

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : Electrotechnique

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Simulation du fonctionnement en génératrice d'une
machine synchrone à aimants permanents : Applications à
l'éolienne**

Présenté par : *DRICI AYA*

TAZIR MOUNA

Encadrant : *Ourici Amel*

Professeur

Université BADJI MOKHTAR - ANNABA

Jury de Soutenance :

MM.BENABDA Amina	MAB	Université Badji Mokhtar- ANNABA	Président
MM.OURICI Amel	Professeur	Université Badji Mokhtar- ANNABA	Encadrant
M.CHINE Abdelghani	MAA	Université Badji Mokhtar- ANNABA	Examineur

Année Universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENT

Nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de commencer et de terminer ce message. Au départ, ce travail n'aurait pas été riche et n'aurait pas été possible sans l'aide et l'encadrement de Mme **Ourici Amal**. Nous la remercions pour la qualité exceptionnelle de son encadrement, sa patience, sa précision et sa disponibilité lors de notre préparation. De ce travail. Nous remercions également tous les enseignants pour leur générosité et leur grande patience, malgré leurs responsabilités académiques et professionnelles

TAZIR MOUNA, DRICI AYA

Dédicace

﴿ بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ ﴾

قبل كل شيء أنا فخورة بنفسي و أود شكر نفسي أولا

A moi-même

Avec tous mes sentiments de respect. Avec l'expérience de ma reconnaissance, je dédie ma remise de diplôme et ma joie

A mon paradis a la prunelle de mes yeux à la source de ma vie et mon bonheur, ma lune et le fil d'espoir qui allumer mon chemin, ma moitié, maman (makhlouf warda)

A celui qui m'a fait une femme, ma source de vie, d'amour et d'affection, a mon support qui était toujours à mes cotes pour me soutenir et m'encourage, à mon prince papa (Drici Hamid)

A mon bouclier dans ma vie, le deuxième support de ma vie après mon père qui m'encourage à chaque étape de mes études, mon seul frère (Seif Eddine)

A mon adorable petite sœur (Ratouja), l'amie de ma vie , qui m'a partagée tous mes sentiments dans ce travail

A tout les membres de ma grande famille (famille MAKHLOUF) et (famille DRICI)

A le mari de ma tante, tonton Nouar

A Mes grandes mères

اكتفيت بعائلتي

Sans oublier mon binôme (Mouna) pour son soutien moral sa patience compréhension tout au long ce projet

DRICI AYA

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avec tous mes sentiments de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance,
je dédié ma remise de diplôme et ma joie à mon paradis a la prunelle de mes yeux à la
source de ma vie et mon bonheur ma

Maman

Pour celle dont je porte fièrement le nom, mon soutien, ma force et ma fierté

Mon père

À ceux avec qui je suis plus grand, et avec qui je gagne en force et en amour, et avec qui
je connais le sens de la vie

Ma sœur (Sihem) et mes frères (Nacer et Ramzi)

À mes adorables (Marwa, Bouchra) pour leur soutien indéfectible et leur amour
constant

À ceux avec qui j'ai connu la loyauté et le don

Mes amis

Sans oublier mon binôme (Aya) pour son soutien moral sa patience compréhension tout
au long ce projet

Finalement, celui qui a dit : « Je suis à elle », « il l'a eu » et je suis à elle.

TAZIR MOUNA

REMERCIEMENT

DIDICACE

RESUME

NOTATIONS ET ABREVIATIONS

LISTE DES FIGURES

SOMMAIRE :

Introduction Générale..... 1

Chapitre I
Généralités sur l'énergie éolienne

I.1) Introduction : 2

I.2) Les Energies renouvelables : 2

 I.2.1) Energie hydraulique (hydroélectricité) : 2

 I.2.2) Energie solaire : 3

 I.2.3) Energie géothermie : 3

 I.2.4) Energie de la biomasse : 4

 I.2.5) L'Energie éolienne : 5

 I.2.5.1) Historique de l'énergie éolienne : 6

 I.2.5.2) L'énergie Eoliennes en Algérie 6

 I.2.5.3) Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne : 7

 I.2.5.4) Les différents types d'éoliennes..... 9

 I.2.5.4.1) Eolienne à axe vertical : 9

 I.2.5.4.2) Eoliennes à axe horizontal : 9

 I.2.5.5) Principales composants d'une éolienne..... 10

 I.2.5.6) Principe de fonctionnement des éoliennes : 11

 I.2.5.7) Les éoliennes à vitesse variable : 12

 I.2.5.8) Les éoliennes à vitesse fixe: 13

 I.2.5.9) Constitution d'une éolienne moderne : 15

 I.2.5.10) Modélisation de la turbine éolienne : 15

 I.2.5.10.1) Modélisation de vent 15

 I.2.5.10.2) Modélisation de la turbine 16

 I.2.5.10.3) Modèle du multiplicateur : 19

 I.2.5.10.4) Equation dynamique de l'arbre de transmission : 19

 I.2.5.10.5) Stratégies de commande de la turbine éolienne 20

 I.2.5.10.6) Résultats de simulation: 24

I.3) Conclusion :	27
-------------------------	----

Chapitre II

Généralités sur la machine synchrone à aimants permanents

II.1) Introduction	28
II.2) PRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS	28
II.2.1) STRUCTURE DES INDUCTEURS DES MACHINES A AIMANTS :	29
II.2.1.1) Structure sans pièce polaire (SPP) :	29
II.2.1.2) Structure avec pièce polaire (APP) :	31
II.2.2) PROPRIETES D'AIMANT PERMANENT	31
II.2.3) CHOIX D'AIMANTS PERMANENTS UTILISES POUR LA MSAP	33
II. 3) Catégories de la MSAP	34
II.4) Types de machines synchrones à aimants permanents (MSAP)	35
II.4.1) Classification par structure du flux magnétique:	35
II.4.2) Classification par position des aimants:	36
II.4.3) Classification par type de rotor:	36
II.5) Différents modes de réglage de vitesse de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) : ..	36
II.6) Modes de freinage de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	38
II.7) Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) :	39
II.7.1) Hypothèses simplificatrices [14].	39
II.7.2) Mise en équation de la MSAP [12].	40
II.7.2.1) Equations des tensions statoriques	41
II.7.2 .2) Passage au repère de Park	41
II.7.2.3) Modèle de la MSAP dans le repère de Park	42
II.7.3 Modélisation de la génératrice à vide	44
II.7.3.2) Schémas bloc de la génératrice à aimants permanents à vide	44
II.7.3.3) Résultats de simulation du GSAP à vide	44
II.7.4 Modélisation de la génératrice en charge [12] :	46
II.7.4.1) Equation d'état :	46
II.7.4.2) Modélisation de l'onduleur de tension [30,31].	47
II.7.4.3) Schémas bloc de la génératrice à aimants permanents en charge	49
II.7.4.4) Résultats de simulation de GSAP en charge	50
II.8) Avantages de la MSAP	53
II.9) Inconvénients de la MSAP	54

II.9) DOMAINE D'APPLICATION DE LA MSAP	54
II .10) Conclusion :	55

Chapitre III

Modélisation globale de la chaîne de conversion de l'aérogénérateur GSAP

III.1) Introduction.....	56
III.2) Alimentation utilisant redresseur à diode et onduleur contrôlés par MLI, [12,14] :	56
III.3) Modélisation du redresseur triphasé double alternance à diodes, [32].	56
III.4) Modélisation du filtre, [32].....	57
III.5) Modèle complet de la chaîne de conversion éolienne :	58
III.5.1) Modèle utilisant des interrupteurs idéaux des convertisseurs de puissance :	58
III.5.2) Chaîne de conversion éolienne :	59
III.6) Résultats de simulations	59
III .7) Conclusion	63

Annexe

Références Bibliographiques

Table des figures

Table des figures	Page
Fig.I 1 l'énergie hydraulique-mon energie vert.....	2
Fig.I 2 énergies hydraulique-mission énergie.....	2
Fig.I 3 panneaux solaires	3
Fig.I 4 l'énergie géothermique	4
Fig.I 5 source d'énergie géothermique	4
Fig.I 6 l'énergie biomasse (le cycle du ccarbone).....	4
Fig.I 7: Technologie éolienne à axe horizontale.....	5
Fig.I 8: principe de convention de l'énergie.....	5
Fig.I 9: conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Fig.I 10: eolienne de 100KW de grand vent	7
Fig.I 11: Eolienne d'adrar.....	7
Fig.I 12: technologie éolienne à axe vertical	9
Fig.I 13: technologie éolienne à axe horizontale	10
Fig.I 14 : constitution d'une éolienne.....	11
Fig.I 15 :puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.....	12
Fig.I 16: puissance théorique disponible au niveau de la turbine	13
Fig.I 17: eolienne directement connecté au réseau	14
Fig.I 18: caractéristique couple-vitesse d'unne machine asynchrone	14
Fig.I 19: différentes parties d'ue éolienne	15
Fig.I 20: Simulationn du profil de la vitesse du vent.....	16
Fig.I 21: Turbine tripale ($R_v = 1,25m$)	17
Fig.I 22: les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg)	18
Fig.I 23: caractéristique uissance , vitesse du vent et vitesse de rotation	20
Fig.I 24: caractéristique puissance-vitesse typique d'une éolienne à grande puissance	21
Fig.I 25: MPPT avec asservissement de la vitesse	22
Fig.I 26: couple de réfirence en fonction de la vitesse de rotation	24
Fig.I 27: simulation du profil de la vitesse du vent.....	24
Fig.I 28: Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse.....	25
Fig.I 29: résultat de la simulation de la turbine avec asservissement de la vitesse.....	26
Fig.II. 1: Machine synchrone à aimants permanents	28
Fig.II. 2: a)stator d'une machine synchrone MSAP b) photographie d'un rotar	29
Fig.II. 3: machine synchrone a aimants ($p=2$), sans pièce polaire, aimantation radiale	30
Fig.II. 4: machine synchrone à aimants $2=P$ sans pièce polaire aimantation tangentielle.....	30
Fig.II. 5 :machine synchrone a aimants $p=2$ avec piece polaire aimantations radiale les pp sont sur la périphérie des aimants.....	31
Fig.II. 6: machine synchrone à aimants $p=4$ avec pièce polaire aimantation tangentielle.....	31
Fig.II. 7: courbe de désaimantation d'un matériau pour aimant permanent.....	32
Fig.II. 8: caractéristique $B(H)$ de l'aimant permanent idéal.....	32
Fig.II. 9: caractéristiques des aimants permanents	33
Fig.II. 10: machine synchrone à aimants permanents montés en surface	34
Fig.II. 11: machine synchrone à aiments permanents insérés.....	34
Fig.II. 12: machine synchrone à aimants permanent chapeautés.....	35
Fig.II. 13: machine synchrone à aimants permanents enterré.....	35
Fig.II. 14: a- machine asynchrone b- machine synchrone à aimants permanents (MSAP).....	40
Fig.II. 15: shémas représentatif de la MSAP à modéliser.....	40

Fig.II. 16: transformation triphasée-diphasée	41
Fig.II. 17: schémas bloc de la génératrice à aimants permanents à vide	44
Fig.II. 18 couple moteur et vitesse de rotation.....	45
Fig.II. 19: les tensions U_d et U_q	45
Fig.II. 20: les tensions U_a U_b et U_c	46
Fig.II. 21: schémas de l'onduleur triphasé	48
Fig.II. 22 schéma bloc de la génératrice à aimants permanents en charge	50
Fig.II. 23: Les tensions U_a U_b et U_c	51
Fig.II. 24 : Les courants i_a i_b i_c	51
Fig.II. 25: vitesse de rotation	52
Fig.II. 26: couple électromagnétique et couple moteur	52
Fig.II. 27: tension de phase U_{as}	53
Fig.II. 28: les tensions U_{as} U_{bs} et U_{cs}	53
Fig.III. 1 :Alimentation avec un redresseur à diodes	56
Fig.III. 2: représentation de la redresseur triphasé double alternance	57
Fig.III. 3: Représentation d'un filtre passe-bas	57
Fig.III. 4: schéma bloc du redresseur et du filtre	58
Fig.III. 5; Modèle à interrupteurs idéaux de la chaîne de conversion éolienne avec GSAP	58
Fig.III. 6: Schéma bloc de la chaîne de la conversion éolienne	59
Fig.III. 7: Profile du vent appliqué à la turbine.....	59
Fig.III. 8: Allure des Puissances active et réactive	60
Fig.III. 9: Allure des Tensions statoriques V_{abc} de la GSAP	60
Fig.III. 10: Allure des Tensions redressé et filtrée.....	61
Fig.III. 11: Allure de la tension à la sortie de l'onduleur	62
Fig.III. 12: Allure des courants	62

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents.

MCC : Machine à courant continu.

(abc) : Modèle réelle de la machine triphasé.

(d-q) : Modèle de Park.

MLI : Modulation de largeur d'impulsion.

CSV : Commande à structure variable.

ϕ_f et ϕ_{sf} : flux engendré par les aimants.

R_s : Résistance statorique.

$S_{\text{éolienne}}$: La surface balayée par éolienne.

P_{vent} : Puissance de vents.

ρ : La masse volumique de l'aire.

V_v : La vitesse de vent.

λ_{opt} : La vitesse spécifique optimale.

C_{opt} : Coefficient de puissance optimale.

$P_{\text{éolienne}}$: La Puissance extraite par l'éolienne.

C_p : Coefficient de puissance.

R : Rayon des pales de l'éolienne.

Ω vitesse de rotation de la turbine.

λ : La vitesse spécifique.

β : L'angle de calage (l'angle de l'orientation des pales).

C_g Couple de la génératrice.

$C_{\text{éolienne}}$: Coulpe de l'éolienne (aérodynamique).

G : Rapport de multiplication.

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

C_{em} Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

f : Le coefficient de frottement.

MPPT : Maximum Power Point Tracking

P_{nom} : Puissance nominale.

C_{em-ref} : Couple électromagnétique de référence.

K_{ass} : Régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : Vitesse de référence.

$\Omega_{turbine}$ La Vitesse de rotation de la turbine.

$\Omega_{turbine-ref}$: La vitesse de référence de la turbine.

C_{pmax} : Le Coefficient de puissance maximale.

C_{mec} : Le couple mécanique.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

C_{em-ref} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

$C_{aér-est}$: Le couple aérodynamique estimé.

$V_{estimé}$: La valeur estimée de la vitesse du vent.

$\Omega_{turbine-estimé}$: La vitesse estimée de la turbine.

V_A, V_B, V_C Tension aux phases A, B et C.

I_A, I_B, I_C : Courant aux phases A, B et C.

ψ_A, ψ_B, ψ_C Flux aux phases A, B et C.

R_s : la résistance des phases statoriques.

ψ_f Flux des aimants permanents

U_d Tension selon l'axe d.

U_q Tension selon l'axe q.

I_d Courant selon l'axe d.

I_q Courant selon l'axe q.

Ψ_d Flux selon l'axe d.

ψ_q Flux selon l'axe q.

ω Vitesse de rotation électrique $\omega = P \cdot \Omega$

L_d Inductance statorique selon l'axe d.

L_q Inductance statorique selon l'axe q.

C_{em} Couple électromagnétique.

w_e Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : Nombre de paire de pôle.

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

R_{ch} Résistance de charge.

L_{ch} : Inductance de charge.

S : Opérateur dérive de Laplace.

I_{ds}, I_{qs} : Composant direct du stator dans le repère Park.

MLI : Modulation de largeur d'Impulsion.

RESUME

Ce mémoire porte sur la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents. Tout d'abord, un modèle pour chaque composant de la chaîne de conversion est proposé. Ces différents composants sont ensuite interconnectés pour former un modèle complet, qui est implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats des simulations obtenues permettent d'analyser le comportement du dispositif éolien et fournissent des informations utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

This work focuses on the simulation of a wind energy conversion chain using a permanent magnet synchronous generator. First, a template for each component of the conversion chain is proposed. These different components are then interconnected to form a complete model, which is implemented in the Matlab/Simulink environment. The results of the simulations obtained make it possible to analyse the behaviour of the wind turbine system and provide useful information on the behaviour of the wind turbine.

تركز هذه الأطروحة على محاكاة سلسلة تحويل طاقة الرياح باستخدام مولد متزامن مغناطيسي دائم. أولاً ، يقترح نموذج لكل Matlab / مكون من مكونات سلسلة التحويل. ثم يتم ربط هذه المكونات المختلفة لتشكيل نموذج كامل ، يتم تنفيذه في بيئة Simulink. وتمكن نتائج عمليات المحاكاة التي تم الحصول عليها من تحليل سلوك نظام توربينات الرياح وتوفير معلومات مفيدة عن سلوك توربينات الرياح.

Introduction Générale

Introduction Générale

De nos jours, plus de 85 % de l'énergie mondiale est issue de réserves de combustible fossile (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium, formées au fil des âges et de l'évolution géologique qui les constituent. L'épuisement de ces réserves et l'augmentation de la demande d'énergie

Au niveau mondial, les pays industrialisés ont été poussés à rechercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La croissance de la filière nucléaire était déjà en cours, cependant son adoption à grande échelle peut entraîner des conséquences sérieuses, notamment pour l'environnement en raison de la pollution et des accidents nucléaires. Les scientifiques ont mis au point une nouvelle forme d'énergie appelée « énergie renouvelable ». Toutes ces énergies renouvelables présentent l'immense bénéfice d'être d'origine naturelle, inépuisables et non polluantes, car elles ne produisent pas de gaz favorisant la pollution. [3]

Depuis les civilisations anciennes, l'homme a appris à avoir de la force et a réalisé qu'il pouvait s'en procurer dans la nature pour prospérer sur terre et surmonter les difficultés qu'il rencontre dans sa quête quotidienne de progrès. L'un de ces

Le vent, qui est désormais connu sous le nom d'énergie éolienne, est une force naturelle.⁸ qui connaît une forte croissance à l'échelle européenne et mondiale.

L'objectif d'une éolienne est de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Dans cette étude, nous examinerons une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Le présent mémoire est structuré de la façon suivante :

Le premier chapitre traite et présente de manière générale les divers systèmes d'énergies renouvelables utilisés pour produire de l'électricité, leurs technologies, leurs architectures et leur principe de fonctionnement, tout en mettant en évidence les bénéfices qu'ils offrent et les désavantages de chacun. Et On présente une vision globale du système éolien. La modélisation de la turbine éolienne est également incluse.

Le chapitre suivant se concentre sur la modélisation et la simulation du générateur synchrone à aimant permanent en question, qui constitue une étape essentielle dans l'analyse du système. Il présente son modèle mathématique en vue de sa commande dans la chaîne de commande. élaboration d'électricité ont été modélisés et simulés dans l'environnement Matlab/Simulink. La présentation et la discussion des résultats de la simulation ont été effectués dans la dernière partie de ce chapitre.

En ce qui concerne la modélisation globale de la chaîne de conversion de l'aérogénérateur GSAP, le troisième chapitre se concentrera sur les résultats de simulation. Les conclusions de la simulation de ce chapitre ont été exposées, étudiées et discutées en fin de chapitre.

Enfin, nous terminons par une conclusion générale suivie de quelques perspectives.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

I.1) Introduction :

La consommation mondiale d'énergie électrique ne cesse d'augmenter, ce qui entraîne des effets négatifs importants, principalement causés par l'épuisement, l'incertitude et l'instabilité des prix des énergies fossiles, l'environnement, les émissions, les gaz à effet de serre, la libéralisation du marché électrique et des services. Le réchauffement climatique et le développement durable présentent l'une des possibilités d'accroître le taux.

Actuellement, environ 20 % de la production mondiale d'électricité provient des énergies renouvelables telles que l'énergie hydraulique, solaire, éolienne, biomasse et géothermique. Dans ce contexte, l'énergie renouvelable émerge comme source alternative, propre et inépuisable d'énergie dans un avenir énergétique avancé. [1]

La technologie des capteurs éoliens a évolué depuis l'introduction du moulin à vent. Au début des années quarante, de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Il existe différentes méthodes pour capter l'énergie du vent, telles que les capteurs à axe vertical ou horizontal. [2]

Dans ce chapitre, On découvre certaines énergies renouvelables une brève description des systèmes éoliens serait présentée, quelques notions principales sur la technologie éolienne seraient données

I.2) Les Energies renouvelables :

I.2.1) Energie hydraulique (hydroélectricité) :

Avant l'ère de l'électricité, l'eau était une des sources d'énergie les plus importantes et a été utilisée par de nombreuses civilisations. Les moulins à eau, situés le long des cours d'eau, en sont un exemple bien connu. Bien que de nombreux sites soient parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation aujourd'hui. De nos jours, l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages pour la production d'électricité. Le principe est simple : la force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique. L'électricité peut ensuite être utilisée directement, stockée en batteries ou injectée dans le réseau de distribution. La hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau sont deux facteurs qui déterminent le développement de la puissance. [3]



Fig.I 1 l'énergie hydraulique-mon energie vert

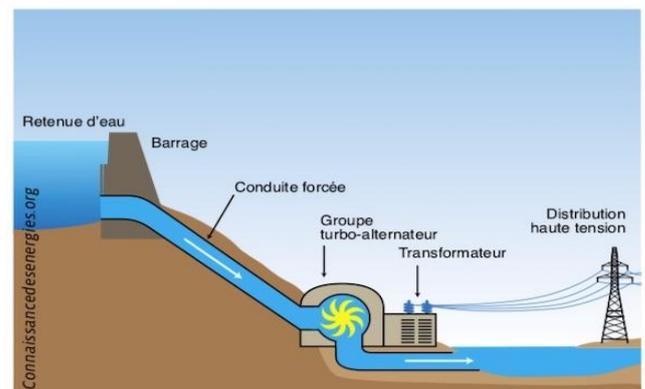


Fig.I 2 énergies hydraulique-mission énergie

I .2.2) Energie solaire :

Il s'agit d'une forme d'énergie renouvelable qui provient directement de la captation du rayonnement solaire. L'énergie solaire est produite par des réactions thermonucléaires qui se produisent à l'intérieur du soleil, ce qui génère un rayonnement électromagnétique extrêmement puissant.

Le rayonnement solaire reçu par la terre varie de 1350 à 1450 W/m² par an, ce qui en fait une source d'énergie presque inépuisable. Le rayonnement est ensuite partiellement réfléchi et absorbé par l'atmosphère, de sorte que le rayonnement reçu au sol comprend une partie directe et une partie diffuse, avec des valeurs allant de 200 W/m² (au zénith par ciel couvert) à environ 1000 W/m². La simulation des systèmes d'énergie solaire permet et fournit des méthodes de calcul pour estimer la ressource solaire. Les deux principaux modes de fonctionnement des capteurs utilisés pour absorber et rediffuser l'énergie solaire sont les suivants : Les panneaux solaires photovoltaïques captent l'énergie solaire pour produire de l'électricité.

Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques): la chaleur captée par les rayons solaires est rediffusée et est plus rarement utilisée pour produire de l'électricité.

La plupart des applications sont simples, dans des domaines aussi variés que l'agriculture, par la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et de chauffage. Il y en a beaucoup sur toute la surface de la terre et il y en a encore beaucoup qui atteignent la surface. Ainsi, dans les régions tempérées, on peut s'attendre à 1000 W/m² et jusqu'à 1400 W/m² lorsque la poussière ou l'eau polluent légèrement l'atmosphère. [1]



Fig.I 3 panneaux solaires

I.2.3) Energie géothermie :

L'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre, du grec "géo" (terre) et "thermos" (chaud). Elle est principalement causée par la désintégration des éléments radioactifs qui sont naturellement présents dans les roches du sous-sol.

Des flux de vapeur et d'eaux chaudes circulent dans certaines roches et à certaines profondeurs. Tous les 30 mètres de profondeur, la température des roches augmente de 1 degré Celsius. Cela peut aller jusqu'à 100 °C par 100 m dans certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre. L'énergie fournie par le soleil est en moyenne dix mille fois plus faible à la surface de la terre.

L'énergie géothermique n'est donc utilisable que dans des zones particulières où elle s'est accumulée.[3]

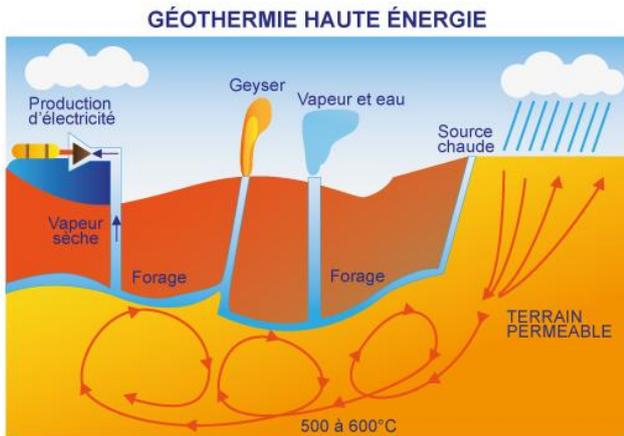


Fig.I 4 l'énergie géothermique



Fig.I 5 source d'énergie géothermique

I.2.4) Energie de la biomasse :

La forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme depuis la découverte du feu à la préhistoire est l'énergie de la biomasse. C'est l'ensemble de la matière organique d'origine biologique, qu'elle soit végétale ou animale par exemple, ainsi que les matériaux qu'ils produisent, comme le bois et les déchets. Tant que sa consommation ne dépasse pas l'accroissement biologique, la biomasse est une énergie renouvelable.

La production d'électricité peut être obtenue à partir de la chaleur produite par la combustion de matériaux tels que le bois, les végétaux, les déchets agricoles et les ordures ménagères organiques, ainsi que du biogaz issu de la fermentation de ces matériaux ou de nouvelles transformations chimiques pour produire des biocarburants. La biomasse, comme le biocarburant et le bois, est une énergie polluante qui produit des gaz à effet de serre lorsqu'elle est brûlée.[3]

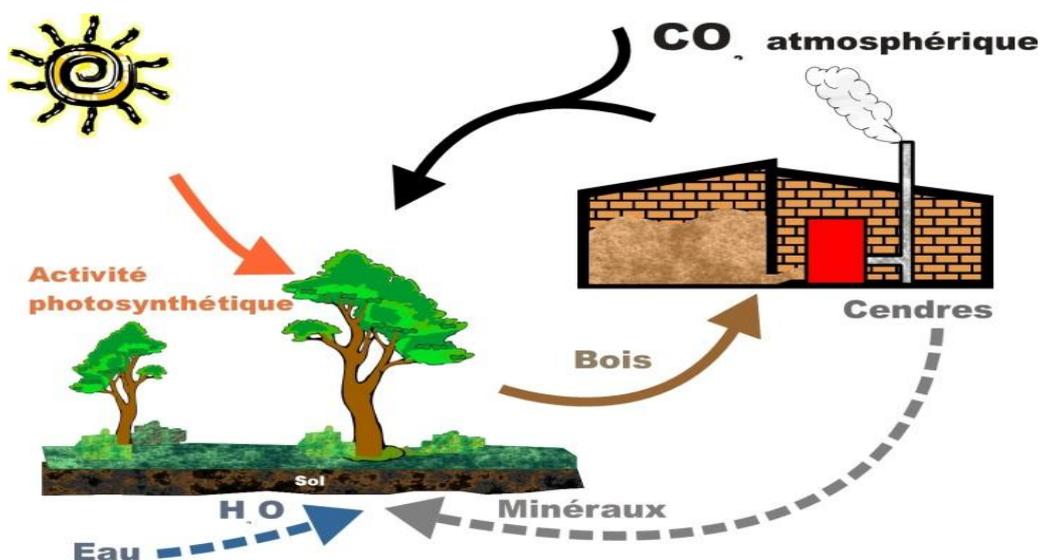


Fig.I 6 l'énergie biomasse (le cycle du carbone)

I.2.5) L'Énergie éolienne :



Fig.I 7: Technologie éolienne à axe horizontale

Un aérogénérateur, également connu sous le nom d'éolienne, est un appareil qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique via une génératrice.[4]

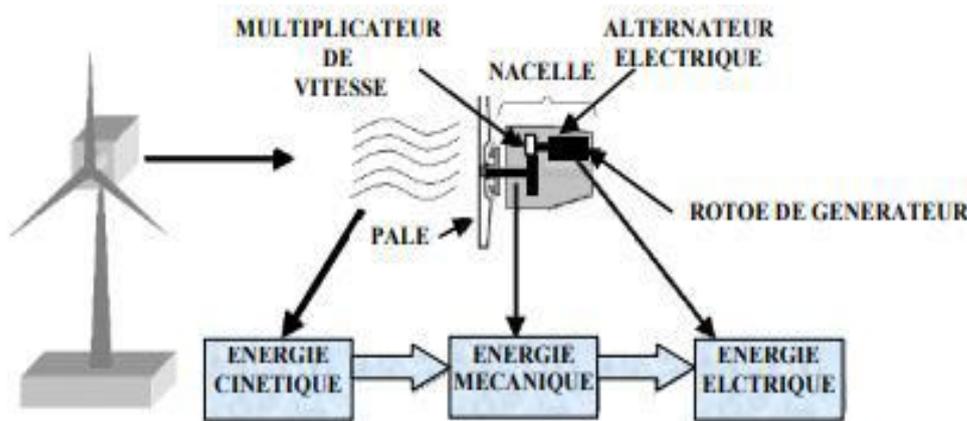


Fig.I 8: principe de convention de l'énergie

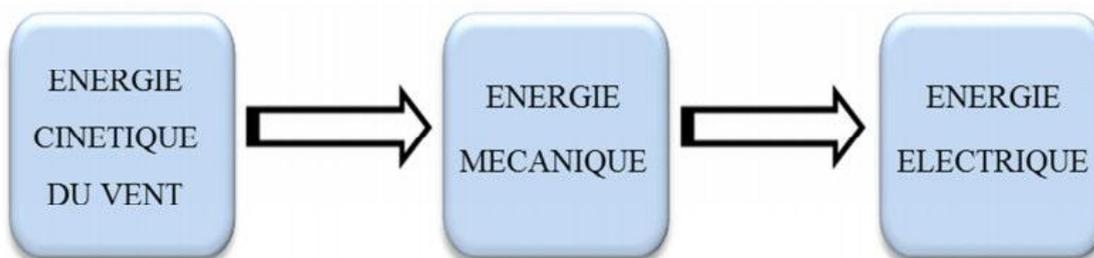


Fig.I 9: conversion de l'énergie cinétique du vent

I.2.5.1) Historique de l'énergie éolienne :

Le vent a été utilisé depuis plusieurs siècles comme source d'énergie traditionnelle non polluante pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), [5] l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces applications sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par les hélices en énergie mécanique exploitable. Le danois Poul La Cour a construit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité en 1891, après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques. Après la création du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont perfectionné cette technologie à grande échelle pendant la première et la deuxième guerre mondiale.

Plusieurs pays ont commencé à investir dans l'amélioration et la modernisation de la technologie des aérogénérateurs suite à la crise pétrolière de 1974. Entre 1980 et 1986, il y a eu un investissement important dans le premier marché important de la Californie, qui a commencé avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985.

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui a permis à l'industrie éolienne de se développer considérablement, surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces nations ont un impact significatif sur le marché mondial, qui a atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004, avec une croissance annuelle moyenne de 7500 MW.

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec celui des sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. La réduction des coûts de l'électricité est le résultat de progrès importants dans la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés).⁵ L'énergie éolienne est actuellement une source d'énergie bien implantée et en pleine expansion.

I.2.5.2) L'énergie Eoliennes en Algérie

En 1957, on a tenté de connecter les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique en Algérie en installant un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents à Alger. Le prototype avait été initialement établi à St-Alban en Angleterre par l'ingénieur français ANDREAU. Électricité et Gaz d'Algérie a acquis ce bipale pneumatique de 30 m de hauteur et de diamètre de 25 m, puis l'a démonté et installé en Algérie. [5]



Fig.I.10 :Eolienne de 100 kW de Grand Vent [5]

En 1953, les services de la colonisation et de l'hydraulique ont construit la plus grande éolienne de pompage à Adrar. Cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre, montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, a fonctionné pendant près de 10 ans. [5]



Fig.I 11: Eolienne d'adrar

I.2.5.3) Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Les avantages:[2]

- ✓ L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement
- ✓ De nombreux spécialistes sont maintenant conscients de l'impact négatif de certaines activités de l'homme sur la nature. Certaines sources d'énergie ont un impact significatif sur le changement climatique, les pluies acides et la pollution générale de notre planète.

- ✓ La concentration de CO₂ a augmenté de 25 % depuis l'ère préindustrielle et on prévoit qu'elle doublera pour 2050. Depuis 1900, cela a déjà entraîné une augmentation de la température de 0,3 à 0,6°C, et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus élevé de l'histoire du climat. 10 000 années passées. L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont la durée de vie est connue.
- ✓ Contrairement à la plupart des centrales thermiques et nucléaires, l'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un processus continu car les éoliennes en fonctionnement peuvent être facilement arrêtées. Ceux-ci consomment de l'énergie même lorsque l'on n'en a pas besoin, entraînant des pertes importantes et un mauvais rendement énergétique.
- ✓ Il fournit de l'énergie à la région. Par conséquent, il y a moins de pertes en ligne causées par les longs transports d'énergie. L'utilisation de cette source d'énergie peut également stimuler l'économie locale, en particulier dans les régions rurales.
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- ✓ Les pays en voie de développement trouvent cette source d'énergie très intéressante. Elle répond au besoin pressant d'énergie de ces pays pour s'épanouir.
- ✓ La construction d'un parc ou d'une turbine éolienne est assez simple. Par rapport aux énergies plus traditionnelles, le coût d'investissement nécessaire est faible. [6]
- ✓ Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'énergie produite que toute autre source d'énergie.
- ✓ Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- ✓ Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours.

Inconvénients : [2]

- ✓ Cependant, l'impact visuel est subjectif.
- ✓ Le bruit a considérablement diminué, en particulier le bruit mécanique qui a presque complètement disparu grâce aux avancées effectuées au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique est en revanche lié à la vitesse de rotation du rotor, il est donc nécessaire de le réduire.
- ✓ L'impact sur les oiseaux : selon certaines études, ils évitent les aérogénérateurs.
- ✓ Selon d'autres études, les sites éoliens ne doivent pas être installés sur les parcours migratoires des oiseaux pour empêcher les aéro turbines de les capturer.
- ✓ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. Ainsi, la qualité de la puissance produite n'est pas toujours excellente. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les zones à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Par conséquent, la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs est de plus en plus influencée et, par conséquent, les contraintes imposées aux responsables du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- ✓ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien que l'énergie éolienne puissante sur les sites avec le plus de vent puisse concurrencer la plupart des sources d'énergie classiques sur les sites moins ventés, son coût reste encore plus élevé.

I.2.5.4) Les différents types d'éoliennes

I.2.5.4.1) Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières installations créées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées, mais seules deux structures, le rotor de Savons et le rotor de Darrieux, ont réussi à atteindre le stade de l'industrialisation.[2]

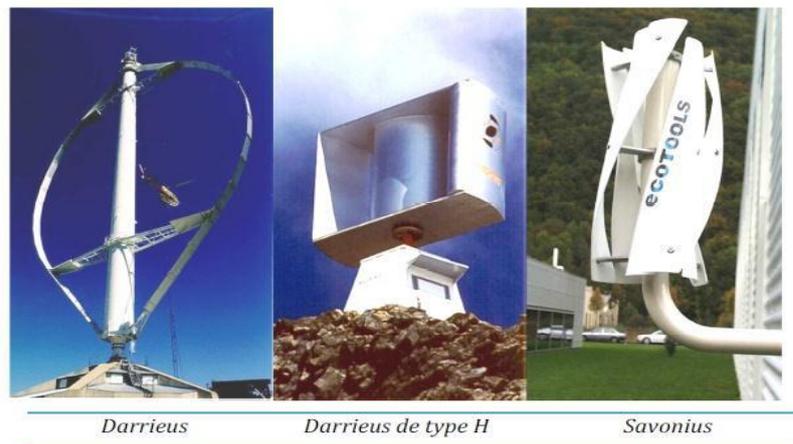


Fig.I 12: technologie éolienne à axe vertical

De nos jours, ce type d'éolienne est relativement rare et son utilisation est moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients, tels que les suivants.

Avantages [5]

- ✓ L'avantage de la conception verticale est que le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande sont placés directement au sol.
- ✓ En raison de sa symétrie de révolution sur son axe vertical, il est possible de fonctionner dans n'importe quelle direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- ✓ Il est robuste, simple et nécessite peu d'entretien.

Inconvénient [5]

- ✓ Elles ne fonctionnent pas aussi bien que celles à axe horizontal.
- ✓ La conception verticale de ce type d'éolienne nécessite qu'il fonctionne avec un vent proche du sol, ce qui signifie qu'il est moins fort car il est freiné par le relief.
- ✓ Ils occupent une surface plus grande que l'éolienne à tour car ils sont installés au sol et nécessitent des tirants qui doivent passer au-dessus des pales.

I.2.5.4.2) Eoliennes à axe horizontal :

Il est possible que les éoliennes soient actuellement les plus courantes en raison de leurs qualités exceptionnelles. Elles sont généralement équipées d'hélices avec deux ou trois pales placées face ou sous le vent. [2]

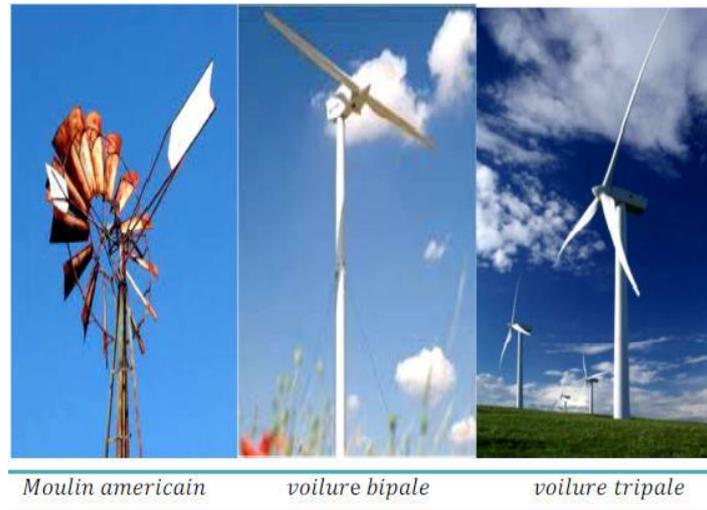


Fig.I 13: technologie éolienne à axe horizontale

Avantages: [2]

- ✓ Une emprise au sol très faible par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ✓ Cette structure capte le vent en hauteur, ce qui le rend plus fort et plus régulier qu'au sol.
- ✓ Au sommet de la tour, la nacelle contient le générateur et les appareils de commande.
- ✓ Par conséquent, un emplacement supplémentaire pour l'appareillage n'est pas nécessaire.

Inconvénients

- ✓ Coût de construction très élevé.
- ✓ L'équipement au sommet de la tour rend difficile l'intervention en cas d'incident.
- ✓ Malgré ses inconvénients, cette structure est actuellement la plus utilisée. Cependant, dans les zones isolées, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité.
- ✓ Ils sont de faible puissance et sont conçus pour des utilisations continues, comme la charge des batteries.
- ✓

I.2.5.5) Principales composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations potentielles d'aérogénérateurs qui peuvent être significativement [4] différentes. Cependant, une éolienne « classique » est généralement composée de trois composants principaux.

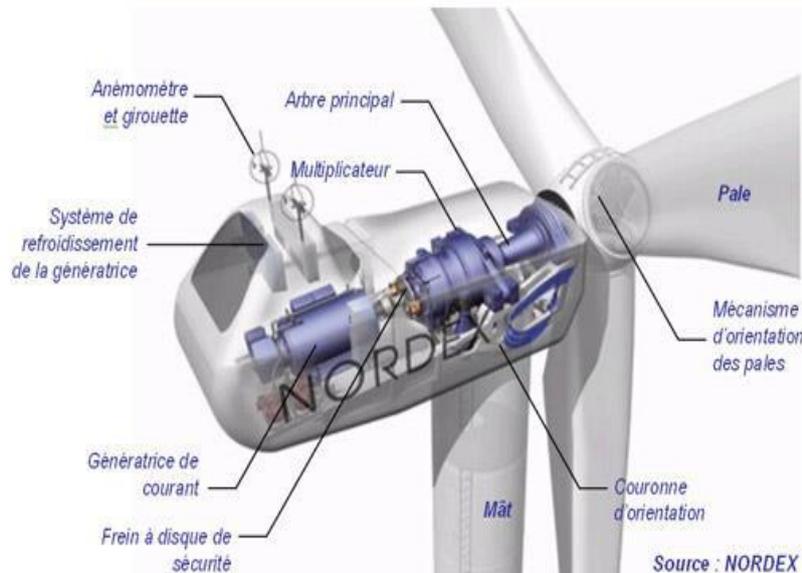


Fig.I 14 : constitution d'une éolienne

- Le mât, qui est généralement constitué d'un tube d'acier ou d'un treillis métallique, doit être positionné au sommet pour éviter toute perturbation près du sol. Cependant, le poids doit être limité et la quantité de matière mise en œuvre représente un coût considérable. En règle générale, il est préférable de choisir un mât qui est légèrement plus grand que le diamètre du rotor de l'aérogénérateur. Par exemple, l'éolienne NORDEX N90 2,3 MW a un diamètre de 90m et un mât de 80 m de hauteur.
- La nacelle comprend tous les éléments mécaniques nécessaires pour connecter le rotor éolien au générateur électrique, tels que les arbres lents et rapides, les roulements, le multiplicateur, le système de commande, le système de refroidissement et le frein à disque, qui est différent du frein aérodynamique et permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur, qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, ainsi que des 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). Le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et un système électronique de gestion éolienne complètent cette liste.
- Le rotor est une partie de l'éolienne qui tourne pour capter des vents forts et réguliers. Il est constitué de pales en matériau composite (généralement 3) qui sont propulsées par l'énergie cinétique du vent. Chacune d'entre elles est reliée par un moyeu et peut en moyenne mesurer 25 à 60 mètres de long. Elles peuvent également tourner à une vitesse de 5 à 25 tours par minute.

I.2.5.6) Principe de fonctionnement des éoliennes :

Grâce à des lames développées avec une technologie d'analyse aérodynamique, le courant d'air passe des deux côtés de la lame et la forme de la lame contribue à rendre la pression d'air inégale et élevée d'une part et basse de l'autre, ce qui pousse les éoliennes à tourner. Les aubes circulent autour du centre de la turbine en raison de cette pression variable. Cependant, il n'est pas possible de relier directement ce mouvement de circulation au générateur car la vitesse de rotation des aubes des moulins à vent est très faible

en raison du bruit produit et de la force mécanique. Avant que la turbine ne soit connectée au générateur, la vitesse est augmentée à l'aide d'un outil connu sous le nom de boîtier de vitesse, qui est composé d'engrenages planétaires et contient également des freins. [6]

I.2.5.7) Les éoliennes à vitesse variable :

Selon les courbes du coefficient de puissance en fonction de λ , un réglage de la vitesse est nécessaire [7]. En effet, lorsque la génératrice électrique est directement connectée au réseau, qu'elle soit synchrone ou asynchrone, sa vitesse est presque constante et son rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}).

La Figure (I.15) 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.

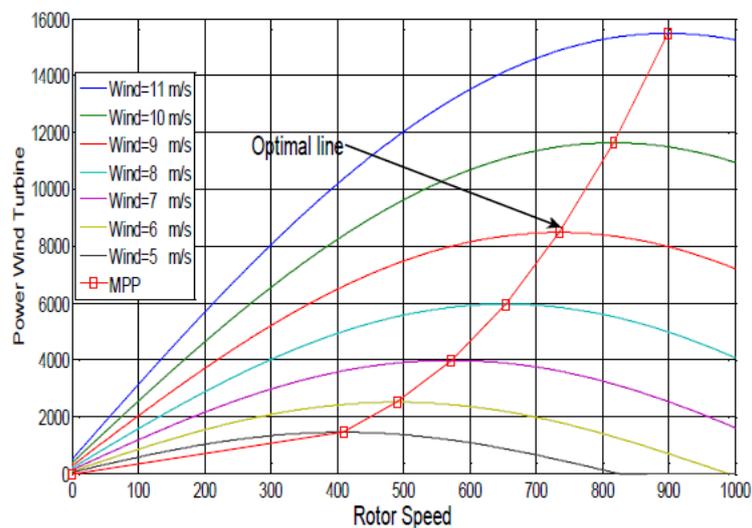


Fig.I 15 : puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne

Avantages [7]

- ✓ Optimisation de l'énergie captée en contrôlant la vitesse du rotor.
- ✓ Contrôle du transfert d'énergie propre et du transfert de puissance au réseau.
- ✓ Minimiser les contraintes mécaniques causées par le train de puissance. Les turbulences et les rafales de vent peuvent être absorbées, ce qui emmagasine l'énergie du vent dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant les oscillations de couple.
- ✓ Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- ✓ Obtenir une constante de temps plus grande pour le système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité
- ✓ Réduction des bruits acoustiques.

Inconvénients [7]

- ✓ 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 de l'éolienne au point de puissance idéal.

La figure illustre la courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable en fonction de la vitesse du vent.

Il existe trois zones de fonctionnement distinctes :

- **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.

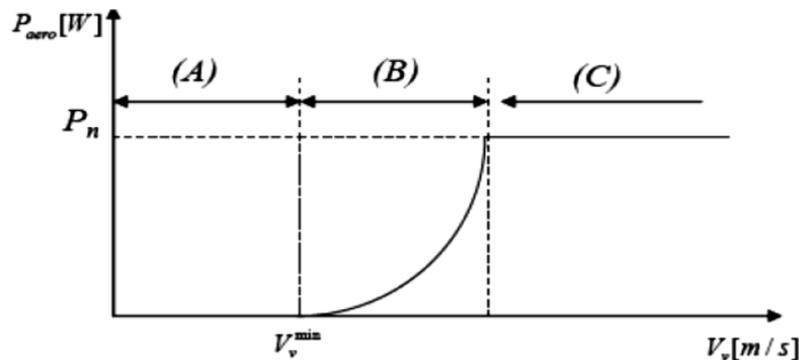


Fig.I 16: puissance théorique disponible au niveau de la turbine

I.2.5.8) Les éoliennes à vitesse fixe:

Les premières éoliennes à vitesse fixe ont été créées.[2] Cette technologie connecte directement la génératrice asynchrone au réseau. La fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles de la génératrice déterminent la vitesse $\Omega_{méc}$.

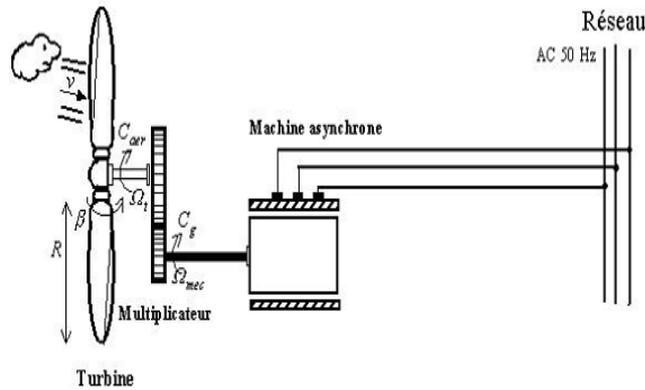


Fig.I 17: éolienne directement connecté au réseau

En général, le couple mécanique entraînant produit par la turbine accélère la vitesse de la génératrice. Elle fonctionne ensuite en hyper synchrone et fournit de l'électricité au réseau. La génératrice standard à deux paires de pôles a une vitesse mécanique légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme de $\Omega_{més} \Omega = 1500 \text{tr /min}$, ce qui nécessite l'ajout d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à la vitesse du rotor d'une éolienne.

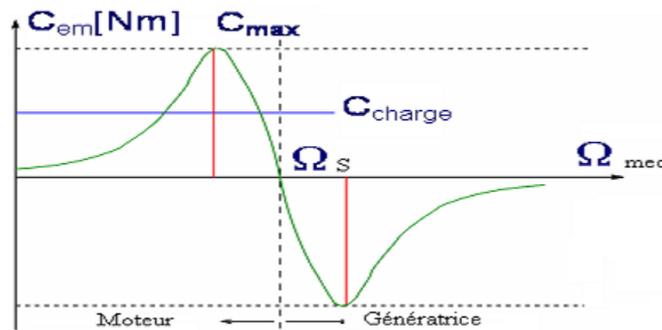


Fig.I 18: caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone

Avantages du fonctionnement à vitesse fixe:[2]

Le fonctionnement à vitesse fixe présente les avantages suivants:

- ✓ Un système électrique plus simple.
- ✓ Une Plus grande fiabilité.
- ✓ Une faible probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✓ L'absence de système électronique de commande.
- ✓ Un coût moins cher.

Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe:[2]

Néanmoins il possède les inconvénients suivants:

- ✓ La puissance extraite n'est pas optimisée.
- ✓ La maintenance de la boîte à vitesse.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur.

- ✓ La magnétisation de la machine non gérée.

I.2.5.9) Constitution d'une éolienne moderne :

La structure d'une éolienne est principalement composée de trois éléments : les pales (de 1 à 3), la nacelle et la tour. [5]

Chacune de ces composantes doit être étudiée et modélisée minutieusement afin d'obtenir un meilleur rendement, une bonne fiabilité et un faible coût d'investissement.

En règle générale, la tour est constituée d'un tube d'acier ou peut-être d'un treillis métallique, et elle doit être positionnée au sommet pour éviter toute perturbation près du sol. Cependant, le poids doit être limité et la quantité de matière mise en œuvre représente un coût considérable.

Tous les éléments mécaniques nécessaires pour relier le rotor éolien au générateur électrique sont regroupés dans la nacelle, y compris les arbres lents et rapides, les roulements, le multiplicateur, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, ainsi que le générateur et les systèmes électriques d'orientation des pales.

Le rotor composé des pales qui sont assemblées dans leur moyeu. Le nombre de pales standard pour les éoliennes destinées à la production d'électricité est de 1 à 3.

Une armoire de gestion Tous les convertisseurs électroniques de puissance (onduleurs, redresseurs), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension, ainsi que l'orientation des pales et de la nacelle.

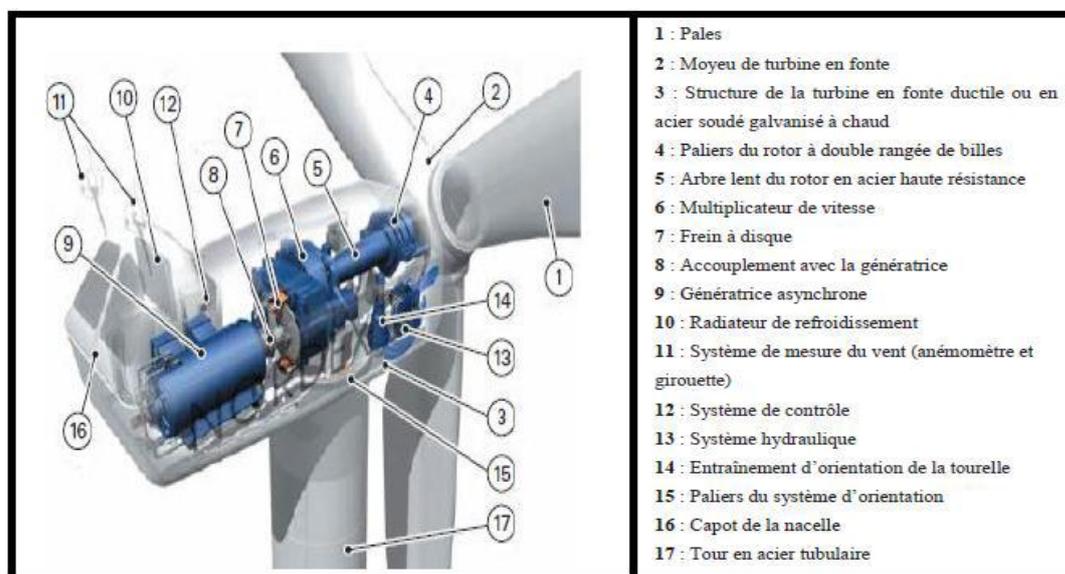


Fig.I 19: différentes parties d'une éolienne

I.2.5.10) Modélisation de la turbine éolienne :

I.2.5.10.1) Modélisation de vent

La turbine transforme en partie l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique par le générateur. Il est donc essentiel de modéliser cette variable car la précision des simulations sera influencée par la qualité de son modèle.[9,10]

Il est essentiel de sélectionner la localisation d'un site éolien dans un projet de production d'énergie. L'intensité du vent va influencer la quantité d'énergie qui pourra réellement être extraite du gisement éolien.

Beaucoup de recherches ont été menées sur la modélisation du vent, l'un des principes adoptés est de créer l'apparence temporelle du vent en utilisant un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer.

Les réglages de cette fonction de transfert varient en fonction des dimensions spécifiques du site et de la nature du vent.

Donc la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes :

$$V(t) = V_0 + VT(t)$$

- ✓ Un élément turbulent du vent (t) est un processus aléatoire qui reste constant (ne change pas avec la vitesse moyenne).
- ✓ La composante lente V_0 correspond à la moyenne de la vitesse du vent qui varie régulièrement sur de plus longues périodes dans un lieu spécifique.

Alors la vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V(t) = 7,5 + 0.7 [3\sin 0.09t + 0.7\sin 0.42t + 18\sin 0.01t + \sin 0.038t]$$

La Figure (I.20) Représente le vent simulé avec une vitesse moyenne de 7,5 m/s.

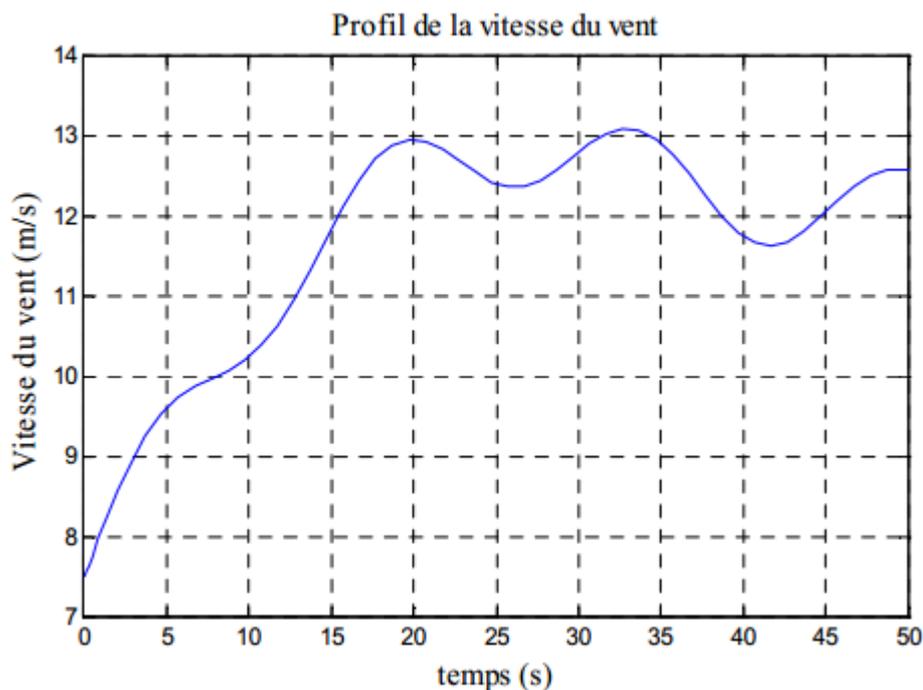


Fig.I 20: Simulation du profil de la vitesse du vent

I.2.5.10.2) Modélisation de la turbine

On peut résumer les variables d'entrée et de sortie de la turbine éolienne de la manière suivante :

- 1 - La rapidité du vent qui influence l'énergie initiale à l'entrée de la turbine.
- 2 - Les dimensions précises de la machine, qui découlent principalement de la configuration du rotor et de la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- La vitesse de la turbine, l'angle des pales et l'angle de fixation.

Les variations des quantités d'entrées de la turbine permettent de contrôler la puissance ou le couple en modifiant les quantités d'entrées précédentes.

- **LOI DE BETZ : [11, 12]**

Selon la loi de BETZ, il est interdit à une éolienne de convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59 %) de l'énergie cinétique présente dans le vent.

D'après la théorie de Betz , la puissance du Vent est :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne} \rho v V_v^3 \quad (I. 1)$$

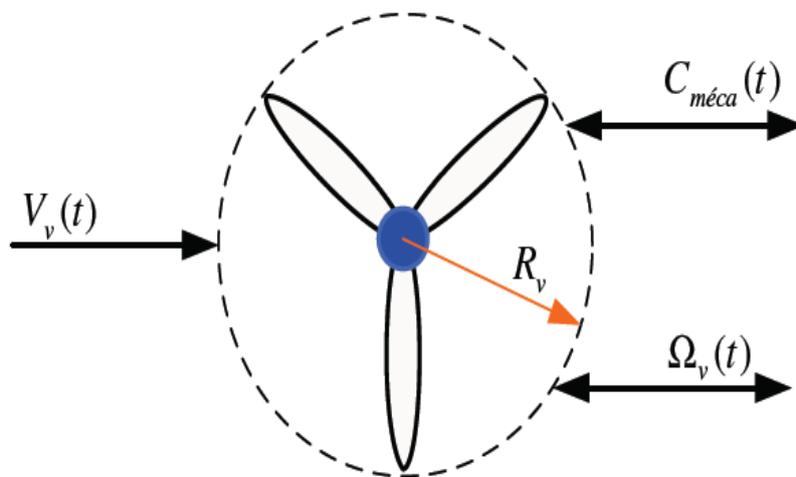


Fig.I 21: Turbine tripale ($R_v= 1,25m$)

Avec :

$S_{éolienne}$: La surface balayée par l'éolienne.

ρ : La masse volumique de l'air ($1.08Kg/m^3$).

V_v : La vitesse du vent.

La surface balayée par éolienne $S_{éolienne}$ est donnée par la relation :

$$S_{éolienne} = \pi R^2 \quad (I. 2)$$

Avec R est le rayon des pales de la turbine tripale voir figure L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance fourni par le vent

$P_{éolienne}$ Peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p :

$$P_{éolienne} = C_p P_{vent} \quad (I. 3)$$

Le coefficient CP diffère pour chaque éolienne il dépend de l'angle d'inclinaison des pales βi et du rapport de vitesse λ .

$$\lambda = \frac{R\Omega}{V_v(t)} \quad (\text{I. 4})$$

Avec :

R : Rayon des pales de l'éolienne.

Ω : vitesse de l'éolienne.

V_v : Vitesse de vent

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques, qui dépendent de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β il est calculé à partir de l'équation suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.1567 \left[\frac{16}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right] e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068 \cdot \lambda \quad (\text{I. 5})$$

Avec:

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

λ : la vitesse spécifique.

β : L'angle de calage (L'angle de l'orientation des pales).

La différence entre les courbes des différentes turbines éoliennes est petite et peut être négligée dans les simulations dynamiques.

La figure (I.22) montre les différentes courbes obtenues pour plusieurs angles de calage. Nous constatons que la vitesse spécifique a relativement une large gamme pour un angle de calage de 2° . Ceci représente un avantage pour les turbines éoliennes destinées pour fonctionner avec une large gamme de vitesses de vent. Avec l'augmentation de l'angle de calage, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance diminuent considérablement.

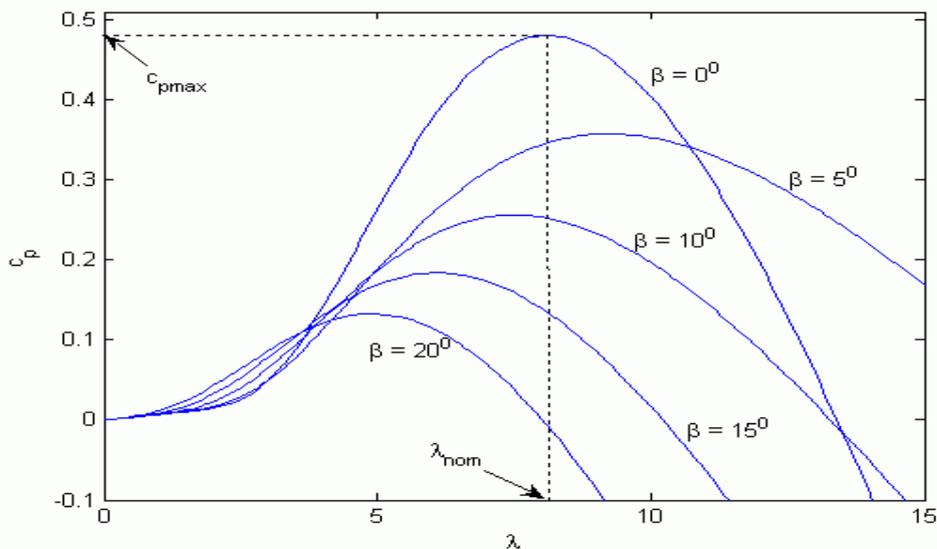


Fig.I 22: les courbes de $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β (deg)

La valeur optimale du coefficient de puissance est obtenu $\lambda_{opt}=6.9$ et vaut $C_{opt}=0.442$ D'après les équations (1) et (3), nous aurons :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \rho S C_p(\lambda) V_v^3 \quad (\text{I. 6})$$

Le couple éolien est déterminé par :

$$C_{\text{éol}} = \frac{P_{\text{éol}}}{\Omega} = \frac{1}{2} \rho \cdot S C_p \frac{V_v^3}{\Omega} \quad (\text{I.7})$$

I.2.5.10.3) Modèle du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{\text{éolienne}}}{G} \quad (\text{I. 8})$$

Avec :

C_g : Couple de la génératrice

$C_{\text{éolienne}}$: Couple de l' ρ

G : le coefficient de multiplication

$$\Omega_{\text{mécanique}} = G \Omega_{\text{turbine}} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

$\Omega_{\text{mécanique}}$: Vitesse mécanique

Ω_{turbine} : Vitesse de rotation de la turbine

G : le coefficient de multiplication

I.2.5.10.4) Equation dynamique de l'arbre de transmission :

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ($C_{\text{mécanique}}$) appliqué au rotor de la génératrice.

Nous avons :

$$J \frac{d\Omega_{\text{mécanique}}}{dt} = C_{\text{mécanique}} \quad (\text{I. 10})$$

J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des arbres et du multiplicateur.

Le couple mécanique, appliqué au rotor de la génératrice, est la somme de tous les couples appliqué sur le rotor.

Nous avons :

$$C_{m\acute{e}canique} = C_g - C_{em} - C_f \quad (I. 11)$$

Avec :

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

Nous avons:

$$C_f = f\Omega_{m\acute{e}canique} \quad (I. 12)$$

Avec :

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

I.2.5.10.5) Stratégies de commande de la turbine éolienne

Les deux courbes présentées dans la figure (I.23) sont utilisées pour représenter les stratégies de commande des systèmes éoliennes de moyennes et de grandes puissances à vitesses variables et à régulation de puissance « Pitch », qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine. [13,12,14,15]

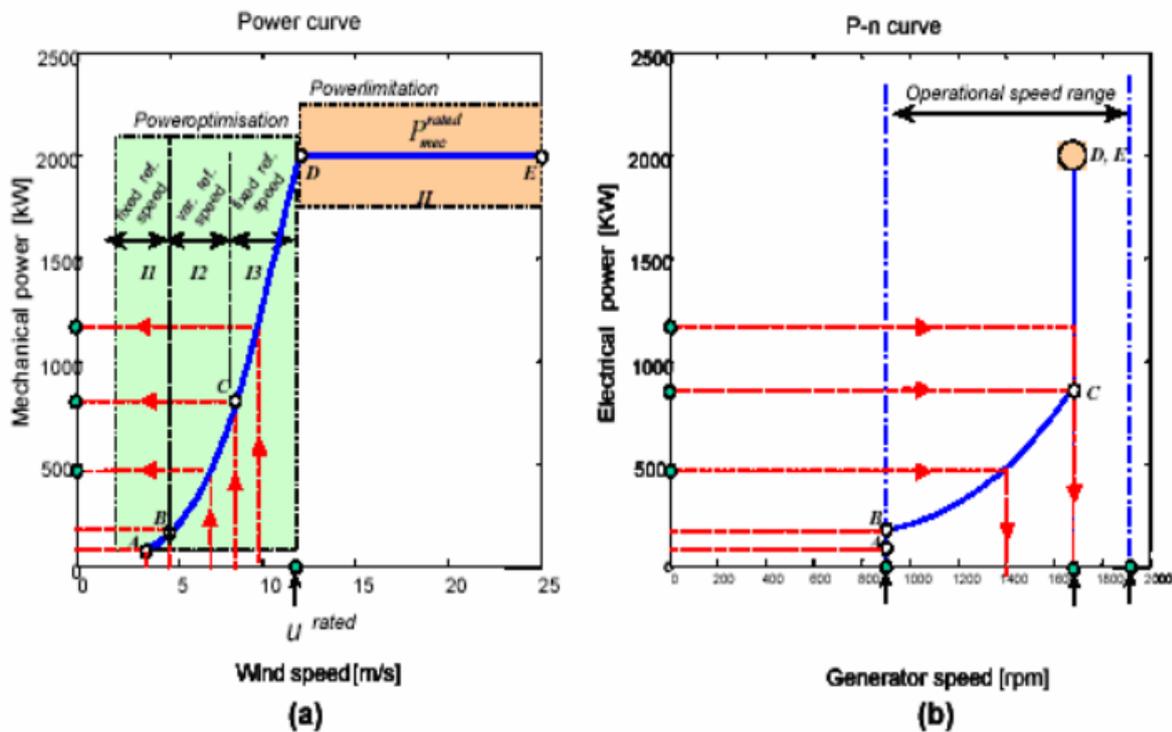


Fig.I 23: caractéristique uissance , vitesse du vent et vitesse de rotation

(a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.

(b) Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

La caractéristique Puissance-Vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones (Fig).

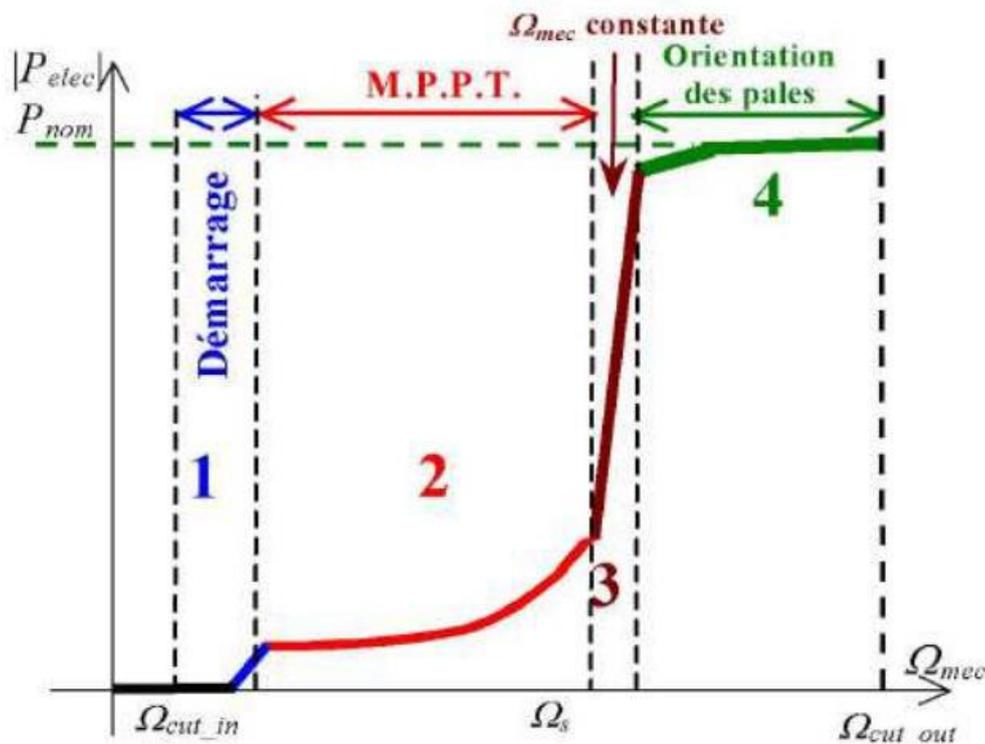


Fig.I 24: caractéristique puissance-vitesse typique d'une éolienne à grande puissance

- Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine ; elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut_in} . (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour laquelle l'éolienne a démarré).
- Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué « MPPT » (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale ($\beta=2^\circ$) afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale.
- Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90 % de la puissance nominale P_{nom} .
- Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : Le Pitch contrôle. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

A. Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

La volatilité du vent provoque des dysfonctionnements dans le processus de conversion éolien et entraîne des fluctuations constantes de puissance. Dans cette optique, on suppose que le couple

électromagnétique produit par la machine est égal à sa valeur de référence, peu importe la puissance produite.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (I. 13)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = K_{ass}(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (I. 14)$$

K_{ass} : Régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : Vitesse de référence.

Selon l'équation (I.4), la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V_v}{R} \quad (I.15)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la vitesse spécifique λ_{opt} et le

Coefficient de puissance maximale C_{pmax} peut se déduire de (I.15) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (I. 16)$$

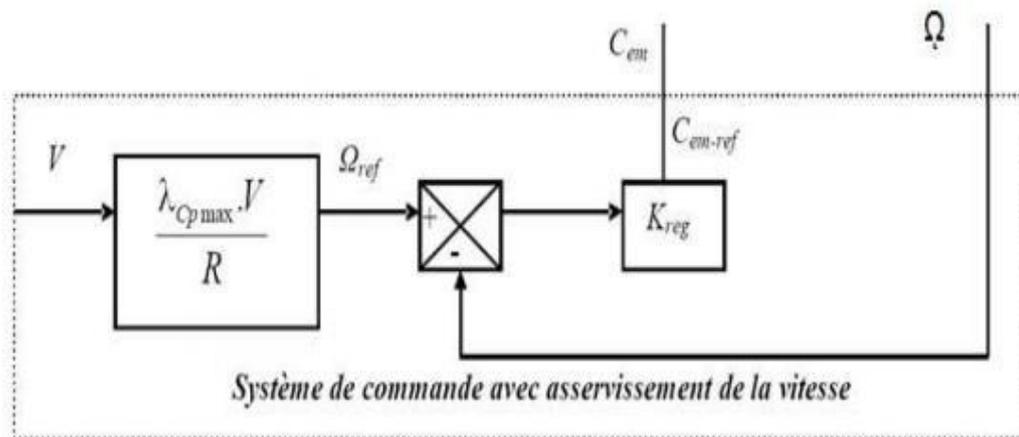


Fig.I 25: MPPT avec asservissement de la vitesse

B. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Puisque la méthode de maximisation de puissance précédente repose sur une connaissance précise de la vitesse du vent, le réglage de la vitesse de rotation de la turbine est relativement complexe et entraîne une dégradation des puissances captées en raison de mesures erronées de cette vitesse de vent. L'utilisation du contrôle des éoliennes sans restriction de vitesse est devenue une exigence pour la majorité des fabricants.

Cette approche repose sur l'idée que la vitesse du vent, et donc la vitesse de rotation de la turbine, peut fluctuer considérablement en régime permanent.

Ceci, nous conduit à déduire que :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul $C_{mec} = 0$
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé $C_f \approx 0$.

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statistique

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} \quad (I. 17)$$

Equation(I. 17) donc :

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (II. 18)$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{aér-est}}{G} \quad (I. 19)$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aér-est} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine_estimé}} V_{estimé}^3 \quad (I. 20)$$

$\Omega_{turbine_estimé}$: est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I. 21)$$

En utilisant les formules du (I.22) au (I.18), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{mes}^2}{G^3} \quad (I. 23)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur λ la valeur λ_{opt} Optimale correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale de la manière suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{mes}^2}{G^3} \quad (II. 24)$$

En mettant :

$$k_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{1}{G^3} \quad (II. 25)$$

L'expression (I. 24) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{em_{ref}} = k_{opt} \cdot \Omega_{mes}^2 \quad (\text{II. 25})$$

L'algorithme **MPPT** contrôlé à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape K, détermine le couple de référence dans l'étape K+1 de la façon montrée sur la figure (Fig. I.25).

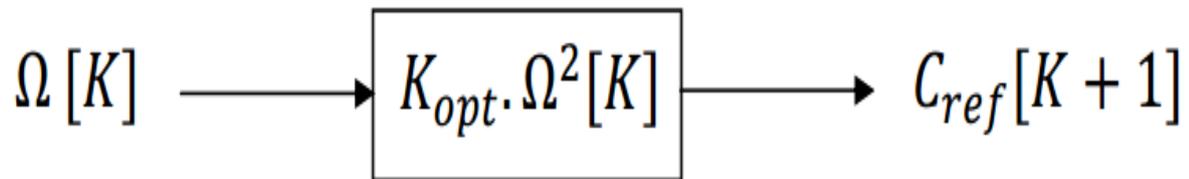


Fig.I 26: couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

I.2.5.10.6) Résultats de simulation:

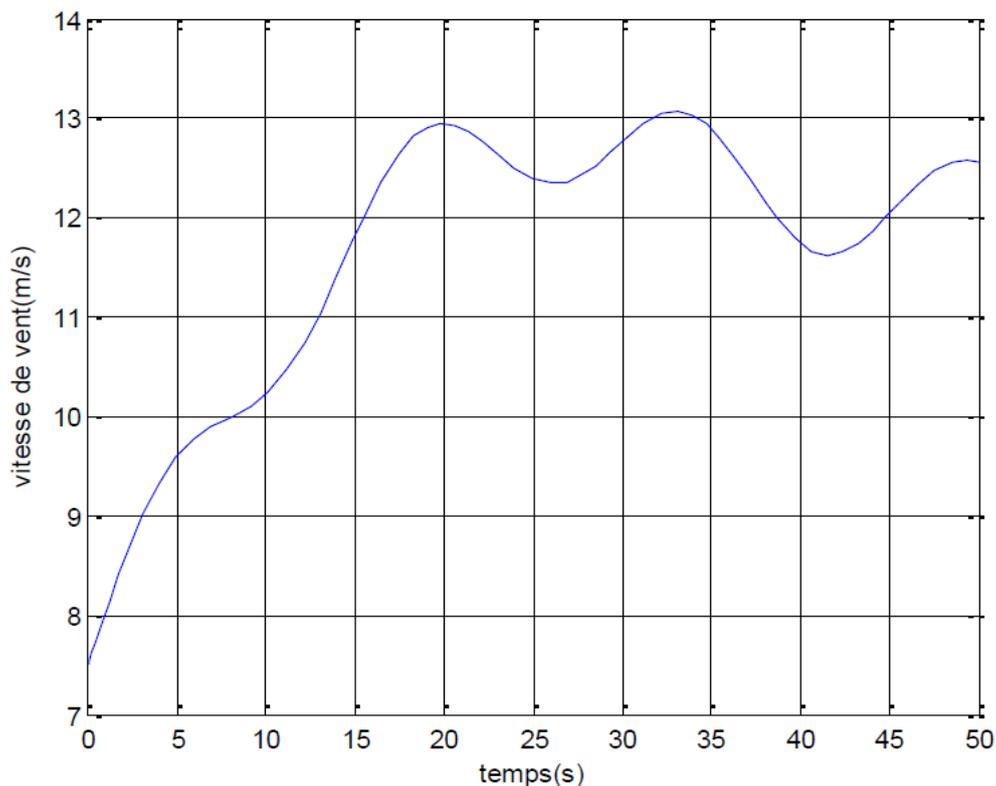


Fig.I 27: simulation du profil de la vitesse du vent

✚ Sans asservissement de vitesse :

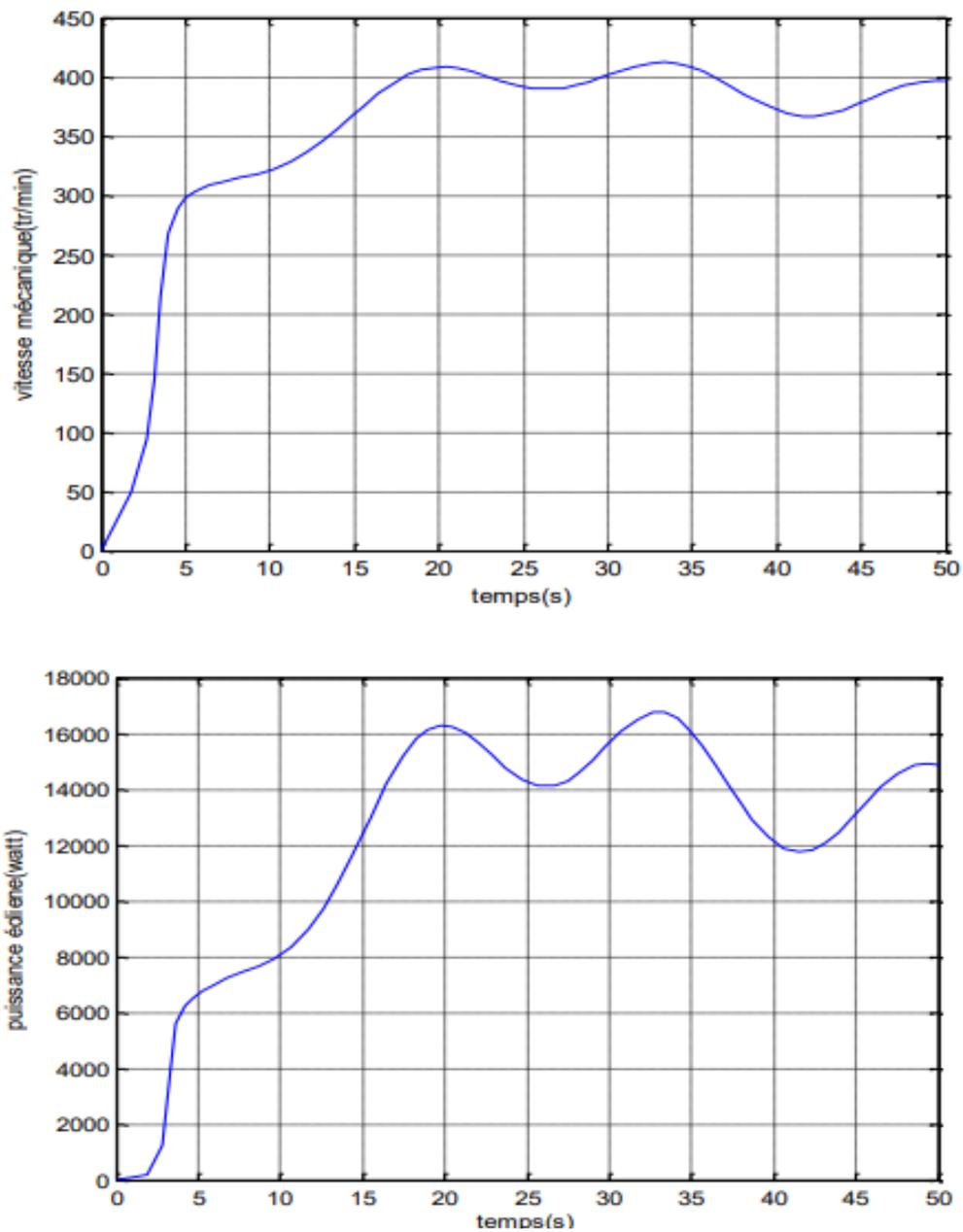


Fig. I.28 : Résultat de simulation de la turbine sans asservissement de la vitesse

Les résultats de simulation correspondant à cette stratégie de commande montrent que les variations de la puissance mécanique sont adaptées à la variation de la vitesse du vent.

✚ Avec asservissement de vitesse:

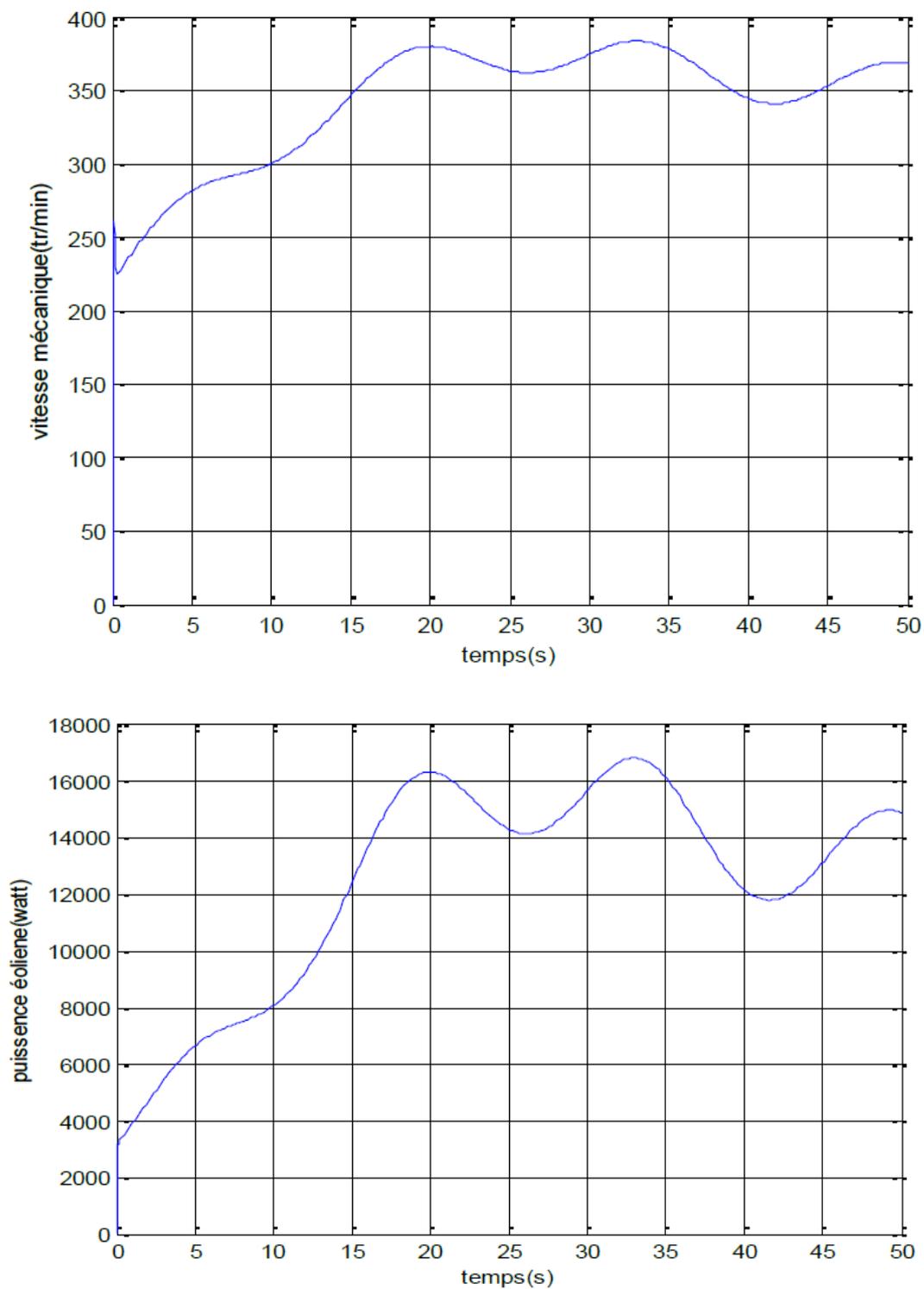


Fig.I 29: résultat de la simulation de la turbine avec asservissement de la vitesse

Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent. Alors la réponse de la turbine ce contrôle est très dynamique et la puissance obtenue est donc plus importante.

I.3) Conclusion :

Les énergies renouvelables ont pour objectif de réduire la consommation totale (et non relative) d'énergie fossile. Parfois, elles sont également présentées comme une solution à la problématique environnementale.

Grâce à ce chapitre, nous avons pu étudier les différentes options électrotechniques pour l'élaboration d'électricité à l'aide de turbines éoliennes. Une fois que les concepts essentiels pour comprendre le système de conversion de l'énergie éolienne ont été rappelés, divers types d'éoliennes et leur fonctionnement ont été décrits, ainsi que les différents systèmes utilisés pour leur exploitation.

nous avons examiné la représentation du premier élément de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, à savoir la turbine.

L'énergie mécanique provenant de la turbine serait utilisée pour entraîner l'arbre de la génératrice et générer de l'électricité.

Les stratégies de commande d'une turbine pour extraire le maximum d'énergie (technique MPPT) ont également été présentées.

Chapitre II

Généralités sur la machine synchrone à aimants permanents

II.1) Introduction

L'industrie a utilisé le moteur à courant continu (CC) pendant plusieurs années en raison de son principal avantage d'être facilement command-able grâce au découplage naturel du flux et du couple. Cependant, parmi d'autres inconvénients, la présence du système balais collecteur a toujours été un inconvénient majeur du moteur, ce qui l'a de plus en plus limité à l'utilisation. [16],[17]

Cependant, la fragilité du système de balai collecteur du MC a toujours été un inconvénient, ce qui limite la puissance et la vitesse maximales et présente des problèmes de maintenance et des interruptions de fonctionnement. Afin d'éviter cet inconvénient, on a eu intérêt à utiliser des moteurs électriques à courant alternatif.

Le moteur synchrone à aimants permanents reste un bon candidat parmi les moteurs à courant alternatif utilisés dans les entraînements à vitesse variable. Grâce à l'évolution des aimants permanents, qu'ils soient à base d'alliage ou à terre rare, son choix devient attractif et concurrent de celui des moteurs asynchrones. Cela leur permet d'être utilisés comme inducteur dans les moteurs synchrones, offrant de nombreux avantages, notamment une faible inertie et un couple massique élevé, par rapport aux autres types de moteurs. [18] et [19]

Dans ce chapitre, nous allons explorer les principes fondamentaux des machines synchrones classiques à aimants permanents (MSAP), puis nous allons étudier la modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents pour différents modes de fonctionnement (à vide, en charge et avec une charge réelle sur une source parfaite). De plus, nous examinerons les résultats de simulation et leurs interprétations.

II.2) PRESENTATION DE LA MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS

La machine synchrone à aimants permanents est un dispositif électromécanique qui comprend un stator et un rotor [20],[18] .



Fig.II. 1: Machine synchrone à aimants permanents

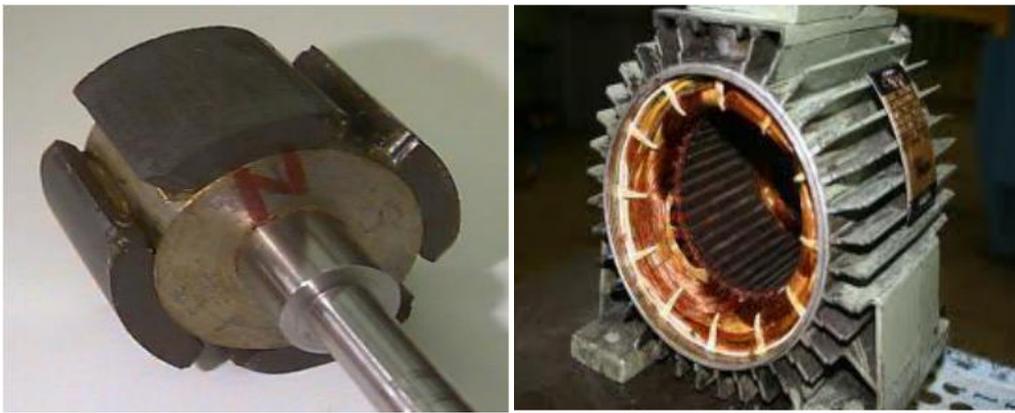


Fig.II. 2: a)stator d'une machine synchrone MSAP b) photographie d'un rotar

Le stator est une partie fixe induit où se trouvent les enroulements liés à la source, il est semblable au stator de toutes les machines électriques triphasées, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans lesquelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de $\frac{2\pi}{3}$

En ce qui concerne son fonctionnement, les MSAP sont appelés en fonction du principe de rotation du champ magnétique en synchronisme avec le rotor (vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique).

La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques. On remarque [21] :

$$\omega_r = \frac{\omega}{p}$$

ω_r : La vitesse de rotation de la machine (rad/s).

ω : La pulsation des courants statoriques (rad/s).

p : Le nombre de paire de pôles de la machine

Le rotor est une partie mobile "inducteur" fixée sur l'axe de rotation. C'est un noyau de fer sur lequel sont disposés des aimants permanents pour produire une excitation permanente.

II.2.1) STRUCTURE DES INDUCTEURS DES MACHINES A AIMANTS :

Le rotor MSAP est généralement classé en deux catégories [18] :

- Rotor sans pièces polaires, Ainsi, avec un entrefer constant, les aimants peuvent être orientés soit perpendiculairement à l'entrefer (aimantation radiale) comme illustré dans la figure (II.3), soit parallèlement (aimantation tangentielle) comme illustré dans la figure (II.4).
- Rotor possédant des pièces polaires, l'aimantation soit tangentielle figure (II.5) soit radiale figure (II.6) .Dans ce genre de machine, l'inducteur est présent avec des pôles saillants

II.2.1.1) Structure sans pièce polaire (SPP) :

a. Aimantation radiale

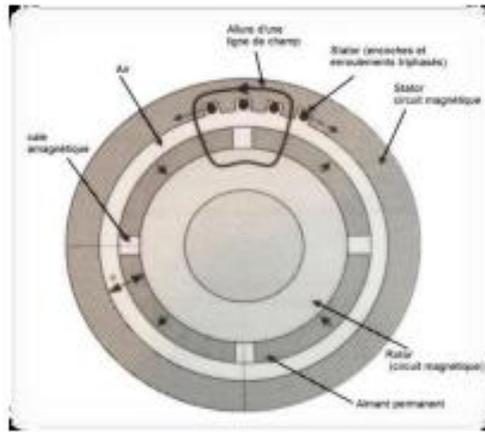


Fig.II. 3: machine synchrone a aimants ($p=2$), sans pièce polaire, aimantation radiale

Les aimants alnico ou ferrite sont parfaits pour cette structure, l'entrefer "e" peut être considéré comme constante (machine à pôles lisses), le flux est faible et cette structure est principalement utilisée dans les machines synchrones de petite puissance. [22]

b. Aimantation tangentielle

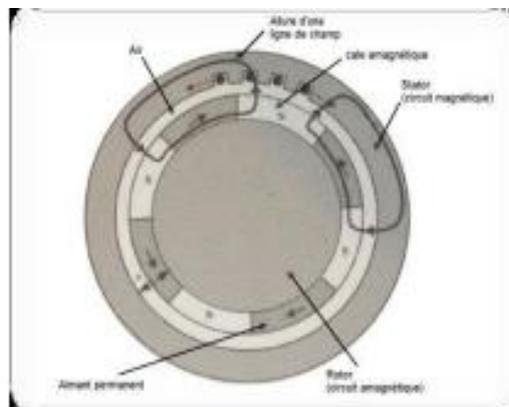


Fig.II. 4: machine synchrone à aimants $2=P$ sans pièce polaire aimantation tangentielle

Des machines à induction sinusoïdale peuvent être fabriquées à l'aide d'aimants à aimantation tangentielle. La machine présente des pôles lisses, une faible induction dans l'entrefer et un faible couple.

II.2.1.2) Structure avec pièce polaire (APP) :

a) Aimantation radiale

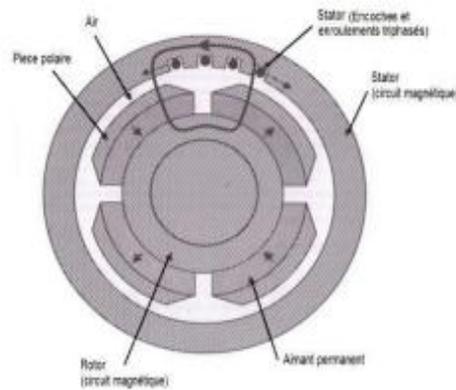


Fig.II. 5 : machine synchrone à aimants $p=2$ avec pièce polaire aimantations radiale les pp sont sur la périphérie des aimants

b) Aimantation tangentielle

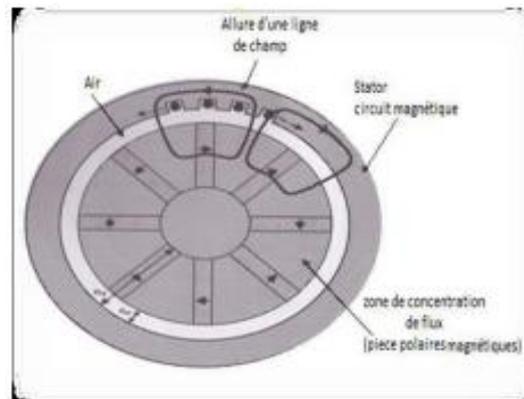


Fig.II. 6 : machine synchrone à aimants $p=4$ avec pièce polaire aimantation tangentielle

Les pièces polaires de l'aimant permettent de concentrer le flux, ce qui augmente le couple massique car l'induction dans l'entrefer est supérieure à celle de l'aimant. Dans cette configuration, l'entrefer est variable $E_m \neq E_M$, ce qui signifie que la perméance du circuit magnétique vue du stator dépend de la position du rotor.

II.2.2) PROPRIETES D'AIMANT PERMANENT

La principale fonction des aimants permanents utilisés dans les machines synchrones est de générer le flux inducteur. Il est essentiel qu'ils favorisent une puissance massique élevée, ce qui permet de diminuer le volume de la machine. D'autre part une faible sensibilité à la température est également indispensable, ce qui limite la désaimantation en fonctionnement normal. [23] ,[24]

La caractéristique principale des aimants est leur cycle d'hystérésis, notamment la courbe de désaimantation du plan B-H (figure II.7).

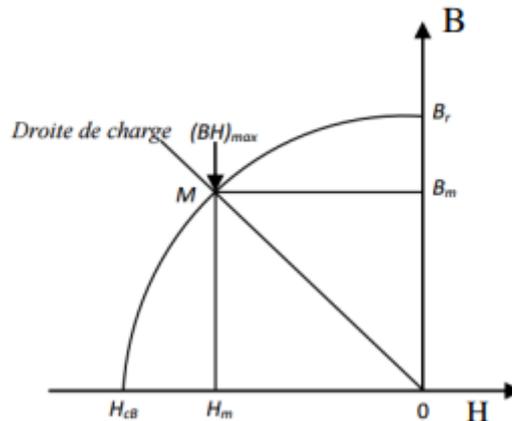


Fig.II. 7: courbe de désaimantation d'un matériau pour aimant permanent

Cette courbe donne :

- L'induction rémanente B_r , c'est-à-dire l'induction résiduelle en circuit fermé ; c'est une indication de la puissance potentielle de l'aimant.
- Le champ coercitif de l'induction H_{cB} qui est le champ démagnétisant annulant l'induction ; plus sa valeur est élevée et plus l'aimant est stable.
- Le produit d'énergie volumique $(BH)_{max}$, qui définit la valeur énergétique de l'aimant par unité de volume.
- Les valeurs H_m et B_m du point de fonctionnement optimal M correspondant $(BH)_{max}$,

Pour fabriquer des inducteurs de machines synchrones, il est préférable d'utiliser un aimant permanent avec une caractéristique B(H) rectangulaire, avec des valeurs de B_r et H_c aussi élevées que possible.

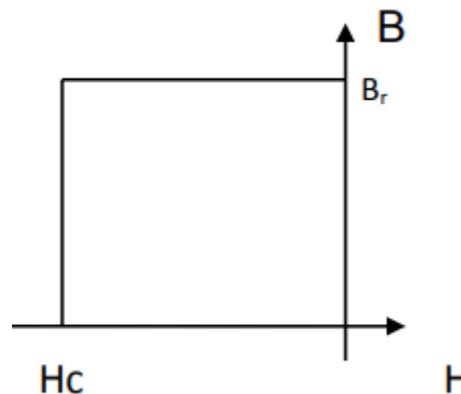


Fig.II. 8: caractéristique B(H) de l'aimant permanent idéal

II.2.3) CHOIX D'AIMANTS PERMANENTS UTILISES POUR LA MSAP

Il est crucial de sélectionner les matériaux des aimants permanents car ils jouent un rôle crucial dans le couple massique d'un actionneur [22] à [25] :

- **Les alnico** sont des alliages à base de fer, d'aluminium et de nickel, avec des additions de cobalt, cuivre ou de titane.
- **Les ferrites** sont des composés d'oxyde de fer, de baryum et de strontium.
- **Les terres rares** tels que les Samarium-Cobalt sont beaucoup plus performants et autorisent une température de fonctionnement élevée (jusqu'à 300°C), mais ils sont très coûteux en raison notamment de la présence du cobalt dans leur composition.

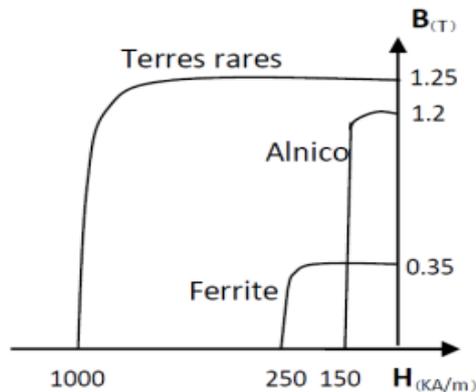


Fig.II. 9: caractéristiques des aimants permanents

Les aimants permanents les plus performants utilisés dans la composition des inducteurs des machines synchrones sont actuellement les alliages métaux de transitions-terres rares. La méthode la plus répandue est l'alliage samariu-cobalt Sm2.

Co_{17} , qui est quasiment amagnétique (la perméabilité relative vaut environ : $\mu_r = 1.07$) et qui est caractérisé par une induction rémanente et un champ coercitif élevés ($B_r = 1.25$ T, $H_c = 1000$ KA/m) la densité d'énergie emmagasinée dans l'aimant est à taille égale trois fois plus importante que pour les alnico, et six fois plus importante que pour les ferrites.

La sélection des aimants permanents est influencée par les facteurs suivants [26] :

- Performance du moteur.
- Poids du moteur.
- Dimension du moteur.

II. 3) Catégories de la MSAP

Quatre types de machines synchrones à aimants permanents peuvent être classés en fonction de leur construction mécanique :

- Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS): La construction de cette structure est la plus facile car elle utilise des aimants permanents à aimantation radiale qui sont placés directement sur la périphérie du rotor. Les aimants ont généralement une forme de tuile et sont collés sur une culasse cylindrique. Cette structure de machine rentre dans la catégorie des machines à pôles lisses.

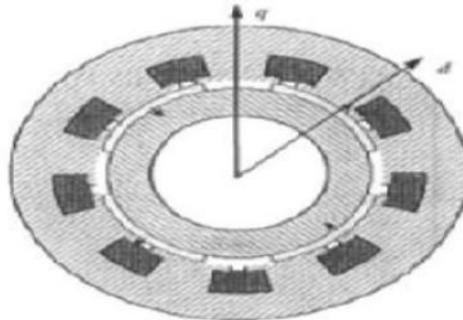


Fig.II. 10: machine synchrone à aimants permanents montés en surface

- Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI) : En partant de la structure précédente, on entaille des logements pour insérer les aimants permanents dans le rotor afin de faciliter l'assemblage mécanique. Les parties de fer entre les aimants permanents sont des espaces inter polaires qui rajoutent de la saillance. cependant, les caractéristiques de cette structure restent fondamentalement proches de la MSAPS

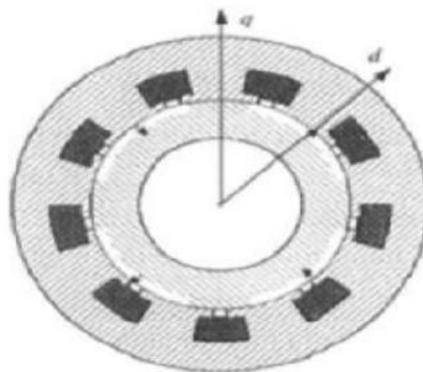


Fig.II. 11: machine synchrone à aimants permanents insérés

- Machines synchrones à aimants permanents chapeautés (MSAPC) : Cette structure est dérivée de celles utilisant des aimants permanents montés en surface. Des pièces polaires, typiquement en acier doux, sont apposées sur les aimants. L'association des aimants et des pièces polaires induit une anisotropie du rotor, augmentant ainsi la saillance. Les pièces polaires influencent la forme de la force électromotrice (f.e.m) au stator en agissant sur le profil de la pièce.

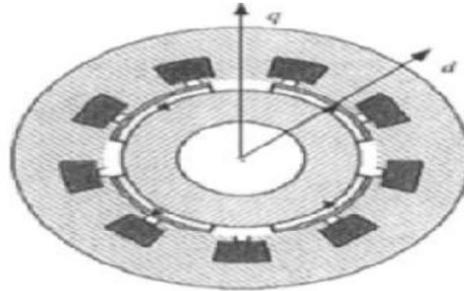


Fig.II. 12: machine synchrone à aimants permanent chapeautés

- Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) : Cette structure a pour but d'accroître l'induction magnétique dans l'entrefer par rapport à l'induction rémanente des aimants permanents. En fait, les pièces polaires canalisent le flux généré par les aimants permanents à aimantation tangentielle dont la surface latérale est supérieure à la demi-surface de la pièce polaire prise au niveau de l'entrefer [27]

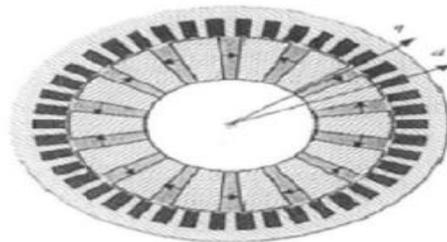


Fig.II. 13: machine synchrone à aimants permanents enterré

II.4) Types de machines synchrones à aimants permanents (MSAP)

II.4.1) Classification par structure du flux magnétique:

- **Machines à flux radial :** Le mouvement magnétique Le rotor et le stator sont traversés de manière radiale. C'est la version la plus courante et elle est utilisée dans de nombreuses situations.
- **Machines à flux axial:** Le rotor et le stator sont traversés axialement par le flux magnétique. Les machines à flux radial sont plus compactes, mais elles ont une densité de couple plus faible.
- **Machines à flux transverse:** Le rotor et le stator sont traversés par le flux magnétique dans une direction perpendiculaire à l'axe de rotation. Les machines à flux radial et axial sont moins fréquentes, mais peuvent présenter des avantages spécifiques pour certaines applications. [29]

II.4.2) Classification par position des aimants:

- **Aimants en surface (MSAP_S):** On colle les aimants permanents sur la surface du rotor en utilisant de la résine ou en les insérant dans des encoches usinées dans le rotor. La fabrication de cette configuration est facile, mais elle peut être moins solide que les autres types.
- **Aimants noyés (MSAP_I):** On introduit les aimants permanents dans des trous usinés dans le rotor et on les recouvre ensuite d'une matière ferromagnétique. Cette configuration permet une protection accrue des aimants et une dissipation thermique améliorée.
- **Aimants segmentés (MSAP_Seg):** Le rotor est constitué de segments magnétiques alternatifs et non magnétiques.

II.4.3) Classification par type de rotor:

- **Rotor à pôles saillants:** Le rotor est composé de pôles saillants sur lesquels les aimants permanents sont fixés. Ce modèle est facile et solide, mais il est plus bruyant et moins efficace que les autres modèles.
- **Rotor cylindrique lisse:** Le rotor est en forme de cylindre et n'a pas de pôles saillants. Cette configuration présente un plus grand silence et une efficacité supérieure aux rotors à pôles saillants, mais elle est plus difficile à monter.

Autres types de MSAP:

- **Machines à reluctance synchrone (MRS)**
- **Machines hybrides**

II.5) Différents modes de réglage de vitesse de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) :

- a) **Contrôle par variation de la fréquence du stator (commande vectorielle) :**

Principe : Il est essentiel de modifier la fréquence du courant statorique afin d'ajuster la vitesse de rotation du champ magnétique tournant.

Avantage:

- ✓ Large plage de variation de vitesse.
- ✓ Bonne précision et dynamique.
- ✓ Réduction des pertes fer et couple pulsatoire

Inconvénients:

- ✓ Complexité de la commande.
- ✓ Coût élevé des convertisseurs de fréquence

b) Contrôle par variation du flux magnétique statorique :

Principe. : Changement de la circulation magnétique du stator en injectant une tension continue dans le circuit d'excitation.

Avantage:

- ✓ Simplicité relative de la commande.
- ✓ Coût moins élevé.

Inconvénients:

- ✓ Plage de variation de vitesse limitée.
- ✓ Moins précis que la commande vectorielle.
- ✓ Augmentation des pertes fer.

c) Contrôle par variation de la tension statorique :

Principe: En modifiant la tension du stator, on peut ajuster le couple et la vitesse disponibles.

Avantage:

- ✓ Technique simple et économique.

Inconvénients:

- ✓ Faible précision et dynamique.
- ✓ Couple non constant à vitesse variable.
- ✓ Pertes fer élevées.

d) Contrôle par glissement :

Principe : En ajustant le mouvement du champ magnétique en mouvement vers le rotor, on peut contrôler la vitesse.

Avantage:

- ✓ Robustesse et simplicité.

Inconvénients :

- ✓ Performances limitées en comparaison des autres modes.
- ✓ Sensibilité aux variations de charge

II.6) Modes de freinage de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Il existe plusieurs modes de freinage pour la MSAP, chacun avec ses avantages et ses inconvénients :

a) Freinage par courants induits (FCI)

Principe : La vitesse de rotation peut être réduite en injectant un courant dans le stator, ce qui crée un champ magnétique opposé à celui des aimants permanents.

Avantage :

- ✓ Simplicité de mise en œuvre.
- ✓ Contrôle précis du couple de freinage.
- ✓ Faible coût.

Inconvénients :

- ✓ Dissipation d'énergie sous forme de chaleur dans le stator.
- ✓ Nécessite un convertisseur de puissance.
- ✓ Risque de perte de synchronisme à basse vitesse.

b) Freinage par récupération (FR)

Principe : La mise en œuvre de la MSAP comme générateur permet de convertir l'énergie cinétique en énergie électrique qui est réinjectée dans le réseau.

Avantage :

- ✓ Économie d'énergie.
- ✓ Réduction de l'usure des freins mécaniques.
- ✓ Possibilité de freinage à haute vitesse.

Inconvénients :

- ✓ Nécessite un convertisseur de puissance bidirectionnel.
- ✓ Coût plus élevé que le FCI.
- ✓ Complexité accrue du système.

c) Freinage mécanique

Principe : Faire appel à des freins mécaniques afin de ralentir le processus.

Avantage :

- ✓ Simplicité et fiabilité.

- ✓ Large plage de vitesses de freinage.
- ✓ Pas de dissipation d'énergie électrique.

Inconvénients :

- ✓ Usure des freins mécaniques.
- ✓ Coût d'entretien.
- ✓ Non compatible avec les applications nécessitant une régénération d'énergie.

d) Freinage par courants de Foucault

Principe : Induction du rotor à l'aide de courants de Foucault, qui dissipent l'énergie cinétique sous forme de chaleur.

Avantage :

- ✓ Freinage rapide et efficace.
- ✓ Pas de contact entre les pièces mobiles.
- ✓ Faible inertie.

Inconvénients :

- ✓ Dissipation d'énergie sous forme de chaleur.
- ✓ Complexité de la structure du rotor.
- ✓ Coût élevé.

II.7) Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) :**II.7.1) Hypothèses simplificatrices [14].**

La machine synchrone à aimants permanents (MSAP) est un modèle mathématique qui respecte certaines hypothèses simplificatrices :

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- L'absence de la saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (f.m.m), créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés. L'effet des encoches est négligé.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La machine à aimants permanents est composée d'un stator avec un enroulement triphasé. Les aimants permanents situés au niveau du rotor génèrent l'excitation, car ils sont supposés avoir une perméabilité similaire à celle de l'air.

II.7.2) Mise en équation de la MSAP [12].

Les modèles les plus couramment employés des machines électriques reposent sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie repose sur l'évolution de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes, d et q .

Dans le référentiel classique, les trois axes (a_s , b_s , c_s) sont alignés avec les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Traditionnellement, l'axe a_s est choisi comme axe de référence pour les transformations ultérieures. Étant donné que les stators des machines asynchrones et synchrones sont similaires, les référentiels statoriques pour les deux types de machines sont identiques. En ce qui concerne les rotors, les machines asynchrones (MAS) ont toujours trois axes (a_r , b_r , c_r) correspondant aux trois enroulements rotoriques, tandis que les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) ont un seul axe (F) aligné avec la direction de l'aimantation. L'angle (θ_r) représente la position du rotor par rapport au stator.

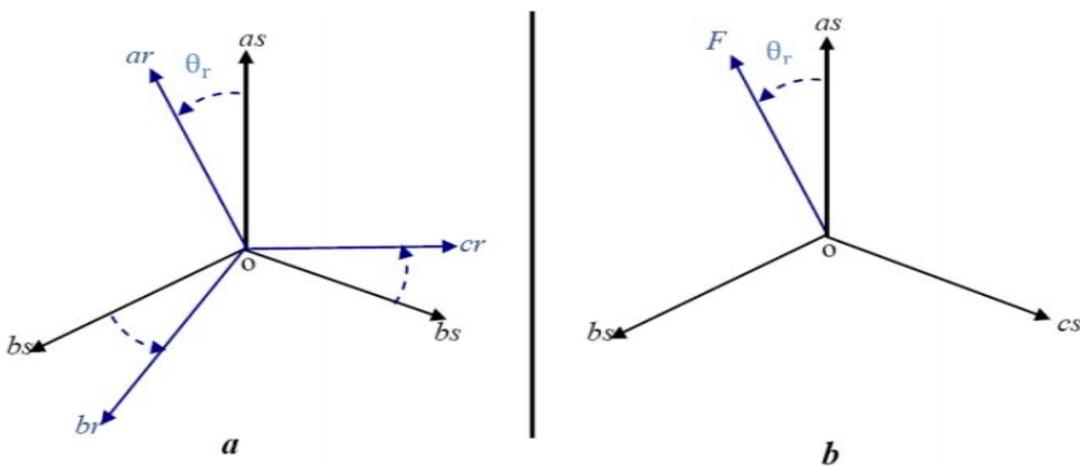


Fig.II. 14: a- machine asynchrone b- machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

Le modèle de la MSAP qui sera élaboré dans notre projet repose sur le schéma présenté dans la figure ci-dessous :

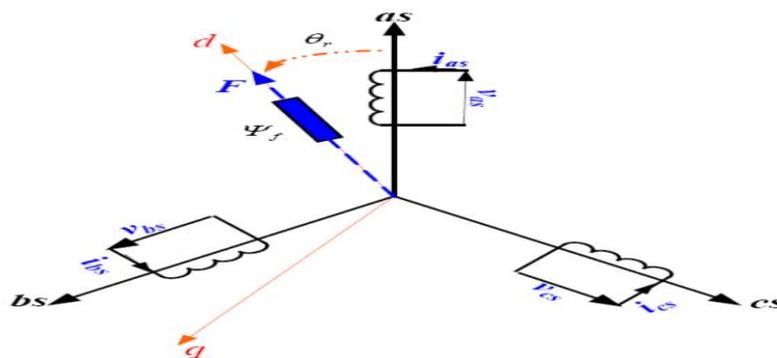


Fig.II. 15: schémas représentatif de la MSAP à modéliser

II.7.2.1) Equations des tensions statoriques

$$\begin{cases} V_A = R_S \cdot I_A + \frac{d}{dt} \psi_A \\ V_B = R_S \cdot I_B + \frac{d}{dt} \psi_B \\ V_C = R_S \cdot I_C + \frac{d}{dt} \psi_C \end{cases} \quad (II.1)$$

Avec :

R_S : la résistance des phases statoriques.

La machine synchrone en question est connectée en étoile à neutre isolé, ce qui signifie que la somme instantanée des courants statoriques est nulle et qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Ainsi, si une composante de tension ou de flux est homopolaire, elle ne joue pas un rôle dans le couple. Ainsi, le comportement de la machine est exprimé par deux variables distinctes.

II.7.2 .2) Passage au repère de Park

Pour simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques déphasées de $2\frac{\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\frac{\pi}{2}$ et situées sur le rotor (Figure II.16)

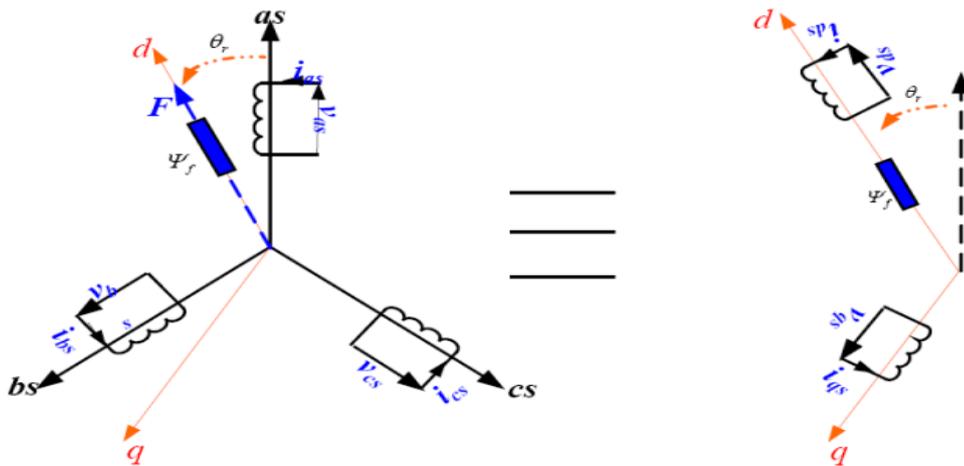


Fig.II. 16: transformation triphasée-diphasée

La transformation de Park (P (θ)) est définie par la matrice suivante :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (II.2)$$

$P(\theta)$ définie le passage du repère a, b, c vers d, q, o

$$P^{-1}(\theta_e) = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & -\sin \theta_e & 1 \\ \cos(\theta_e - 2\frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - 2\frac{\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_e - 4\frac{\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - 4\frac{\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$P^{-1}(\theta)$ définie le passage du repère d, q, o vers a, b, c

II.7.2.3) Modèle de la MSAP dans le repère de Park

La (figure II.16) présente le schéma simplifié du MSAP dans le repère de Park. Le modèle de la MSAP est défini par les équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

Mise en équations :

✚ Equations des tensions

$$\begin{cases} U_d = R_s I_d + \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q \\ U_q = R_s I_q + \frac{d}{dt} \psi_q - \omega \psi_d \end{cases} \quad (\text{II. 4})$$

On inverse le sens des courants en utilisant la convention génératrice, ce qui donne les équations des tensions de la GSAP de la manière suivante :

$$\begin{cases} U_d = -R_s I_d - \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q \\ U_q = -R_s I_q - \frac{d}{dt} \psi_q + \omega \psi_d \end{cases} \quad (\text{II. 5})$$

✚ Equations des flux

$$\begin{cases} \psi_d = L_d I_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q I_q \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

Si on remplace les équations des flux(II.6) dans le système(II.5)on obtient le système suivant

$$\begin{cases} U_d = -R_s I_d - L_d \frac{dI_d}{dt} - \omega L_q I_q \\ U_q = -R_s I_q - L_q \frac{dI_q}{dt} + \omega(L_d I_d + \psi_f) \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

- Mise sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_d & 0 \\ 0 & -L_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -L_d & 0 \\ 0 & -L_q \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -R_s & -\omega L_q \\ \omega L_d & -R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \psi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

✚ Equation de couple

Le couple électromagnétique C_{em} est défini comme la dérivée par rapport à l'angle de rotation géométrique du rotor de l'énergie électromagnétique stockée.

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{dw_e}{d\theta_e} \quad (\text{II. 9})$$

w_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : Nombre de paire de pôle

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2}(U_d I_d + U_q I_q) \quad (\text{II. 10})$$

En remplaçant U_d, U_q par leur expression, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s(I_d^2 - I_q^2) - \left(I_d \frac{d\psi_d}{dt} + I_q \frac{d\psi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\psi_d I_d - \psi_q I_q) \right] \quad (\text{II. 11})$$

Le terme $\frac{3}{2} [-R_s(I_d^2 - I_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes joule dans les enroulements du stator

Le terme $\frac{3}{2} \left(I_d \frac{d\psi_d}{dt} + I_q \frac{d\psi_q}{dt} \right)$ Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

Le terme $\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\psi_d I_d - \psi_q I_q) \right]$: Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que : $P\Omega = w$ et $Pe = Cem. \Omega$ (II. 12)

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(\psi_d I_d - \psi_q I_q)] \quad (\text{II. 13})$$

Après affectation des opérations nécessaire, on peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) I_d I_q - \psi_q I_q] \quad (\text{II. 14})$$

✚ Equation mécanique

$$C_m - C_{em} - f \cdot \Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II. 15})$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

$f \cdot \Omega$: Le couple de frottement

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

II.7.3 Modélisation de la génératrice à vide

II.7.3.1 Equation d'état

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

Les expressions des tensions et couple devient :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = w\phi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (\text{II. 17})$$

II.7.3.2 Schémas bloc de la génératrice à aimants permanents à vide

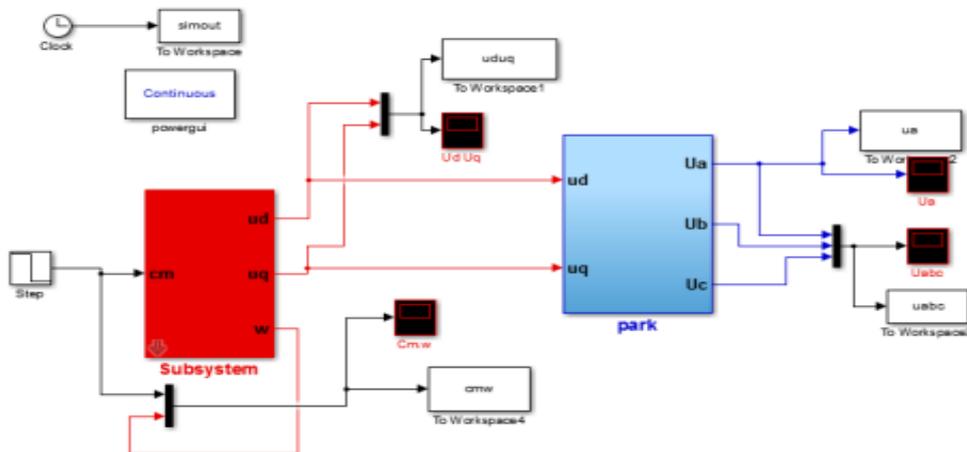


Fig.II. 17: schémas bloc de la génératrice à aimants permanents à vide

II.7.3.3 Résultats de simulation du GSAP à vide

La génératrice a été lancée avec un couple moteur de $C_m = 6.28\text{Nm}$ pendant $0,01\text{s}$, puis elle a été laissée tourner librement. Puisque le frottement pris en compte dans cette situation est nul.

D'après les figures, on peut observer :

(Figure II.18) que la vitesse est stabilisée à une valeur de $78.5.\text{rad/s}.\pi$

(Figure II.19) que les tensions de phases sont parfaitement sinusoïdales avec une π crête de 55 V et une fréquence de 50Hz.

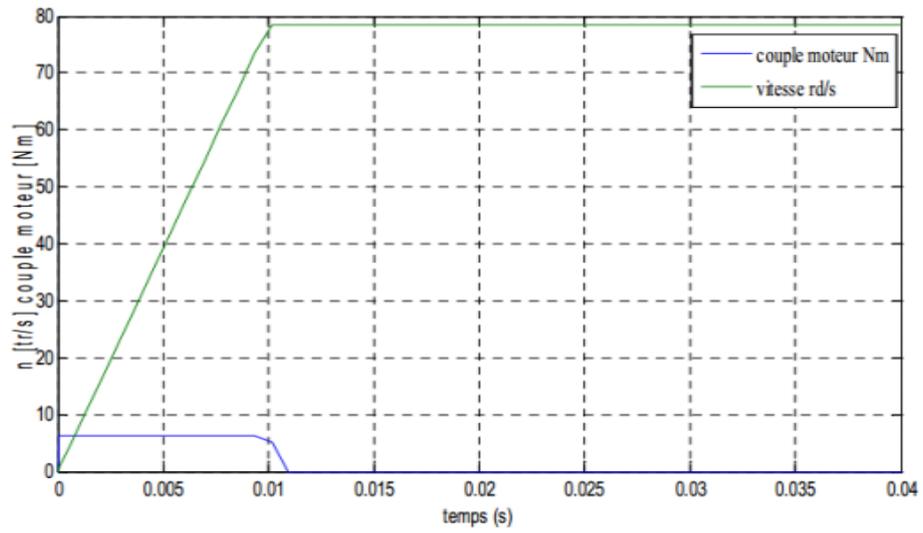


Fig.II. 18 couple moteur et vitesse de rotation

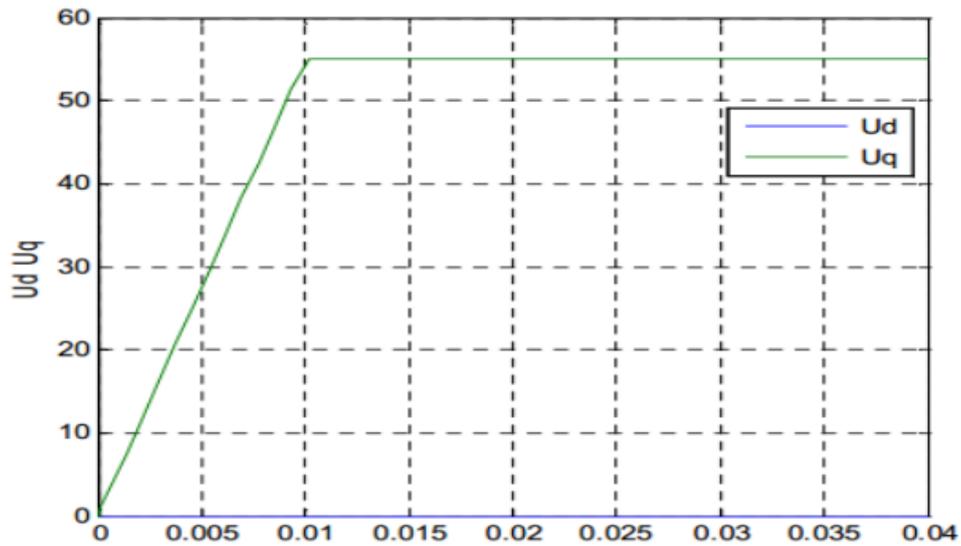


Fig.II. 19: les tensions Ud et Uq

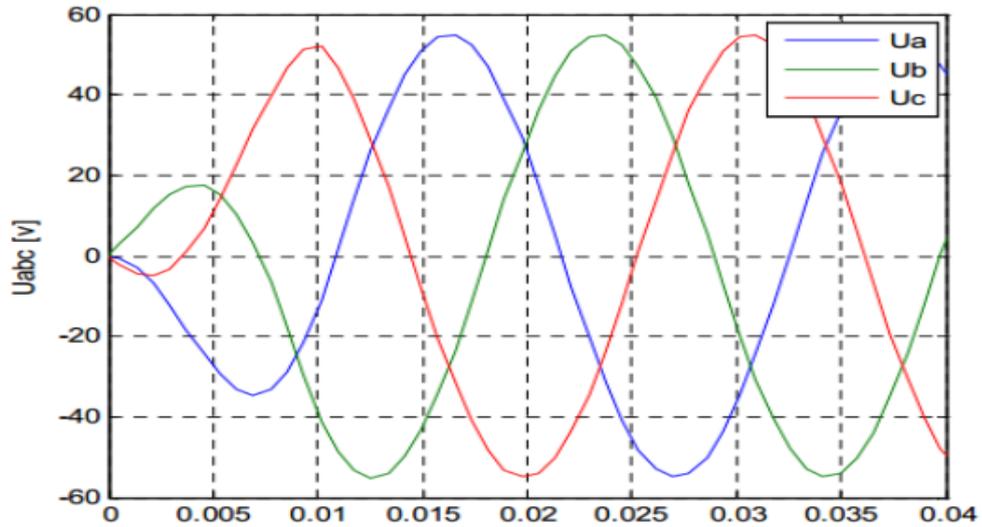


Fig.II. 20: les tensions Ua Ub et Uc

II.7.4 Modélisation de la génératrice en charge [12] :

La génératrice fournit de l'énergie à une charge électrique ($R_{cch} - L_{ch}$). Pour obtenir les tensions et les courants résultants lorsque cette charge est connectée à la génératrice, nous utilisons d'une part les équations fournies dans (II. 7), et d'autre part, nous appliquons les tensions U_d et U_q à la charge, ce qui donne :

$$\begin{cases} U_d = R_{ch}I_d - L_{ch} \frac{dI_d}{dt} - W \cdot L_{ch}I_q \\ U_q = R_{ch}I_q + L_{ch} \frac{dI_q}{dt} + wL_{ch}I_d \end{cases} \quad (II. 18)$$

En remplaçant les expressions de U_d et U_q dans (II. 18) on aura le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{dI_d}{dt} - W(L_d + L_{ch})I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})I_q - (L_d + L_{ch}) \frac{dI_q}{dt} - W(L_d + L_{ch})I_d + W \psi_f \end{cases} \quad (II. 19)$$

En introduisant la transformée de LAPLACE dans les équations ci-dessus :

$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})I_d + W(L_d + L_{ch})I_q] \\ SI_q = \frac{1}{(L_d + L_{ch})} [-(R_s + R_{ch})I_q - W(L_d + L_{ch})I_d + W \psi_f] \end{cases} \quad (II. 20)$$

Considérons le flux d'excitation ψ_f comme grandeur de commande, et les courants I_d, I_q comme variables d'états.

II.7.4.1 Equation d'état :

$$\frac{d}{dt} [\mathbf{X}] = [\mathbf{A}][\mathbf{X}] + [\mathbf{B}][\mathbf{X}] \quad (\text{II. 21})$$

$$[\mathbf{X}] = [I_d \ I_q]^t, [\mathbf{V}] = [0 \ \psi_f]^t \quad (\text{II. 22})$$

Les équations (III. 20) peuvent s'écrire sous la forme matricielle (II. 23):

$$\begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R_s + R_{ch}}{L_d + L_{ch}} & -W \frac{L_q + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} \\ -W \frac{L_d + L_{ch}}{L_q + L_{ch}} & -\frac{R_s + R_{ch}}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ W \frac{\psi_f}{L_q + L_{ch}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

II.7.4.2 Modélisation de l'onduleur de tension [30,31].

Les transistors sont des composants semi-conducteurs contrôlables dans un onduleur de tension triphasé. Différentes techniques sont employées afin de contrôler les interrupteurs d'un onduleur. La meilleure méthode est la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Il existe pratiquement plusieurs types de MLI, parmi lesquels on peut mentionner :

- L'utilisation des modulations sinus-triangle permet de comparer un signal de référence sinusoïdal à une porteuse généralement triangulaire.
- Les modulations pré-calculées sont utilisées pour calculer les angles de commutation en dehors de la ligne afin d'annuler certaines composantes du spectre de la tension et de générer une onde fondamentale spécifique.
- Les modulations post-calculées, également connues sous le nom de modulations de largeur d'impulsion (MLI) régulières symétriques ou MLI vectorielles, sont caractérisées par le calcul en temps réel des angles de commutation.

Nous focalisons notre attention sur la première méthode. Pour représenter l'onduleur de tension (voir Figure II.21), nous traitons son alimentation comme une source idéale, composée de deux générateurs de force électromotrice **f.e.m.** égale à $(\frac{U_0}{2})$, connectés entre eux par un point n_0 .

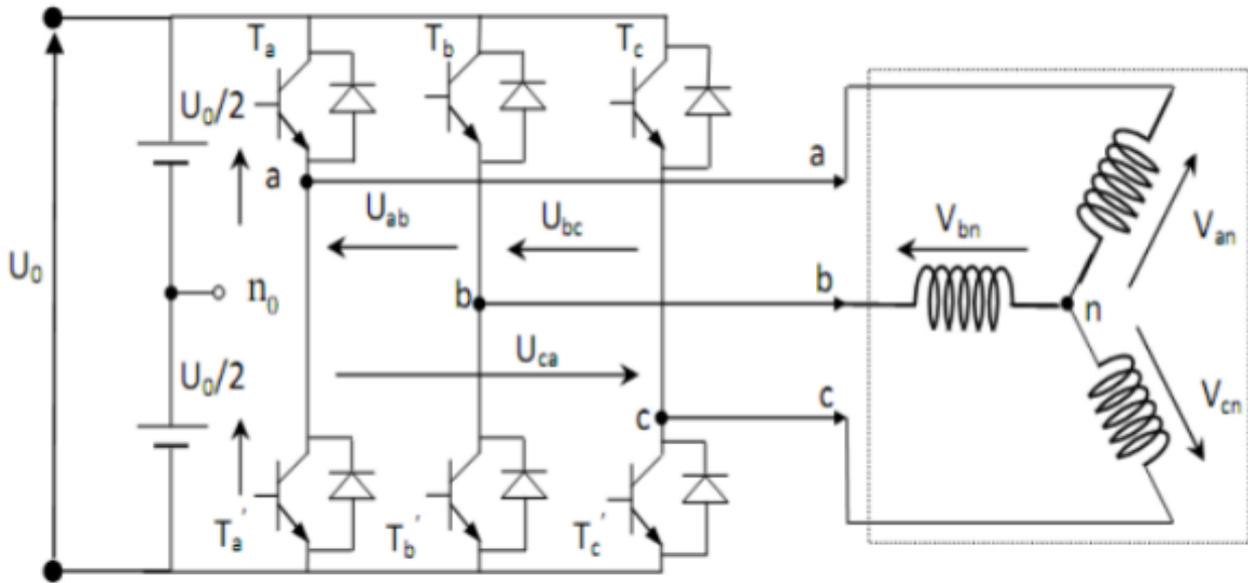


Fig.II. 21: schémas de l'onduleur triphasé

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} , et V_{cn}

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T_i'

les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

- Si $S_i = 1$, alors T_i est fermée et T_i' est ouvert.
- Si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est fermée.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \text{ (II. 24)} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases}$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \text{ (III. 25)} \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases}$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0

$$\begin{aligned} V_{an} + V_{nn0} &= V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} &= V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} &= V_{cn0} \end{aligned} \quad \text{(II. 26)}$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{an} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{cb0} + V_{cn0}] \quad (\text{II. 27})$$

L'état des supposés parfaits \Leftrightarrow Si (1 ou 0) [i=a, b, c] on a interrupteurs :

$$V_{ino} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (\text{II. 28})$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - \frac{1}{2})U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - \frac{1}{2})U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - \frac{1}{2})U_0 \end{cases} \quad (\text{II. 29})$$

En remplaçant (II. 28) dans (II. 29), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = \frac{1}{3}V_{an0} - \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = \frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (\text{II. 30})$$

En remplaçant (II.31) dans (II.32), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

II.7.4.3 Schémas bloc de la génératrice à aimants permanents en charge

A partir des équations (II. 20 à II. 30 et II. 15), on construit le bloc de simulation de la génératrice (Figure II.15)

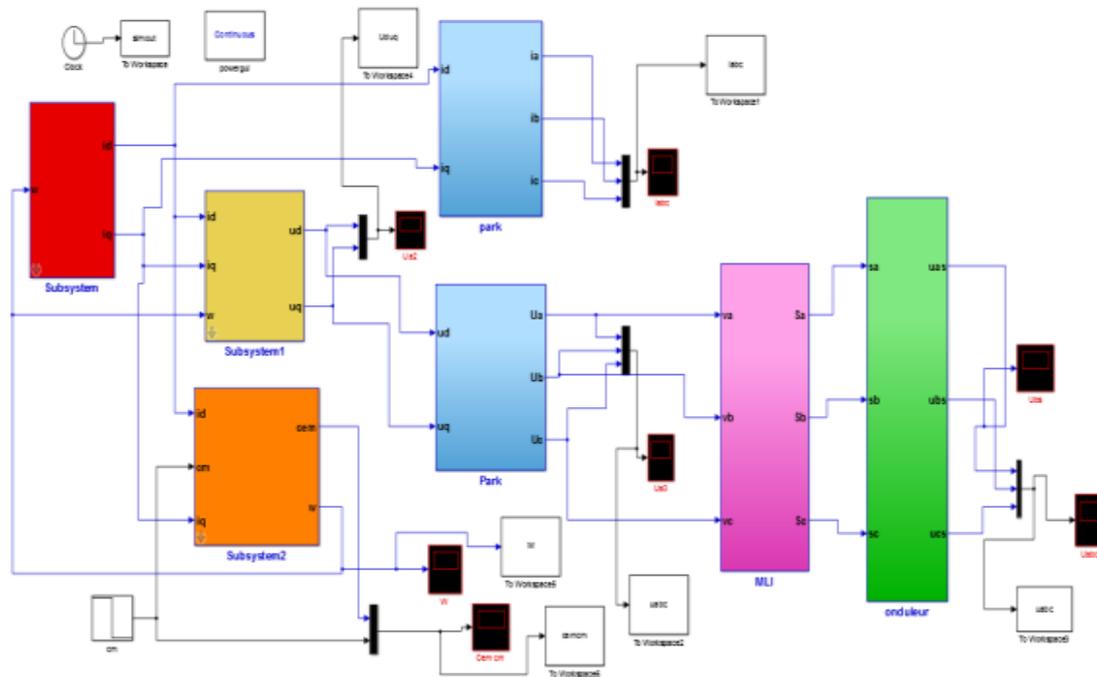


Fig.II. 22 schéma bloc de la génératrice à aimants permanents en charge

II.7.4.4 Résultats de simulation de GSAP en charge

Suite à la simulation du modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents en conditions de charge, les résultats correspondants sont exposés dans les figures suivantes.

Pour investiguer l'impact de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs distincts sont appliqués (Figure II.26). L'analyse des résultats, illustrés dans la Figure II.25, révèle une vitesse génératrice significativement basse, loin de celle de synchronisme, entraînant des fréquences de tension et de courant réduites telles que représentées dans les Figures II.23 et II.24. Cette observation découle d'un couple moteur insuffisant. La réduction du couple moteur de 6.28 Nm à 4.2 Nm induit une variation de la vitesse mécanique de 88 rad/s à 58 rad/s, avec une chute correspondante de la tension de 77.28 V à 51.65 V et du courant de 1.544 A à 1.032 A. Il en découle clairement que la puissance électrique de la charge est directement corrélée à la puissance mécanique fournie.

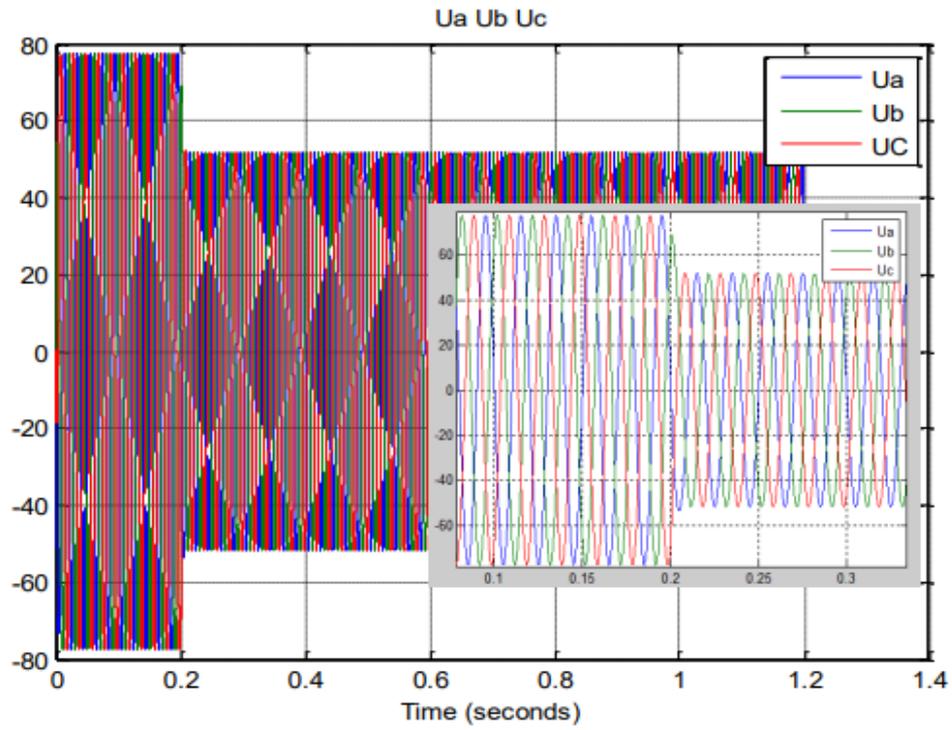


Fig.II. 23: Les tensions U_a U_b et U_c

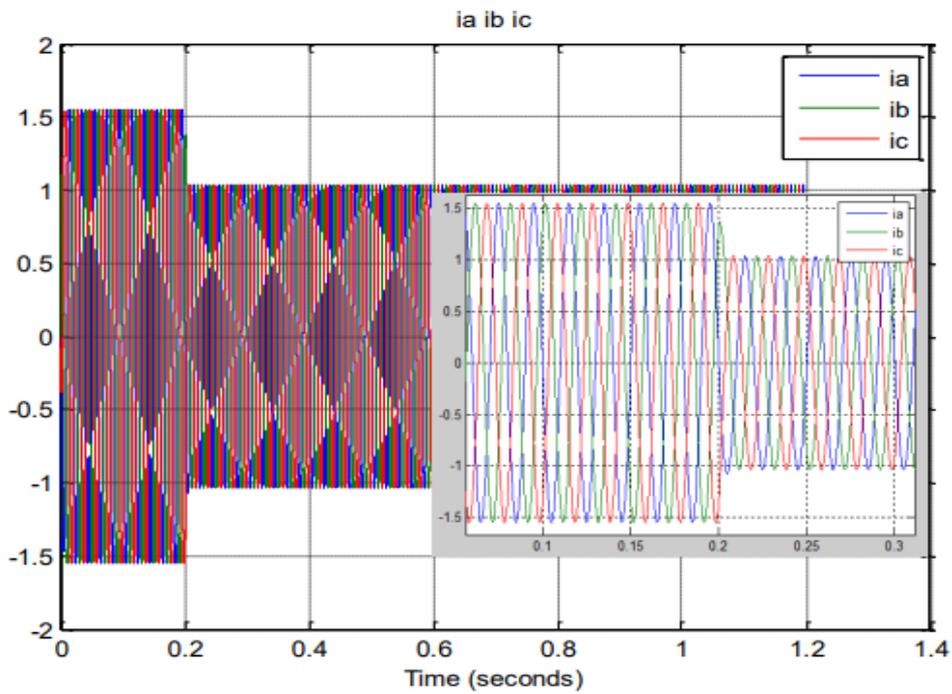


Fig.II. 24 : Les courants i_a i_b i_c

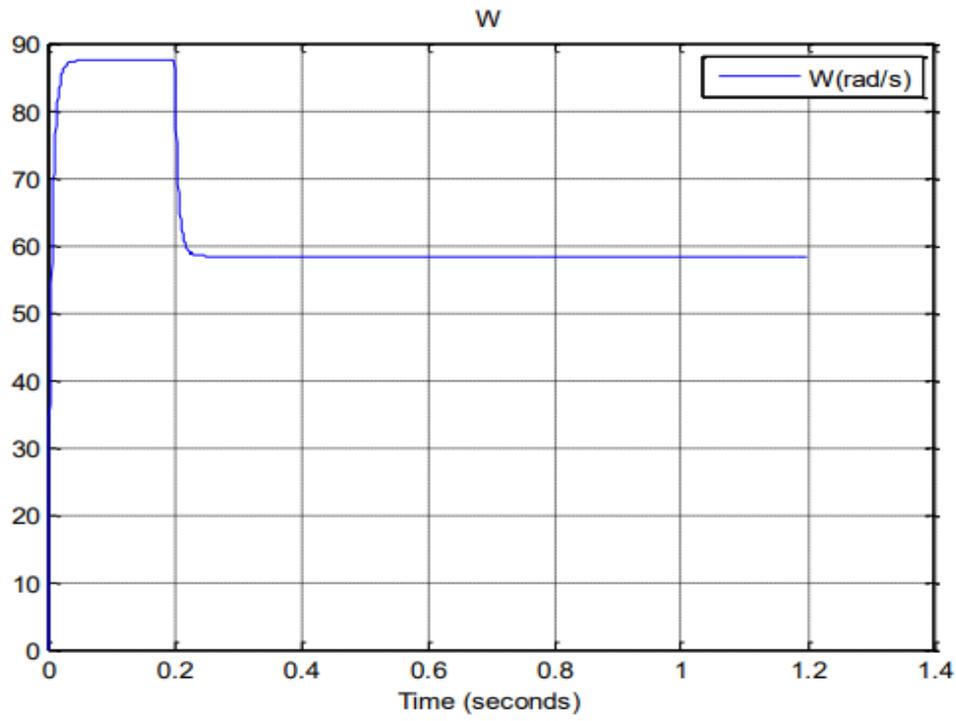


Fig.II. 25: vitesse de rotation

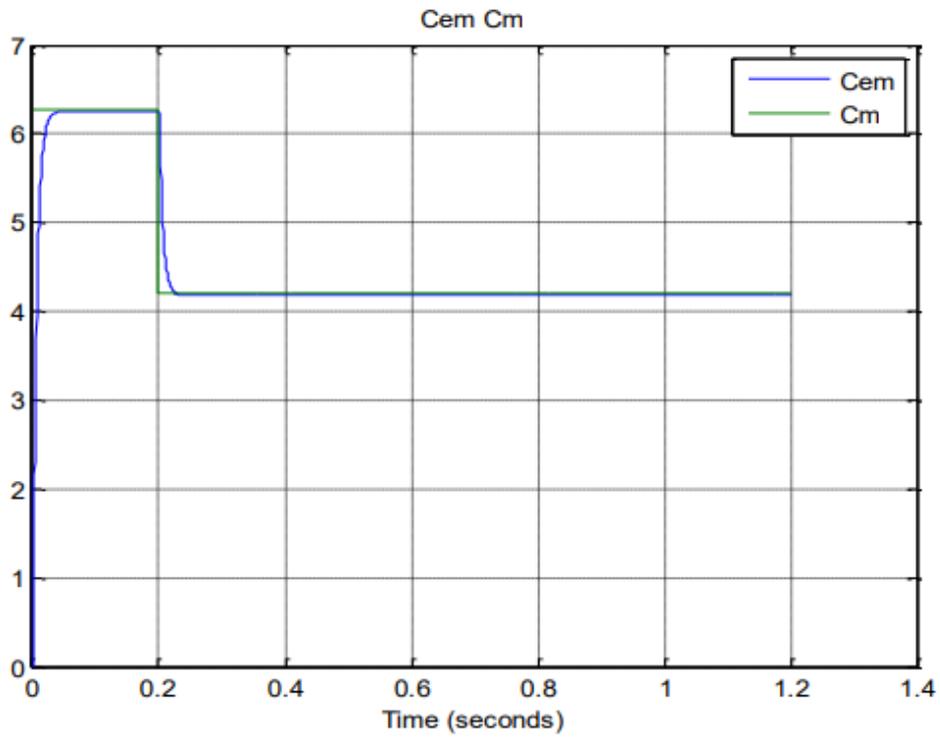


Fig.II. 26: couple électromagnétique et couple moteur

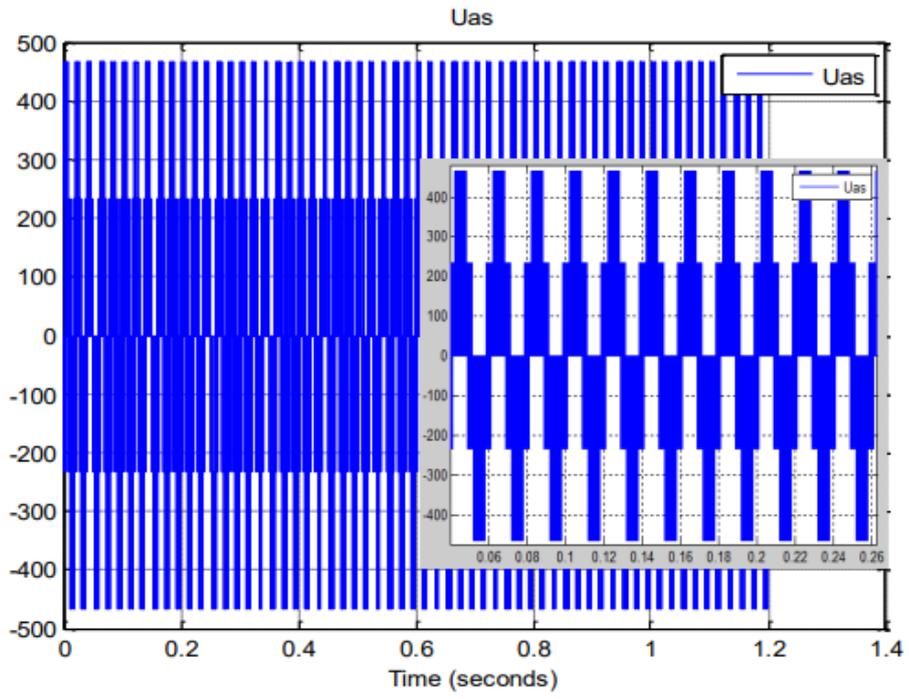


Fig.II. 27: tension de phase U_{as}

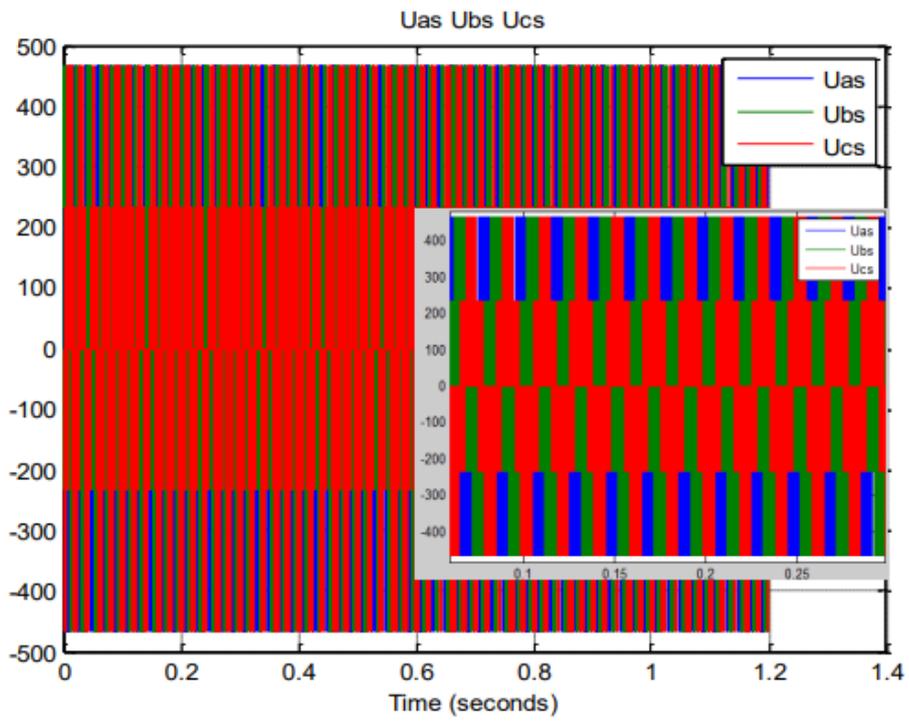


Fig.II. 28: les tensions U_{as} U_{bs} et U_{cs}

II.8) Avantages de la MSAP

Par rapport aux autres types de machines, les machines synchrones à aimants permanents offrent de nombreux avantages :

- