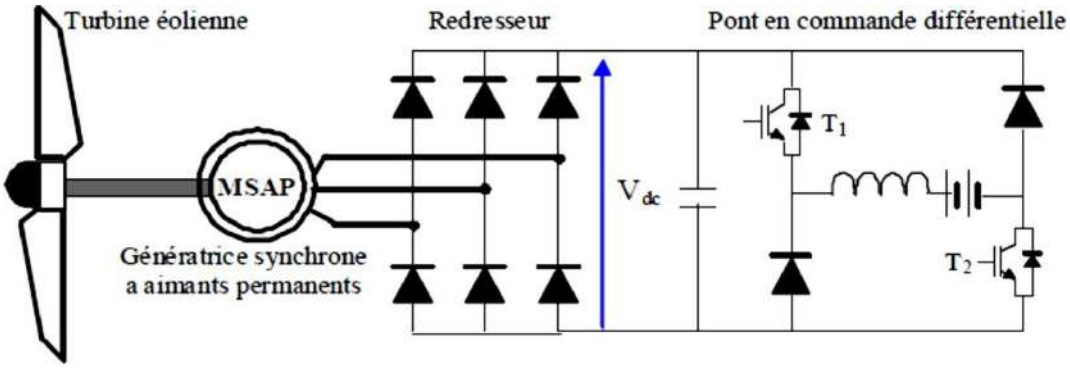


Figure I- 25 Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont [07]

C/ Structure avec redresseur à MLI [07]

La configuration de référence est évidemment celle mettant en oeuvre un redresseur triphasé àMLI. Dans le cas du montage de la figure I.26, il est possible d'effectuer un contrôledynamique et fiable en vitesse où en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation [01]. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position[01].

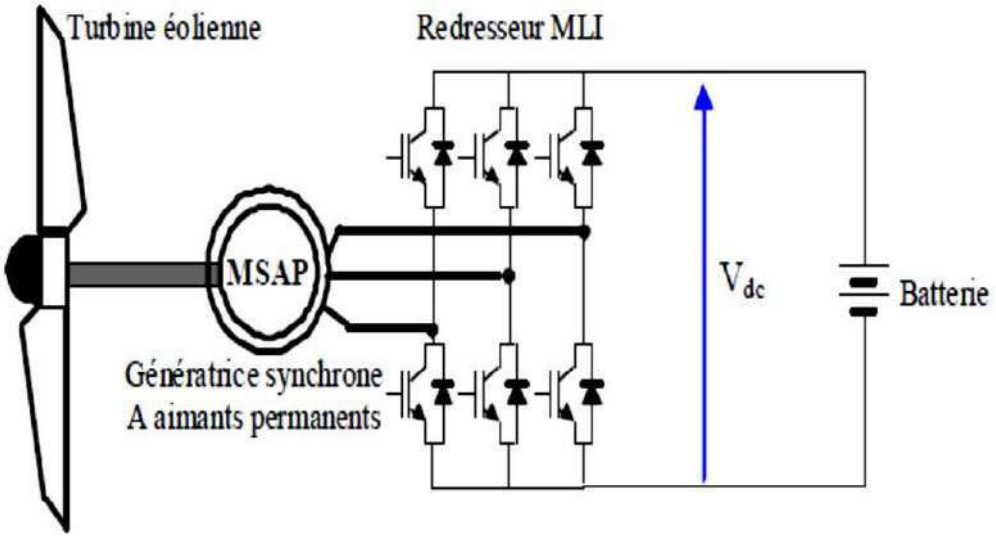


Figure I- 26 Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI [07].

I.9 Avantages des éoliennes à base des machines synchrone à aimants permanents par rapport aux autres types de machines [17].

Un avantage évident de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est la suppression des pertes par effet joule du système inducteur. Il est aisé de démontrer que dans le cas des machines classiques l'importance relative des pertes par effet joule par rapport à la puissance utile est d'autant plus élevée que la machine est de taille réduite.

Un autre avantage de l'excitation par aimants, concerne l'amélioration de la sécurité de fonctionnement. Les générateur synchrones à aimants sont intéressants du point de vue puissance,

rendement, facteur de puissance et moment d'inertie pour les gammes accessibles à leurs utilisation (coût et fiabilité) [17].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus Fiable 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 bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressent dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple), ainsi la présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [11] [25].

Conclusion

Dans ce chapitre, une brève description de chaines de conversion de l'énergie éolienne est donné. Quelques notions sur la conversion mécanique de l'énergie éolienne ont été introduites. Un aperçu succint des deux grandes familles d'éoliennes, leurs avantages et inconvénients, a été donné.

Dans la seconde partie, les différents constituants d'une éolienne sont présentés. Les systèmes éoliens basé sur la machine synchrone à aimant permanant et les différentes topologies qui existe ont été abordés. Après l'étude avantages des éoliennes à base des machines synchroneà aimants permanents par rapport aux autres types de machines, l'idée de consacrer la suite des recherches sur un système utilisant une machine synchhrone à aimant permanant MSAP a été retenue. Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser à la présentation et la modélisation mathématique des différents partie constituant une chaine de conversion d'énergie éolienne basé sur une GSAP fonctionnant à vitesse variable.

CHAPITRE II :

Modélisation des éléments de la chaine éolienne

II-1 Introduction

Tout système physique peut être considéré comme un ensemble de sous-systèmes. Ainsi, pour simplifier l'étude de l'ensemble,

Dans ce chapitre, le concept de la chaîne de conversion éolienne à base de la génératrice synchrone à aimant permanent est proposé. Un modèle mathématique de simulation de l'ensemble, en prenant en considération son caractère multi-physique (prise en charge des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques) est réalisé. Une stratégie de commande de réglage de la vitesse de rotation de la turbine, de sorte à optimiser la puissance extraite quelque soit la vitesse du vent, est proposée. Deux méthodes de régulation de vitesse utilisant un régulateur PI et un régulateur IP ont été traitées

II-2 La turbine éolienne

L'éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air.

Une éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique [26][27].

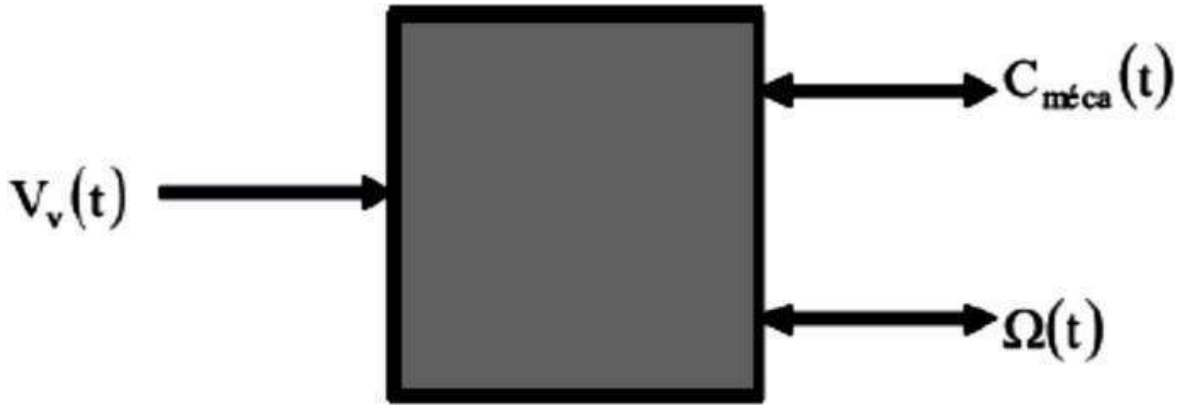


Figure II- 1 Entrées – sorties du modèle [27]

II-2-1 Conversion de l'énergie éolienne

a/Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx, de section S, de masse volumique ρ, animée d'une vitesse v, figure II.2 s'écrit [11] :

$$dE_c = \frac{1}{2}\rho S d_x v^2 \qquad (II.1)$$

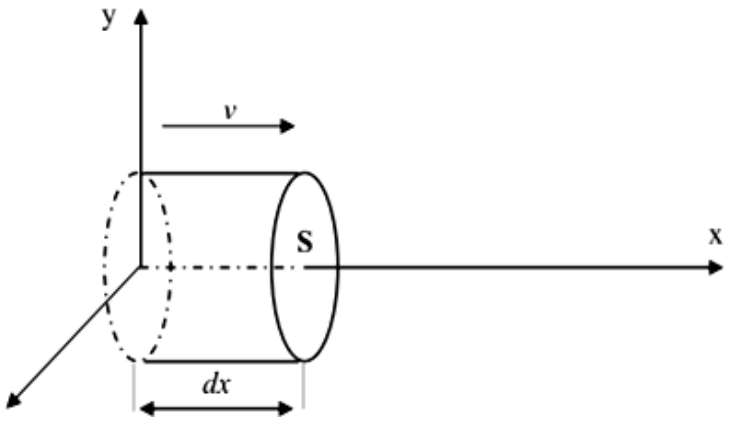


Figure II- 2 colonne d'air animée d'une vitesse *v* [11].

La puissance Pm extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps [11].

En supposant $d_x = vdt$ on déduit l'expression de Pm :

$$Pm = \frac{dEc}{dt} = \frac{1}{2}\rho S_0 V^3 \qquad (II.2)$$

Où :

- ρ: masse volumique de l'air (en Kg/m3).
- v : vitesse instantanée du vent (en m/s).
- Ec : en joules.

b/Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand AlbertBetz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois [11], [28]. Considérons le système de la figure II.3 qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V2 en aval.

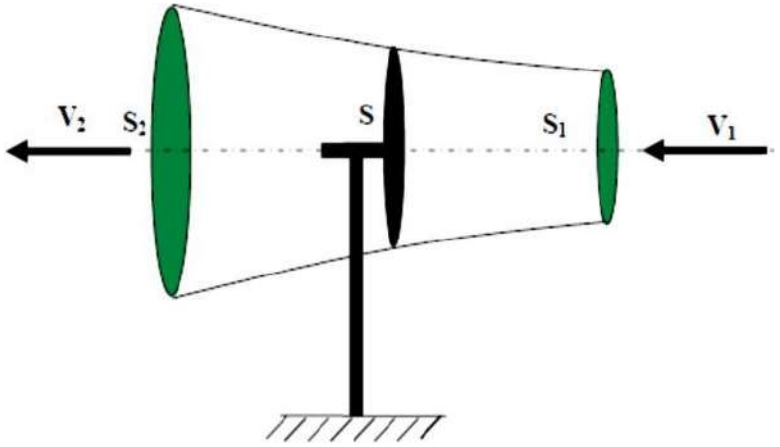


Figure II- 3 théorie de Betz : schéma de principe [11].

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [11], [28].

$$P_m = \frac{\rho . s . (V^2{}_1 + V^2{}_2)}{2} \qquad (II.3)$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent enamont et en aval [11].

$$p_m = \frac{m0(V_1 + V_2)(V_1{}^2 - V_2{}^2)}{2} \qquad (II.4)$$

Soit en remplaçant m0 par son expression dans (II.5):

$$p_m = \frac{\rho . s . (V_1 + V_2)(V_1{}^2 - V_2{}^2)}{4} \qquad (II.5)$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant V2=0 dans l'expression (II.5) :

$$p_{mt} = \frac{\rho . s . V_1{}^3}{2} \qquad (II.6)$$

c/ La vitesse spécifique de vitesse (Tip-Speed-Ratio)

On définit la vitesse spécifique ou normalisée λ comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine sur la vitesse instantanée de vent V (figure II-3)

l'expression suivante [11], [28].

$$\lambda = \frac{R\Omega_1}{V_1} \qquad (II.7)$$

ou :

- Rt: Rayon de la surface balayée en m.
- V: Vitesse de vent en m/s.
- Ωt: Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.
-

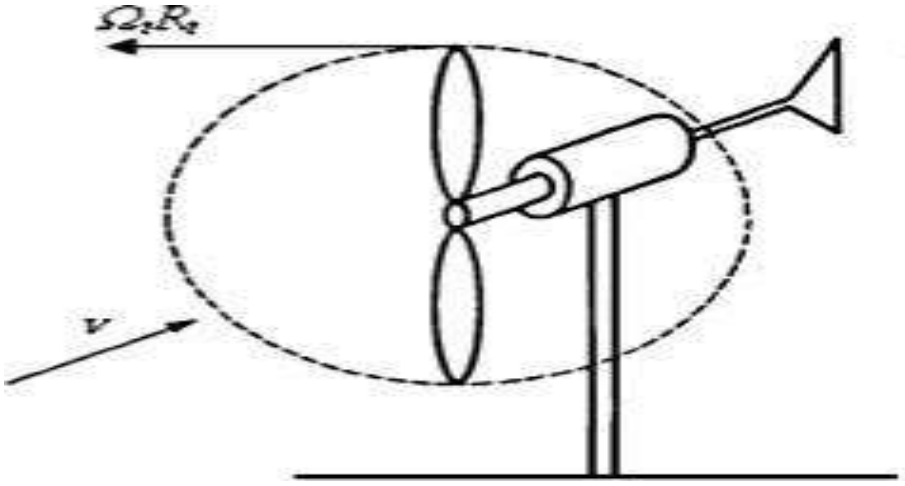


Figure II- 4 Vitesse de vent (v) et vitesse tangentielle de l'aubage (Ωt Rt) [11]

Coefficient de puissance

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible [11], [28].

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(\left(1+\frac{V_1}{V_2}\right).\left(1-\left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)\right)}{2} \qquad II.8$$

Le coefficient Cp est variable, il est fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ωt, et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle decalage [11], [28], [29]. Il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ. La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de16/ 27soit 0.593 [29], [28], [11].

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte, et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65% de la limite de BETZ ; on ne récupère globalement que 40% de l'énergie due au vent. On déduit alors le rendement aérodynamique [11],[29], [28]:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p\,\max} \qquad (II.9)$$

C_{pmax} Étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance Cp.Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λopt pour la quelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale V_n et une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} [28], [11].

d/ Coefficient de couple

Le coefficient de couple Cm est assez proche du coefficient de puissance Cp. Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, , notamment à vitesse de rotation Ωt nulle, ce qui correspond à une valeur de Cp nulle pour une valeur de Cm non nulle [11][30].

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

Avec: $$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \pi \rho R^2 {V_1}^3 \qquad (II.10)$$

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_1} \qquad (II.11)$$

D'où l'expression du couple :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda 2} \pi \rho {R_t}^3 V^2 \qquad (II.12)$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par

$$\boldsymbol{C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2}\pi \rho S_t R_t V^2} V^2} \qquad (\boldsymbol{II.13})$$

Ou :

-Tt: couple de la turbine éolienne

II.3 Conversion de l'énergie éolienne :

l'eolienne

capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor :

la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [Gri06].

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

$$P_{aer} = C_p(\lambda, \beta).\frac{\rho.S.V^3}{2} \qquad (II.14)$$

Où:

C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

ρ : La densité de l'air (approx. 1.22 kg/m^2 à la pression atmosphérique à 15^oC).

S : La surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.

v : La vitesse du vent

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

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \qquad (II.15)$$

Où :

Ω : est la vitesse de rotation de la turbine avant multiplicateur.

$<$: est le rayon de l'aéroturbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique (couple de la turbine éolienne) est donc directement déterminé par : [40]

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p(\lambda, \beta).\frac{\rho.S.v^3}{2}.\frac{1}{\Omega_{turbine}} \qquad (II.16)$$

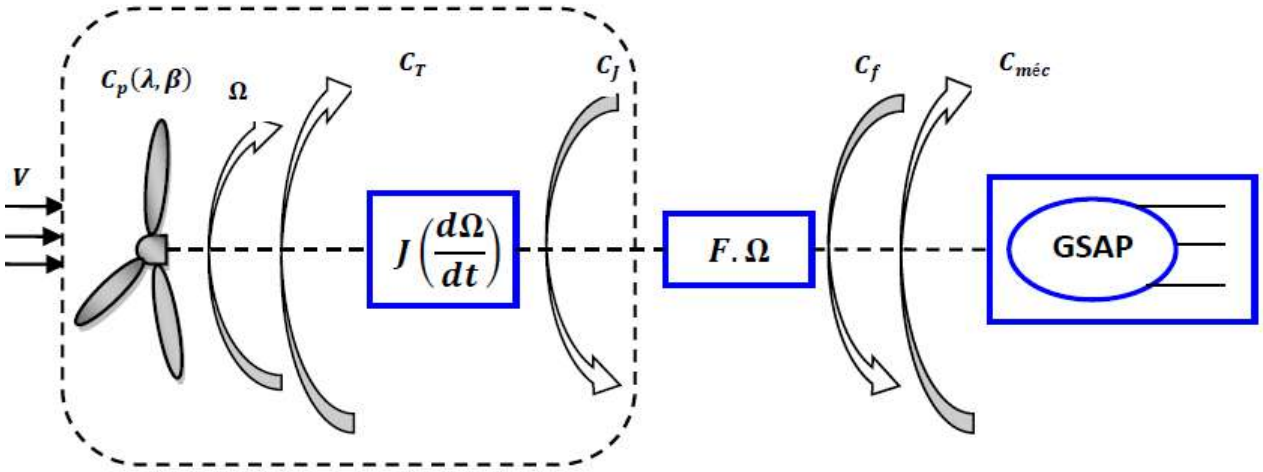


Figure II.5-schema bloc d'une turbine éolienne

II.3.1. 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 K7IF$JE et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbin

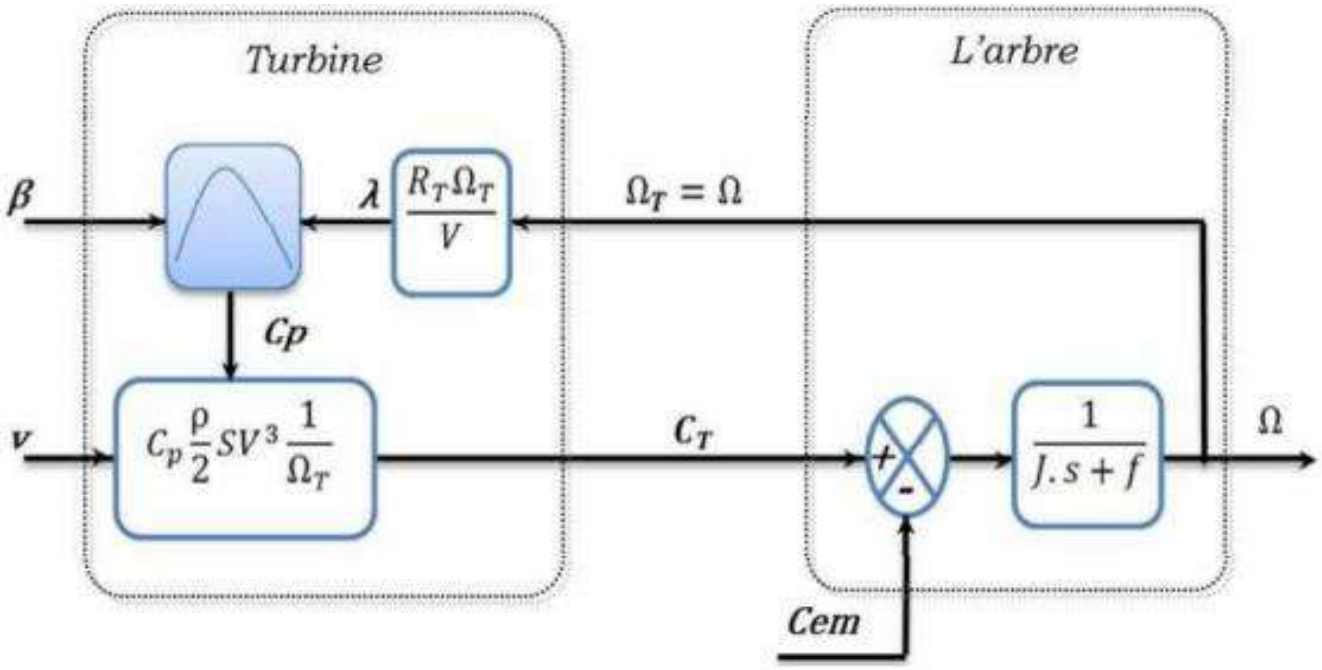
$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \qquad (II.17)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partie du couple mécanique total (9/E%) appliqué au rotor :

Où :

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \qquad (II.18)$$



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

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté sur la (Fig.II.6).

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \qquad \text{(II. 19)}$$

II-4 turbine éolienne *modélisation*

la forme de la turbine, déterminent la puissance mécanique. Un modèle dynamique prenant en compte tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine. recours à la modélisation est une nécessité.

Le système de conversion de l'énergie éolienne est complexe. Ce système dépend de la multiplicité des domaines existants, à savoir, aérodynamique, mécanique, et électrique. Par ailleurs, les facteurs, tel que la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine, déterminent la puissance mécanique. Un modèle dynamique prenant en compte tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine. Afin de contrôler les performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues, le recours à la modélisation est une nécessité.

II-4-1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [25],[32]:

Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement ;

Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés ;

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

On obtient alors un modèle mécanique simple (voir Figure. II.7) :

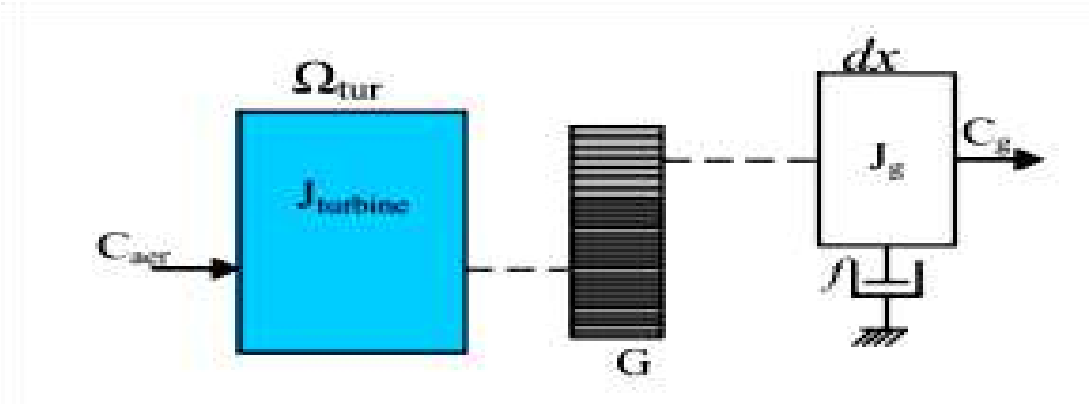


Figure II-7 la modélisation mécanique de la turbine

II.5 Modélisation de la turbine

A/profil du vent:

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente

Exemple La vitesse moyenne du vent est donnée par l'expression suivant : [41]

$$V(7) = 8 + \sin(0.1047.7) + 2\sin(0.2665.7) + 0.2\sin(3.6645.7)$$

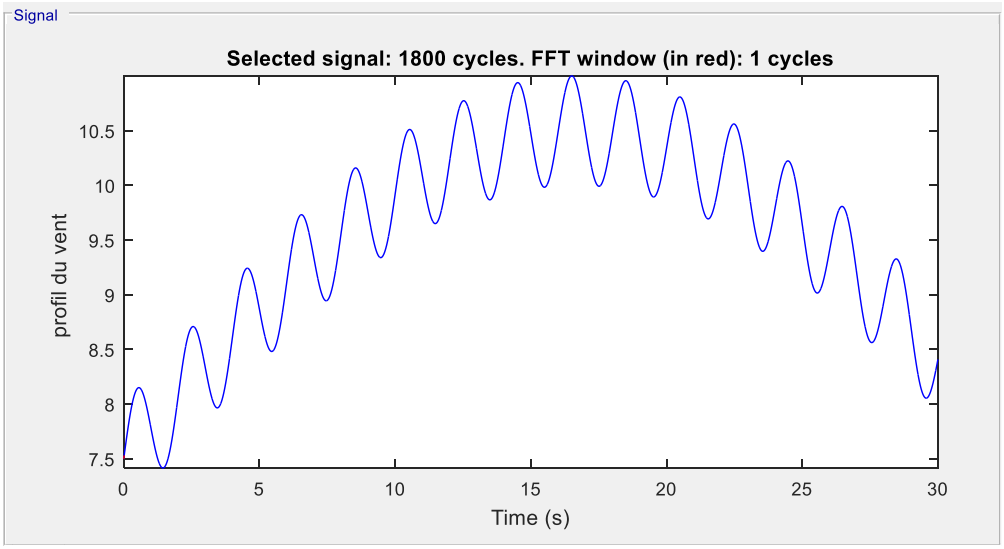


Figure II.8-profil du vent

B/ Modèle de la turbine

Les variables d'entrée et de sortie de la turbine sont [01] :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométriedu rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

La caractéristique $C_p(\lambda)$ de la voilure est représentée par un polynôme de troisième de grésous la forme [18]:

$$C_p(\lambda) = a.\lambda^2 + b\lambda^2 + c.\lambda + d \qquad (II.20)$$

C/ Modèle des pales

Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure II.8 [06].

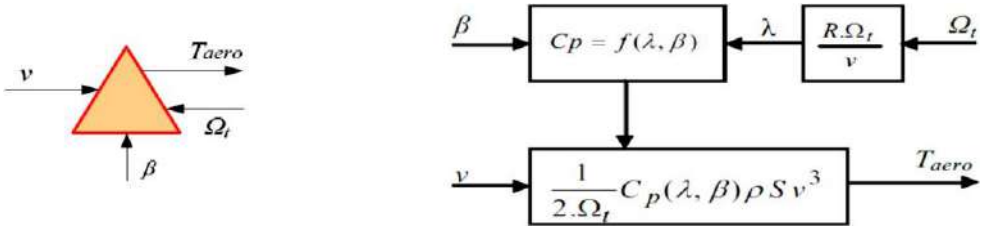


Figure II- 9 Schéma bloc du modèle des pales [06].

D / Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but d'adapter la vitesse de la turbine Ωt, assez lente, à celle que nécessite la génératrice Ω.

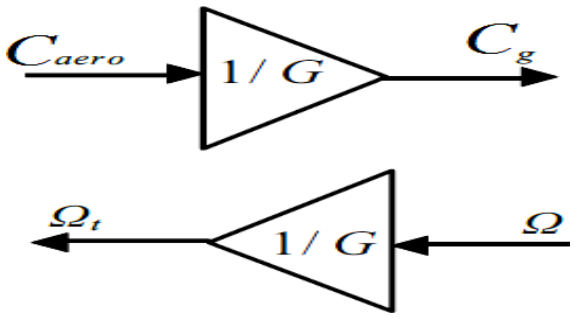


Figure II-9 Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse [6].

II-6 Système de contrôle de l'aéroturbine

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées**[11],** [33],[37]:

- Boucle de régulation de la vitesse.
- Boucle de régulation de la puissance.

La boucle de régulation de la vitesse est le principal élement dans la stratégie d'optimisation de la puissance, où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique.
Les deux boucles de régulation interviennent dans la stratégie de limitation de la puissance. Quandla vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constantà une valeur optimale **βopt.** La vitesse de rotation de la turbine est alors ajustée par la boucle de régulation de la vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent.
la vitesse de rotation peut augmenter et dépasser la vitesse nominale, à cause de la lenteur du système d'orientation des pales [33] [11]. Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice en anticipant l'action du dispositif d'orientation des pales par le réglage du couple électromagnétique, afin de contrôler la vitesse de rotation dans la zone 3 [33], [37], [11].

II-6-1 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La courbe non linéaire en forme de « cloche [11], [26]. Pour chaque vitesse du vent, le système doit atteindre sa puissance maximale qui correspond à sa vitesse de rotation optimale.

-La première méthode, la moins classique [26], considère que la caractéristique C p= f (λ) n'est pas connue.

-La deuxième, la plus répondue, suppose que la caractéristique C p= f (λ) soit connu,
pour que l'éolienne fonctionne dans des conditions optimales, il est nécessaire de suivre la courbe optimale de puissance.

1.

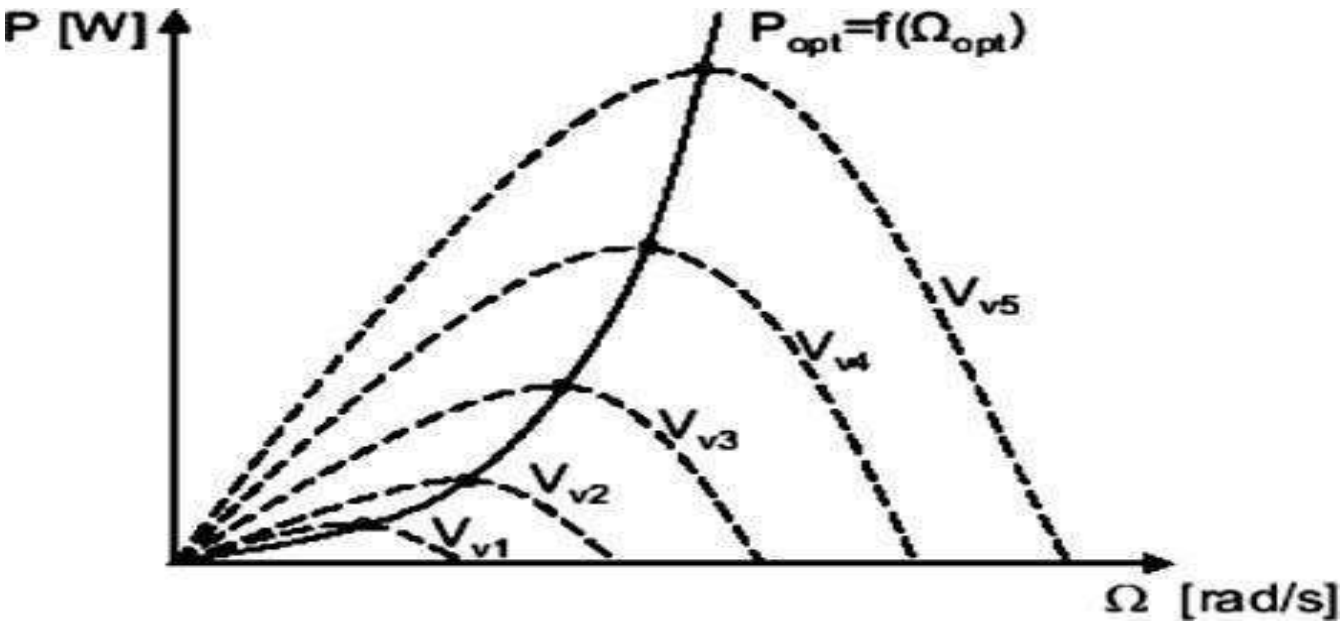


Figure II- 10 Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation [11].

II.6.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Afin d'extraire un maximum de puissance, malgré les variations fréquentes de vitesse du vent,une commande par l'asservissement de la vitesse de rotation permet de maintenir le rapport entre la puissance extraite et celle du vent à sa valeur maximale. En d'autre termes, il faut

maintenir le coefficient de puissance Cp à sa valeur maximale. Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse [33], [34]

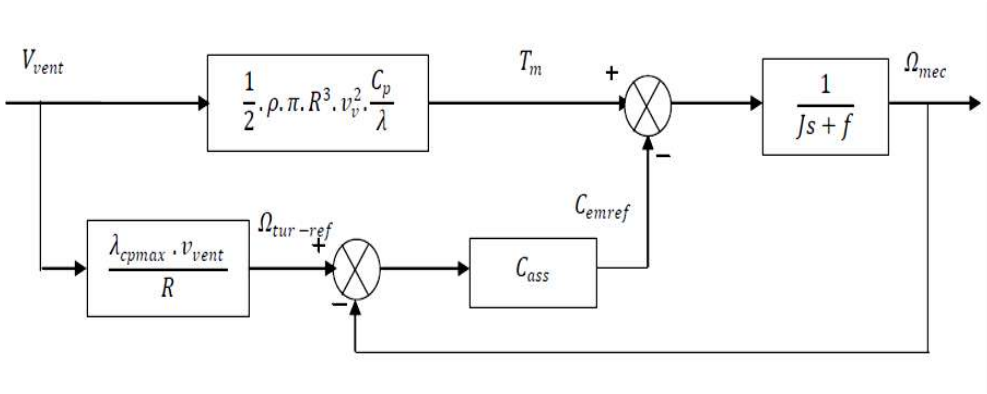


Figure II- 11 Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse[34].

Le vent, source principale d'énergie de fonctionnement du système, fournit le couple aérodynamique Tm. Si de ce dernier est soustrait le couple électromagnétique créé dans la génératrice, le couple mécanique obtenu permet de calculer la vitesse de rotation. Pour génèrer le couple électromagnétique de référence, par l'utilisation d'un contrôleur, il est nessecaire de calculer la vitesse correspondante à CP max.

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λopt et le coefficient de puissance maximale $C_{P\,max}$ est donné par la relation (II.21) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_V}{\mathrm{R}} \qquad (\mathrm{II.21})$$

II.6..3 Système de régulation de la turbine éolienne

II.6.3.1 Calcul des paramètres du régulateur PI

$$\mathrm{k_p} = 2.\xi_\mathrm{n} \mathrm{w_{n.}J.} - .\mathrm{f} \qquad (\mathrm{II.22})$$

Le contrôle de la vitesse est assuré par un régulateur de type IP dont les gains sont respectivement Ki et Kp. la chaine de régulation de la vitesse peut être représenté sur le schéma fonctionnel suivant : [39]

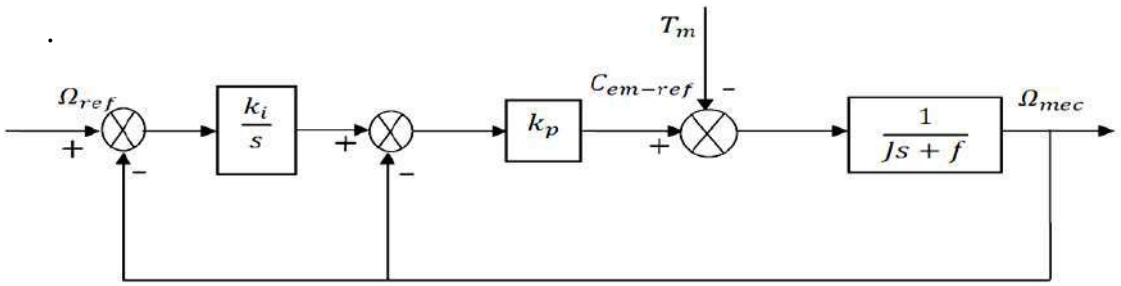


Figure II- 12 Schéma bloc d'un régulateur IP [34].

La fonction de transfert se met sous la forme suivante :

$$\boldsymbol{\Omega_{mec} = (S)\Omega_{ref} - (S).T_m} \quad \boldsymbol{(II.23)}$$

$$\boldsymbol{F(s) = \frac{k_i.k_p}{JS^2 + (f + k_p)S + K_I.K_p}} \quad \boldsymbol{(II.24)}$$

$$\boldsymbol{P(S) = \frac{S}{JS^2 + (f + k_p)S + K_I.K_p}} \quad \boldsymbol{(II.25)}$$

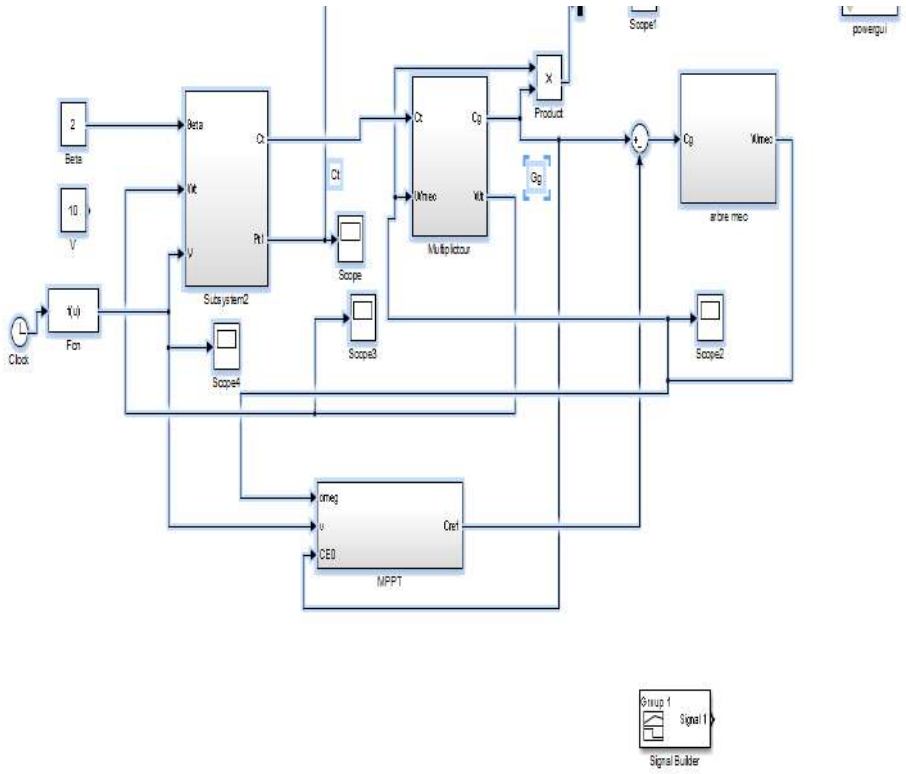


Figure.II.13: Schéma bloc de la Tourbine.

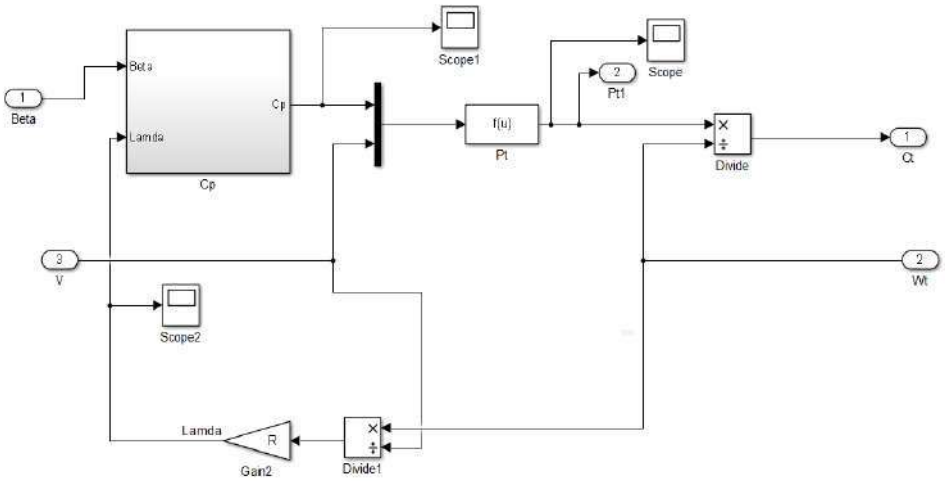


Figure.II.14: SCHEMA BLOCMPPT TURBINE

Résultats de simulation

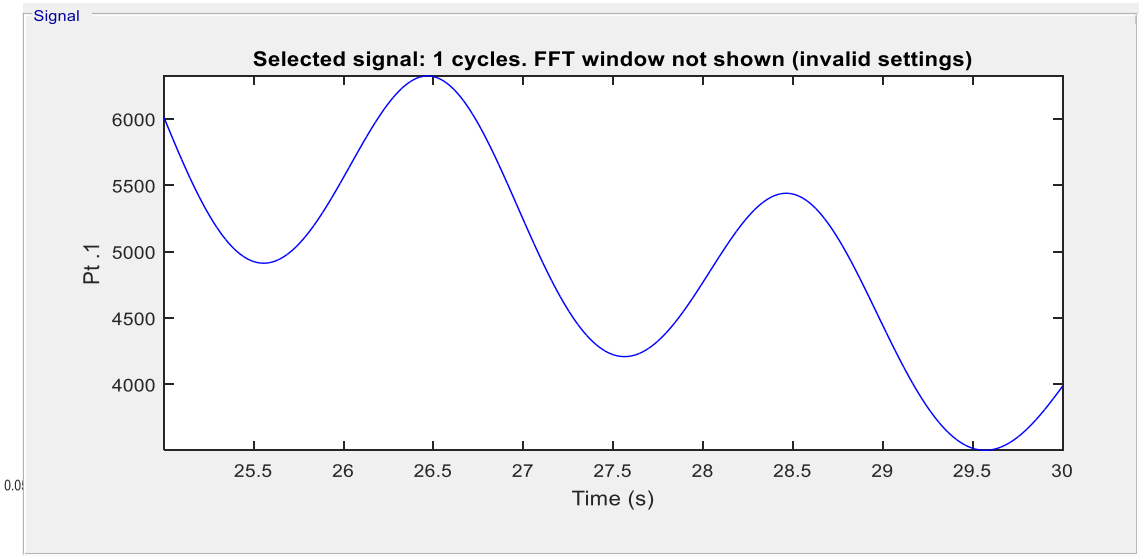


Figure II-15 : Résultats de simulation pour La puissance totale

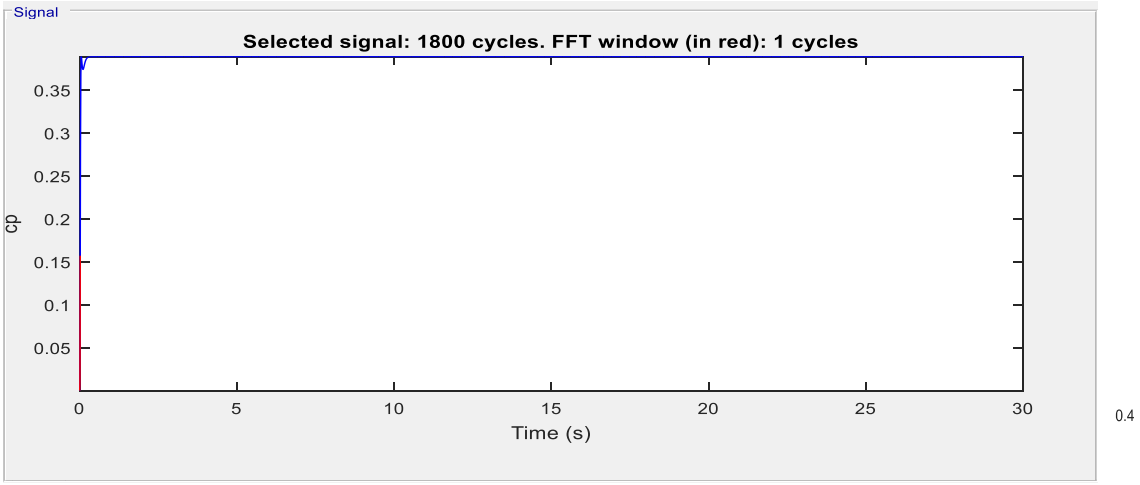


Figure II-16 : Résultats de simulation le coefficient de puissance

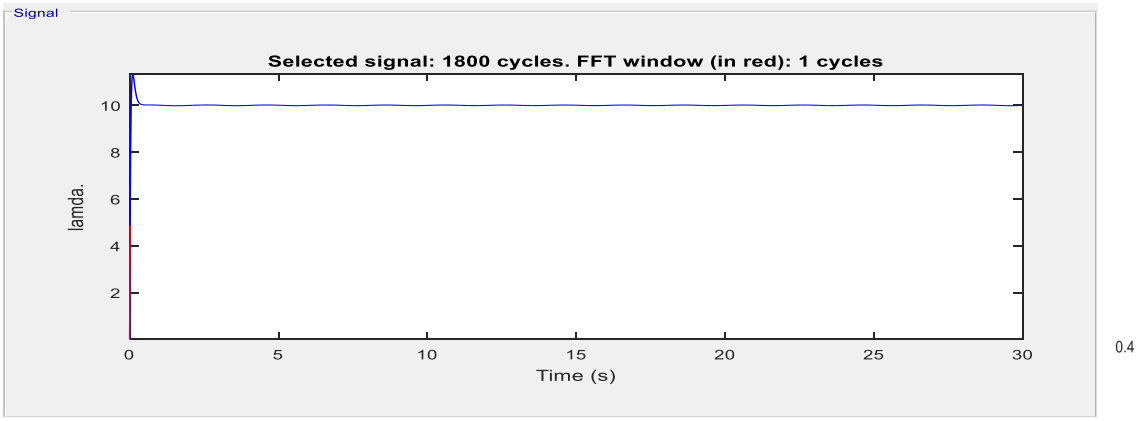


Figure II-17 : Résultats de simulation pour lamda

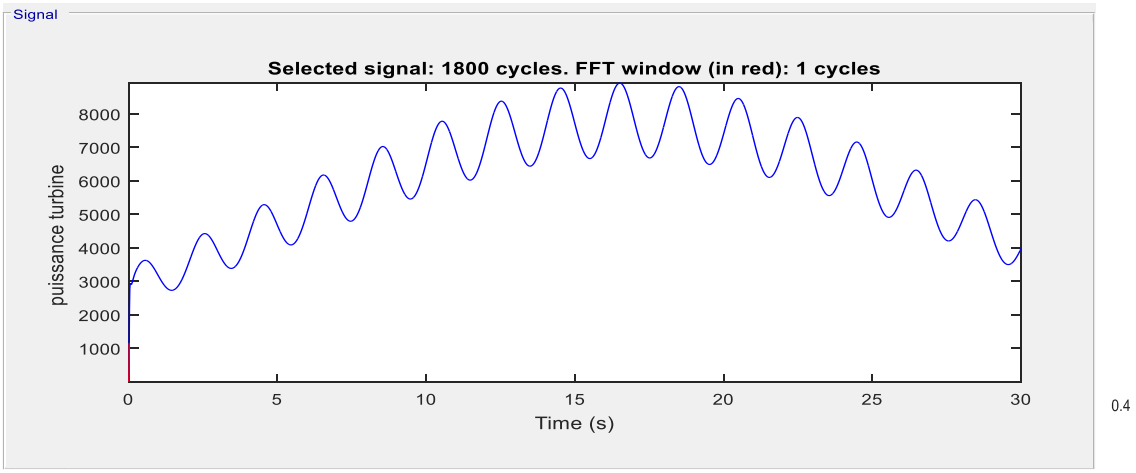


Figure II-18 : Résultats de simulation pour la puissance turbine

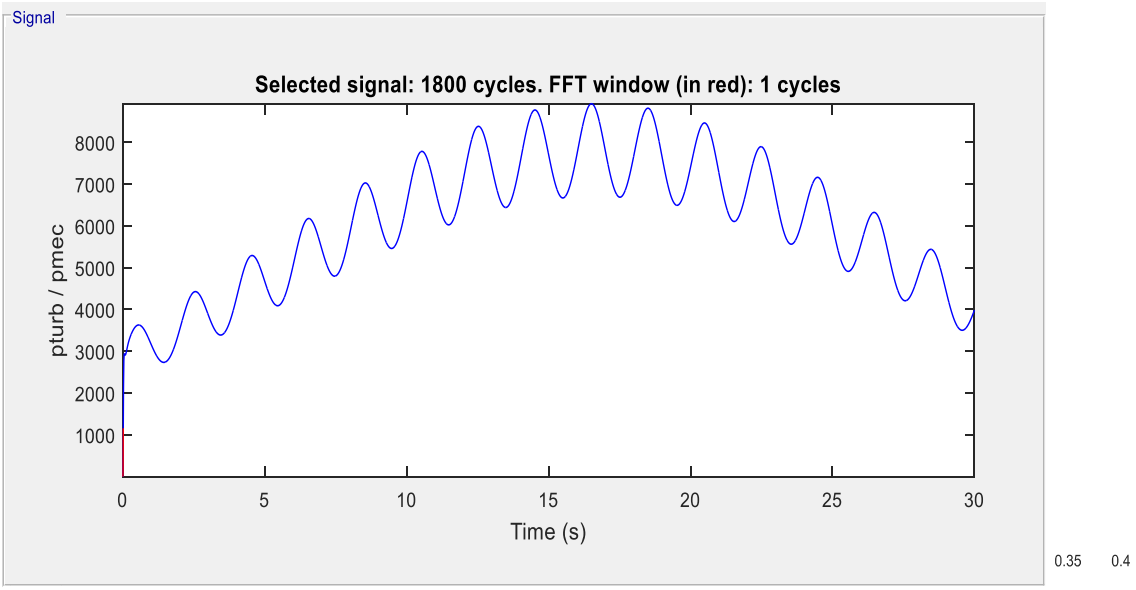


Figure II-19: Résultats de simulation pour la puissance turbine/puissance mécanique

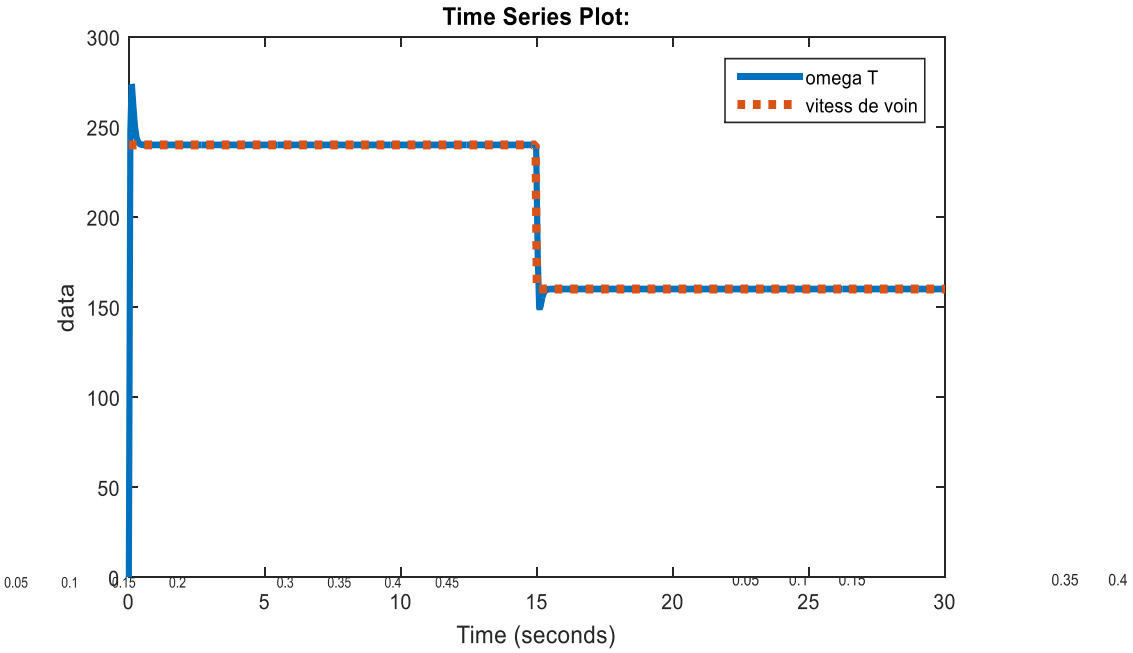


Figure II-20 : Résultats de simulation pour un profil de vent steep attinuer a t=15s

CHAPITRE III :

Commande DTC

III-1 La génératrice synchrone à aimants permanents

La génératrice [26]. A l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés,

L'une des pièces maîtresses d'une chaine de conversion d'énergie éolienne est

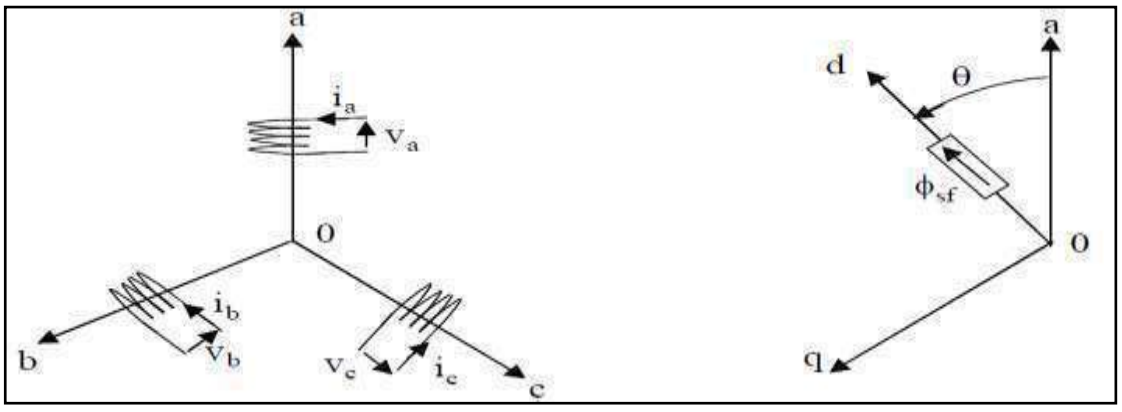
Les machines à aimants sont de plus en plus utilisées. Lorsque leur nombre de pôles est élevé, leurs puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toute fois, Elles sont surtout utilisées pour les petites et moyennes puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Dans ce cas,

L'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que pour les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement

III-2 Mise en équation de la MSAP en triphasée

III-2-1 Equations électriques

Figure (III-1) donne la représentation des enroulements pour une machine synchronetriphasée à aimants permanents.



Stator **rotor**

Figure III-1: Représentation d'une machine synchrone à aimants permanents [29].

Les équations électriques régissant le fonctionnement d'une machine synchrone dans le système d'axe (a, b, c) s'écrivent sous la forme suivante:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\phi_s] \qquad \text{(III.1)}$$

$$\text{Av}[V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \qquad [I_s] = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}; \qquad [\phi_s] = \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix}; \qquad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

(III.2)

- $[V_s]$: vecteur de tensions statoriques ;
- $[I_s]$: vecteur de courants statoriques ;
- $[\phi_s]$: vecteur de flux total au stator ;
- $[R_s]$: matrice des résistances statoriques ;

R_s: Résistance par phase statorique.

III-2-2 Equations magnétiques

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [\phi_f] \qquad \text{(III.3)}$$

Avec

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix}; [[\phi_f]] = \phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \qquad \text{(III.4)}$$

Où

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductance statorique.

ϕ_{sf} : Vecteur flux créé par l'aimant à travers l'enroulement

θ: Position absolue du rotor en degré électrique.

En introduisant (II.1) dans (II.3) on aura :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([l_{ss}][I_s] + [\emptyset_f]) \qquad \text{(III.5)}$$

III-3 Transformation triphasé – diphasé

On remarque que l'équation (III.5) est non linéaire et couplée pour supprimer ce problème on adopte des changements de variable et des transformations qui réduisent la complexité du système, dans ce cas nous procédons à la Transformation de Park. La projection de grandeurs triphasées dans le repère de Park consiste à exploiter la transformation de Concordia et la transformation de Park. On écrit:

$$\begin{bmatrix} Xsa \\ Xsb \\ Xsc \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} X0 \\ Xd \\ Xq \end{bmatrix} = CP(\theta) \begin{bmatrix} X0 \\ Xd \\ Xq \end{bmatrix} \qquad \text{(III.6)}$$

Où : *P (θ)* : est la matrice de la transformation de Park.

C : est la matrice de la transformation de Concordia.

III-3-1 Transformation de Concordia

La transformation directe de Concordia est définie par une matrice [C]. Aux vecteurs originaux [V_{abc}] [I_{abc}] [ϕ_{abc}], la transformation de Concordia fait correspondre les vecteurs originaux [$V_{\alpha\beta0}$] [$I_{\alpha\beta0}$] [$\phi_{\alpha\beta0}$]. Elle est appliquée de manière identique aux tensions, aux courants, et aux flux. La transformation de Concordia est définie par [30,31] :

$$\begin{cases} [X_{abc}] = [X_{\alpha\beta0}][C] \\ [X_{\alpha\beta0}] = [X_{abc}][C]^{-1} \end{cases} \qquad (III.7)$$

Où

[C] est la matrice de transformation directe de Concordia et [C^{-1}] est l'inverse, elles sont données par :

$$[c] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}; [C]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \qquad \text{(III.8)}$$

III-3-2 Transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasésuivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère *abc* vers le repère αβ puis vers le repère *dq*. Le repère αβ est toujours fixe par rapport au repère *abc*, par contre le repère *dq* est mobile.Il forme avec le repère fixe αβ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park.

La transformation de Park est définie par la matrice P, aux vecteurs originaux, $[V_{abc}]$, $[I_{abc}]$ et $[\phi_{abc}]$, la transformation de Park correspond aux vecteurs $[V_{dq0}]$, $[I_{dq0}]$ et $[\phi_{dq0}]$[30,31] et [32].

La transformation de Park est définie par :

$$\begin{cases} [X_{abc}] = [P(\theta)][X_{dq0}] \\ [X_{dq0}] = [P(\theta)]^{-1}[X_{abc}] \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

$[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$sont la matrice de passage directe et inverse, elles sont données par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III.10)}$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III. 11)}$$

III-4 Modélisation de moteur synchrone à aimant permanent dans le plan de Park

La figure (III-2) illustre la schématisation d'une machine synchrone à aimant permanent, biphasée, équivalente, issue de la transformation de *Park*

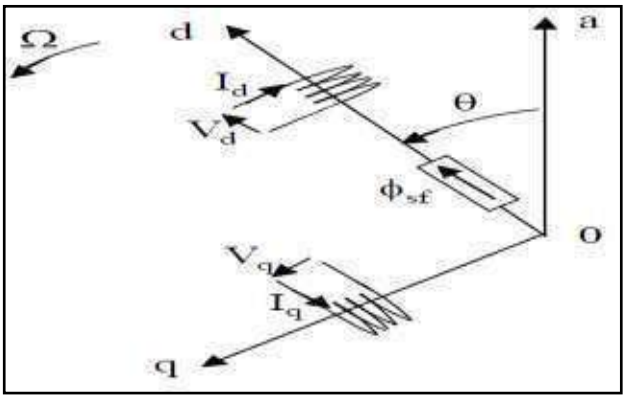


Figure III-2 : Schéma équivalent de la MSAP dans le repère (d,q).

En faisant l'hypothèse que toutes les grandeurs homopolaires sont nulles, le passage dusystème d'équations (III.1) à l'équation dans le repère (d,q) lié au rotor figure (III-2), se fait en utilisant les relations suivantes [9,33 et 34]:

$$\begin{cases} [\boldsymbol{Va, b, c}]^{\boldsymbol{t}} = [\boldsymbol{C}][\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta})][\boldsymbol{Vd, q}]^{\boldsymbol{t}} \\ [\boldsymbol{Ia, b, c}]^{\boldsymbol{t}} = [\boldsymbol{C}][\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta})][\boldsymbol{Id, q}]^{\boldsymbol{t}} \\ [\boldsymbol{\emptyset a, b, c}]^{\boldsymbol{t}} = [\boldsymbol{C}][\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\theta})][\boldsymbol{\emptyset d, q}]^{\boldsymbol{t}} \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

En reportant ces transformations dans le système d'équations (III.1), on obtient :

III-4-1 Équations électriques

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + \frac{d}{dt}\emptyset_d - \omega_r \emptyset_q \\ V_q = R_s I_q + \frac{d}{dt}\emptyset_q + \omega_r \emptyset_d \end{cases} \qquad (III.13)$$

III-4-2 Équations magnétiques

$$\begin{cases} \emptyset_d = L_d I_d + \emptyset_f \\ \emptyset_q = L_q I_q \end{cases} \qquad (III.14)$$

En introduisant (III.14) dans (III.13) on aura Le modèle électrique du MSAP sous laforme suivante :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}\emptyset_d - \omega_r L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}\emptyset_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \emptyset_f \end{cases} \qquad (III.15)$$

III-5 Couple électromagnétique de la MSAP

Le couple électromagnétique dans le référentiel (d,q) est donné par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{3}{2} P\left(\emptyset_f i_q + \left(L_d - L_q\right) i_q i_d\right) \qquad (III.16)$$

III-5-1 Équations du mouvement

Si on néglige le frottement sec, le couple électromagnétique fourni est d'une part transmis à la charge et d'autre part sert à l'accélération du moteur et à la compensation du frottement visqueux. Selon la loi

de mouvement de Newton l'équation fondamentale de la mécanique régissant un corps en mouvement est :

$$J\frac{d\Omega}{\mathrm{dt}} + f\Omega = C_e - C_r$$

Avec :

J : Et le moment d'inertie du moteur.

f: C'est le coefficient de frottement visqueux.

Ce: C'est le couple électromagnétique délivré par le moteur.

Cr: C'est le couple résistant, ou de charge.

Ω : vitesse mécanique de rotation.

III-6 Simulation GSAP SUR MATLAB

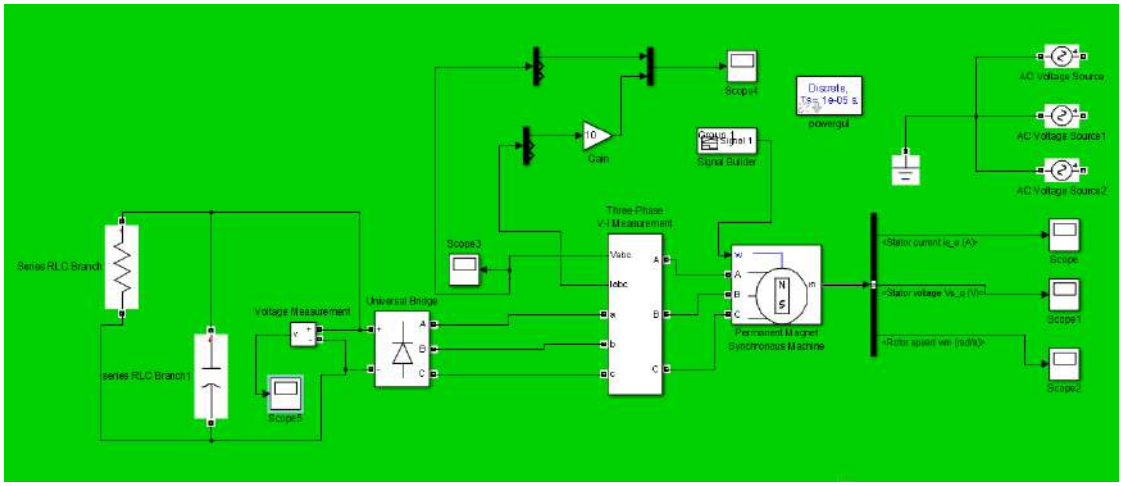


Figure III.3 Schéma bloc d'une GSAP

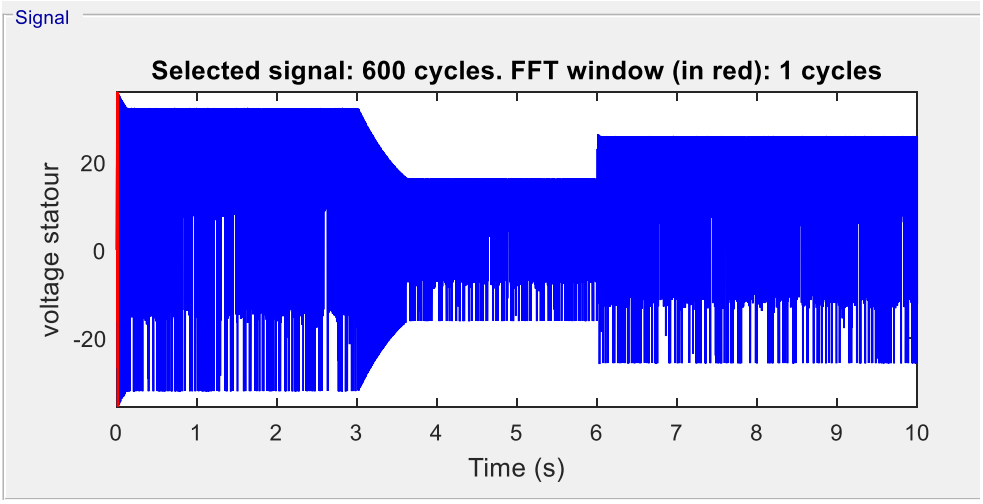


Figure III.4 : Résultats de simulation pour la tension du stator

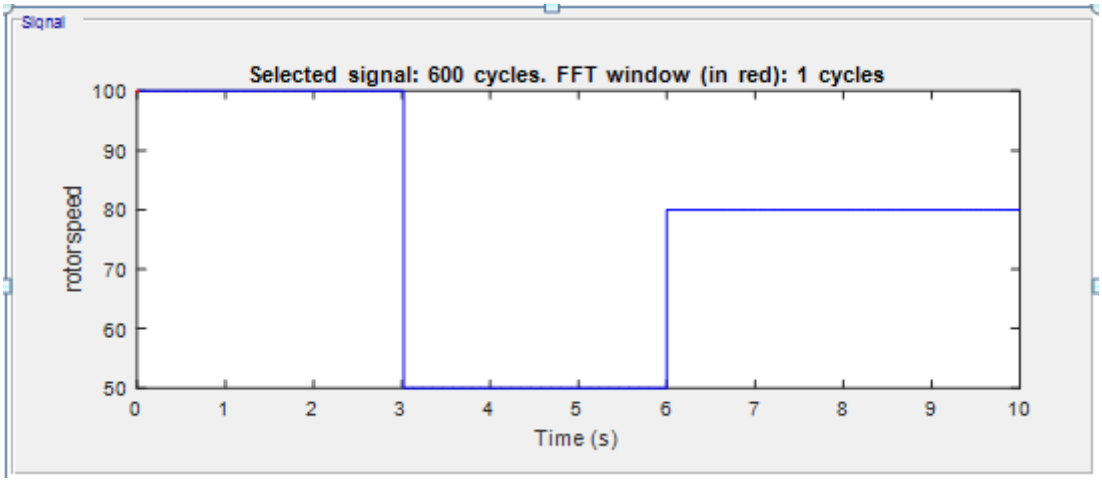


Figure III-5 : Résultats de simulation pour variation de la vitesse du rotore

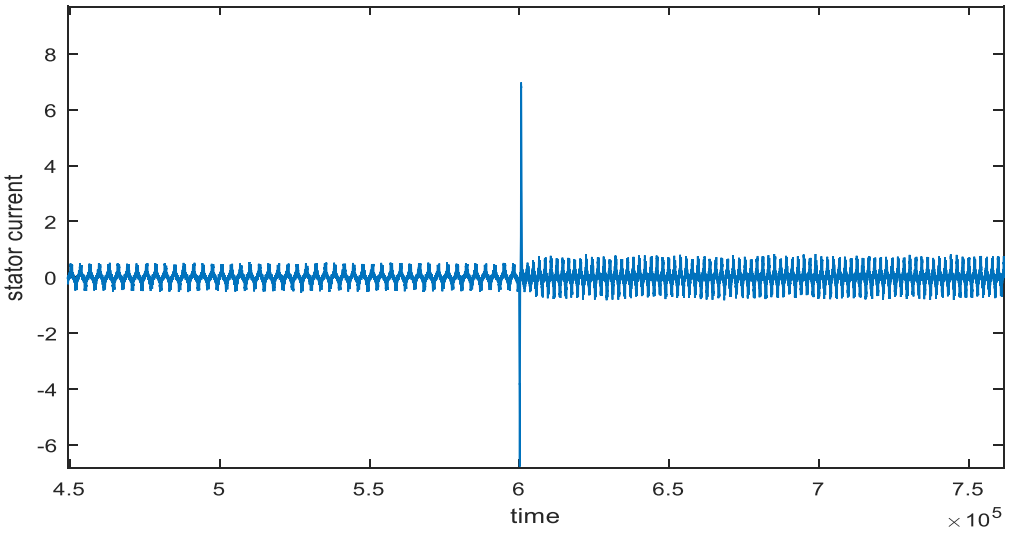


Figure III-6 : Résultats de simulation pour le courant du stator

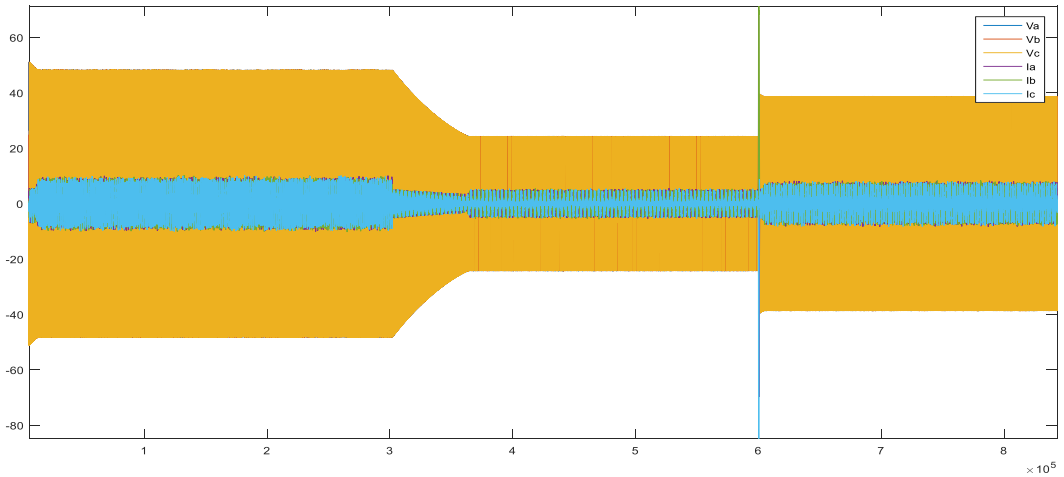


Figure III-7 : Résultats de simulation pour V_{abc} et I_{abc}

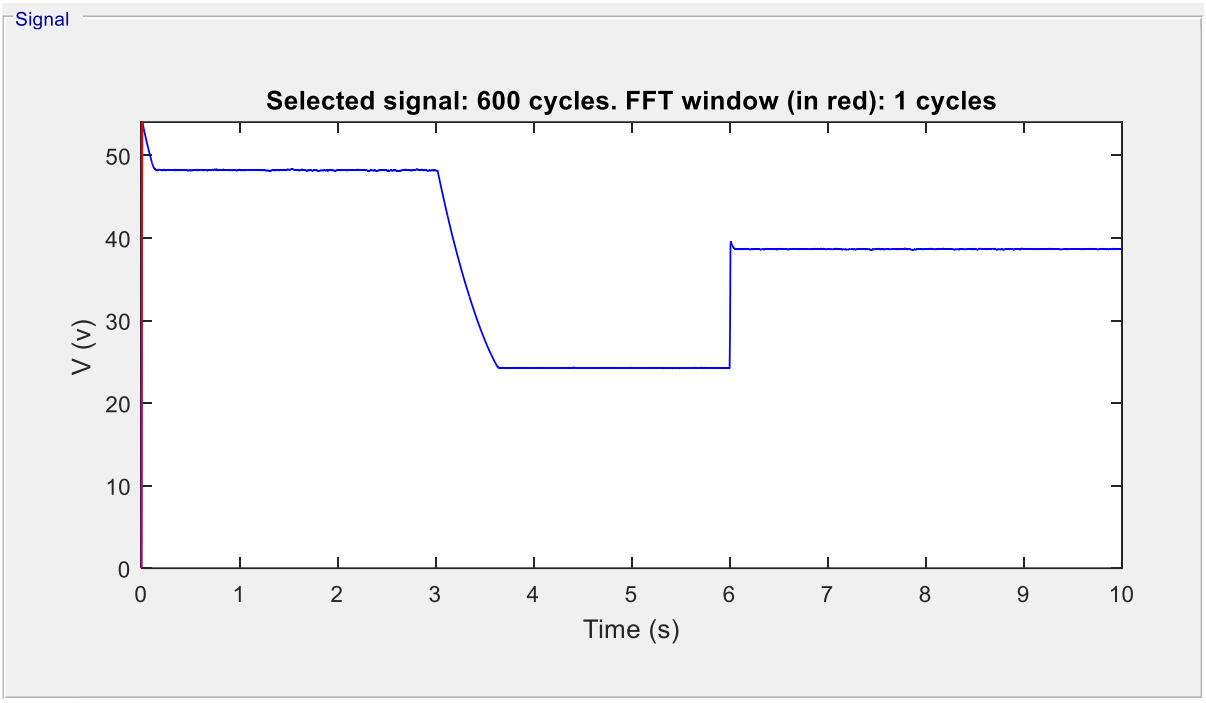


Figure. III.8 : l'allure de tension V

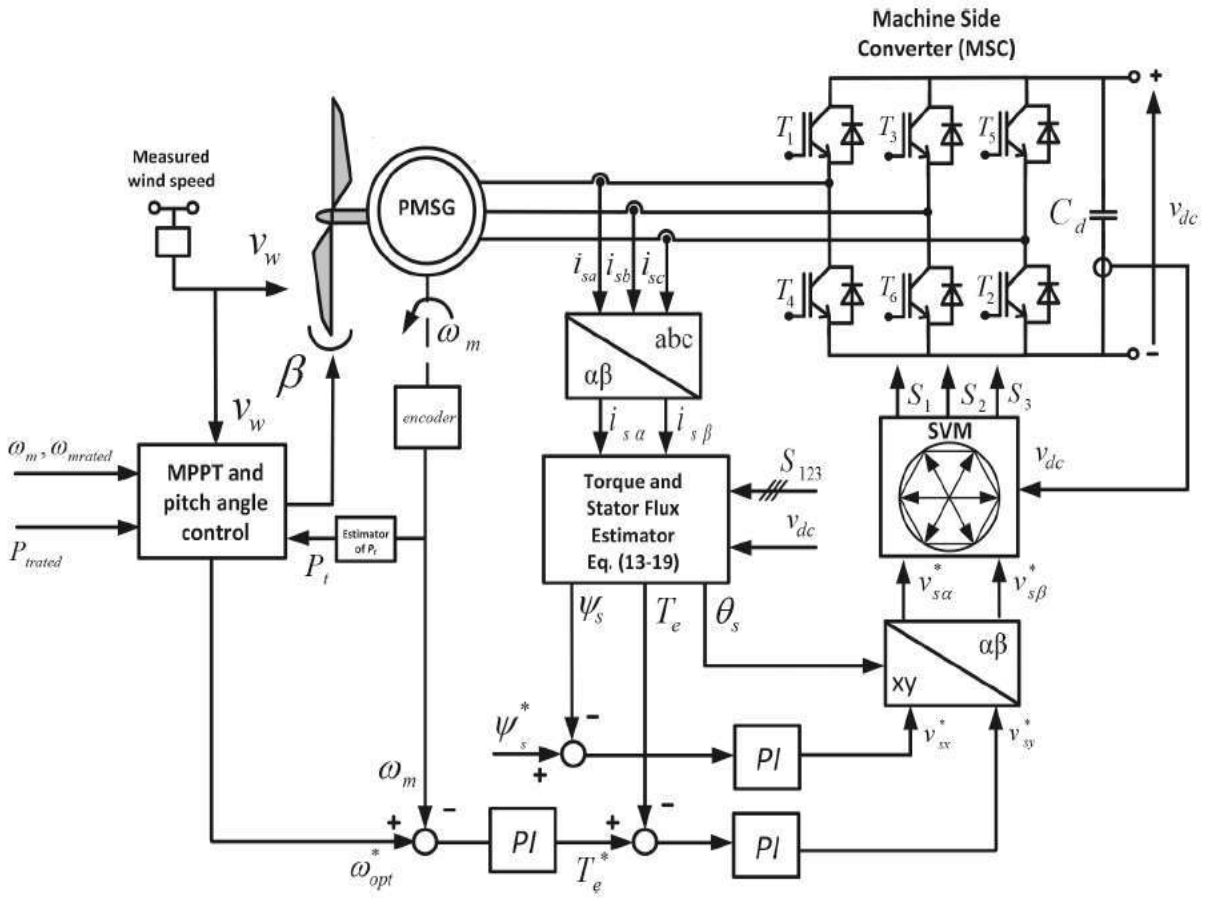


Figure. III.09 : schéma de la commande DTC applique a la GSAP

A la suite de quoi et dans le but de palier les inconvénients de la commande vectorielle, nous avons

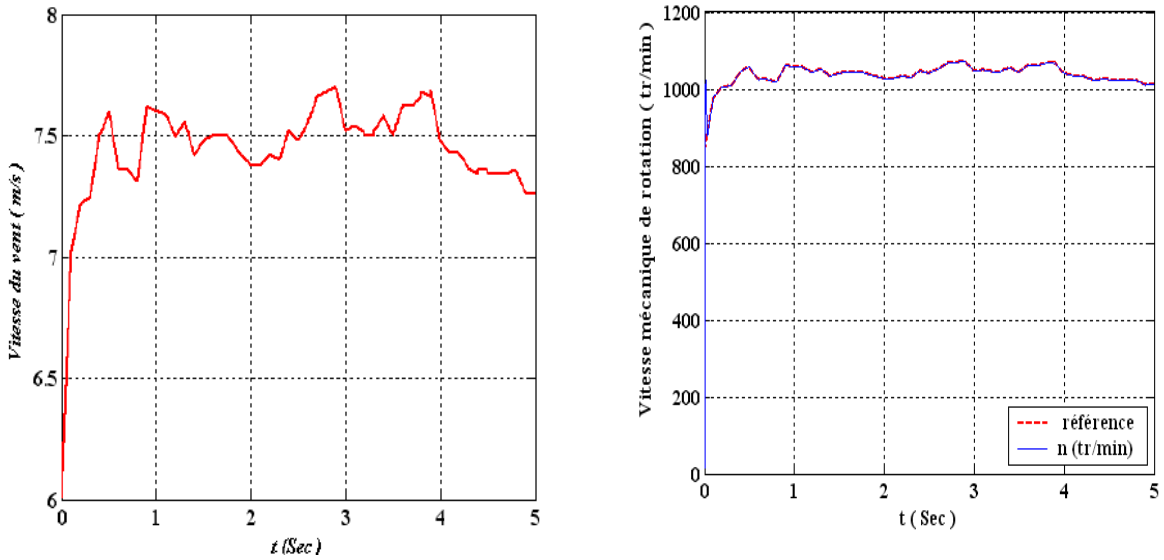
essayé dans le chapitre suivant de proposer une alternative intéressante qui rentre dans le cadre des commandes appliquées à la machine synchrone à aimants permanents, on parle ici d'une commande directe du couple appelée (DTC).

La structure détaillée de la commande directe de couple DTC de la GSAP est présentée par la Fig.III.. Le côté stator (GSAP) du système éolien et sa commande DTC a été testée par simulation sous environnement Matlab Simulink. Le schéma de principe de la commande est donné par la figure III.6. Dans cette partie de simulation nous utilisons une GSAP de 7.5KW.

RESULTATS DE SIMULATION DE LA DTC APPLIQUEE Á LA GSAP

Un vent de 6m/s à 7.5 m/s est appliqué sur les pales ce qui correspond à un mode hypo synchrone de la chaine de conversion. La GSAP tourne en dessous de la vitesse de

synchronisme (Fig. .7). Nous utilisons le bloc MPPT, afin de fonctionné le système éolien dans la zone de fonctionnement optimal (zone 2), c'est-à-dire qu'il produit le maximum de couple (couple de référence) en fonction de la vitesse du vent.



FigIII.10 : Profil du vent et la vitesse de rotation avec sa référence

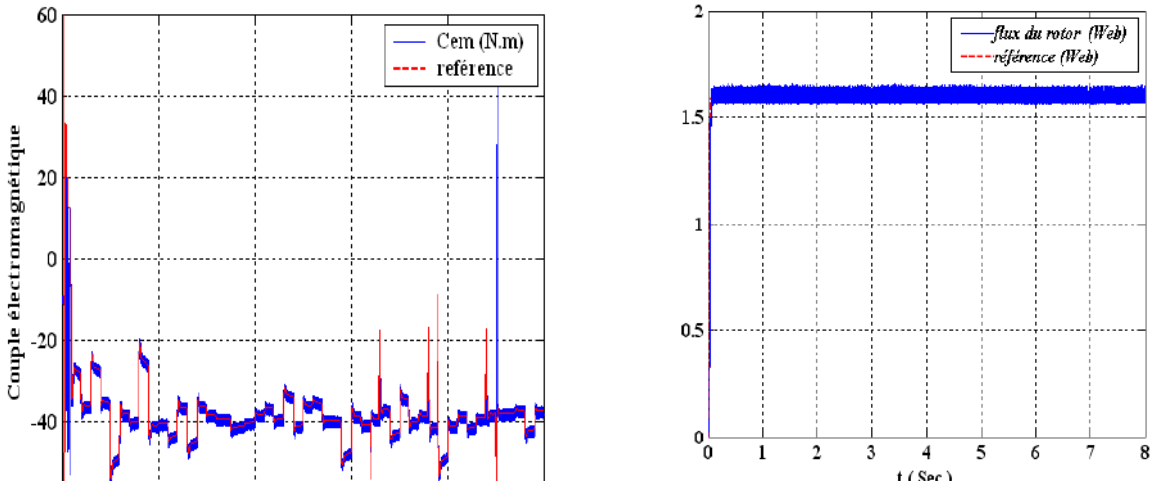


Fig.III.11. Couple électromagnétique et le flux du stator

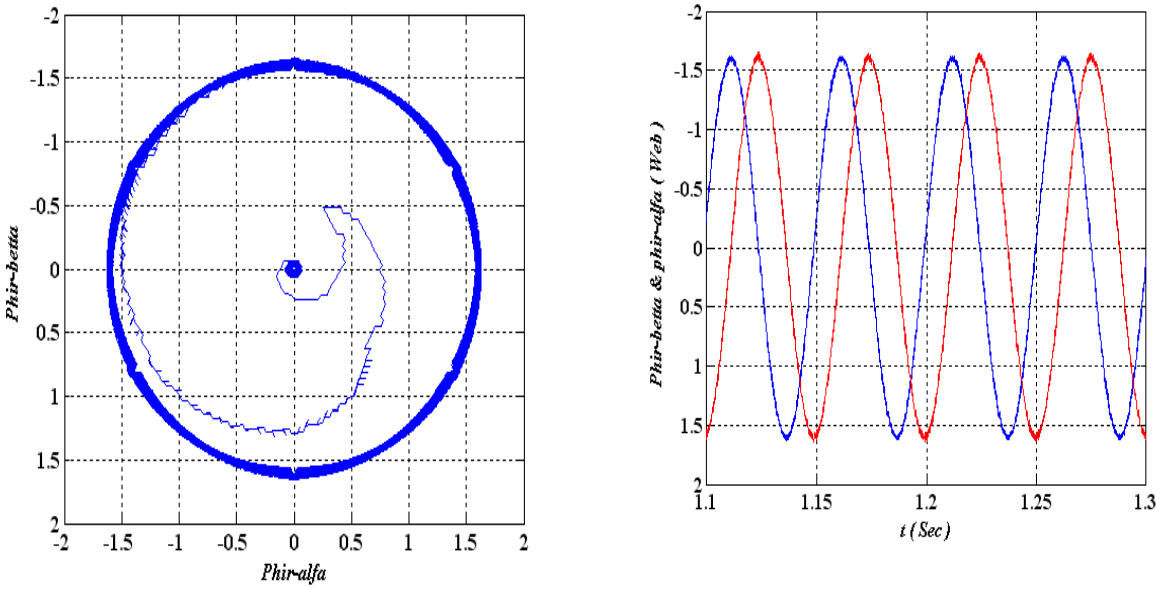


Fig.III.12. Flux statorique dans le plan (α,β)

Les figures .7, 8 et 9 présentes les résultats de simulations pour la commande directe de couple et le flux rotorique. Dans la figure .7 nous apercevons les performances de réglage de vitesse da la GSAP obtenus par la stratégie MPPT. Notons que le bloc MPPT délivre un coulpe de référence optimale. La figure .9, montre que les deux composantes du flux $\psi_{s\alpha}$ et $\psi_{s\beta}$ sont en quadrature et que le vecteur flux rotorique suit sa référence et décrit une trajectoire quasi-circulaire comme le montre la figure .8

La figure .8, illustre les réponses du système et montrent la haute dynamique du couple, on constate que le contrôleur à trois niveaux permet le contrôle de la génératrice dans les deux sens de rotation, mais avec un nombre de commutations plus élevées ce qui augmente les pertes par commutation des interrupteurs. On peut ainsi conclure que l'ensemble des six vecteurs tension actifs fournis par le convertisseur à 2-niveaux sont suffisant pour garantir la stabilité de la régulation découplée du couple et du flux statoriques.

D'autre part nous confirmons l'inconvénient de la DTC par la présence des fortes oscillations du couple et du flux. Ce phénomène d'oscillation va diminuer la durée de vie de la génératrice. Les résultats de simulation montrant la faisabilité et les performances de la configuration de la commande DTC étudié.

III-7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des fondations sur la MSAP, ainsi que sa modélisation sous forme d'équations mathématiques. Par la suite, et en se basant sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices. Pour cela, nous avons établi les équations de la machine ramenée à deux axes, selon la transformation de Park en régime transitoire. Le modèle obtenu est facile à exploiter pour la réalisation des lois de commande avancées. En effet, c'est un modèle qui n'est pas fortement non linéaire. Puis, on a abordé la modélisationde la partie d'alimentation. Le principe de fonctionnement de l'onduleur de tension triphaséea été présenté.

Bibliographie

Bibliographie

[1] M. Rapin, J.M. Noël, “Energie Eolienne, principe - Etude de cas”, Dunod, ISBN: 978-2- 10-050801-3, 2010.

[2] B. Sorensen, « Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects », Copyright. 2004 by Elsevier Science

[3] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l’Ingénieur, BM4 640.

[4] I. Munteanu, A. Iuliana Bratcu, N. Cutululis, E. Ceang, «Optimal Control of WindEnergy Systems», Copyright. 2008 by Springer.

[5] T. GHENNAM, Thèse de Doctorat, «Supervision d’une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d’un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», N° d’ordre: 162/2012.

[6] M. Kassa IDJDARENE, «Contribution à l’Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes», N° d’ordre : 40283/2010.

[7] A. ABDELLI, «Optimisation multicritère d’une chaîne éolienne passive», N° d’ordre : 2519/2007.

[8] E. Hau, «Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics» EditionsSpringer, 2000.

[9] A. Boyette, «Contrôle-commande d’un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne», thèse de doctorat de l’université de Heneri Poincaré, Nancy I, 11-12-2006.

[10] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l’aérogénérateur synchrone à aimant permanant, thèse de magister de l’université de Batna, 13-02-2008.

[11] Frédéric Poitiers, ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE -

Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau

[12] Arnaud Davigny, participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie, Thèse de DOCTORAT de l'universitéde Lille, N° d'ordre : 4066/2007.

[13] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro and H. L. Hey, «A survy on variable-speed wind turbine system», Federal University of Santa Maria – UFSM. Group of Power Electronics and Control – EPOC. 97015-900, Santa Maria, RS, Brazil.

[14] LIVA ERIC RADAOROZANDRY, «conception et optimisation des Machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique», UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2007.

[15] Hacene BENSAADI , Commande DTC-SVM d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents, Mémoire de Magister, Université de Batna, 2012.

[16] Noureddine BOUNASLA, «Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents», Université Ferhat ABBAS Sétif -1 (ALGERIE)/2014.

[17] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.

[18] Techniques de l'Ingénieur, « Convertisseurs et machines électriques », D 3 960

[19] Y. Chen, P. Pillay, A. Khan, « PM Wind Generator Topologies », IEEE Transaction on industry application, vol. 41, No. 6, Novembre/Décembre 2005.

[20] F. Sahin, « Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine », thèse de doctorat de l'Université de Eindhoven, 2001.

[21] A. Davigny – « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.

[22] A. Schmidhofer, H. Weiss – « Optimisation of Power Electronics for small stand alone wind power stations », 10th European Conference on Power Electronics and ApplicationsEPE'03, Toulouse, France, 2003, pp. 1-6.

[23] L. Leclercq – « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2004.

[24] LATRECHE Mohammed Tahar «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012

[25] Adam MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance», THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, Nº d'ordre : 2213/2005.

[26] **Fateh Louar,** Fawzi Senani, Fares Bourourou, Ahmed Ouari «Wind Conversion Chain Model Simulation with Closed Loop PI Controler», Int Conf Tunisia ACECS 2014.

[27] Dr. Gary L. Johnson, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001

[28] Guy Cunty, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », © Edissud,
Aixen-Provence, 2001, www.edisud.com

[29] L.Leclerco, « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », thèse de doctorat de l'université de Lille, n° d'ordre : 3563, UFRR IEEEA Décembre 2004.

[30] **Louar Fateh**, Ouari Ahmed, Omeiri Amar, Djellad Abdelhak, Bouras Lakhdar,
«Modeling and control of a permanent magnet synchronous generator dedicated toStandalone Wind Energy Conversion System », Article FIE

[31] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire demagister Université de Batna, 2010.

[32] S. El-Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabilité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL),06 décembre 2004.

[33] Hamecha samira «Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanant», Thèse de Magister, université de Tizi ouzou, 2013.

[34] S.R.Guda, « Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation ». thèse de master de l'université de Bozeman, Monata. Juillet 2005

[35] H. Camblong, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'éléctricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers de Bordeaux, Décembre 2003.

[36] A.D. Hansen, C.Jauch, P.Sørensen, F.Iov, F. Blaabjergm, « Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT », projet de recherche, laboratoire national de Riso, Roskilde. Décembre 2003.

[37] Benamor Messaoud «commande par DTC de la machine à induction sans capteur de vitesse. Utilisation du filtre de kalman pour l'estimation de la vitesse», Mémoire de Magister d'Université de Batna, 20/06/2012.

[38] O.Gergaud, BMulton. H.Ben Ahmed, « Modélisation d'une chaine de conversion éolienne», Electronique du Futur.2001.pp.17-22.Nancy. Novembre 2001

[39] GASSAB SAMIR «Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne» mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.

[40] **K. Fairouz,** « Centrale Eolienne et Qualite de L'energie Electrique », thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2012

[41] Mme HAMECHA Samira, Ep.BOUREKACHE « Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents »,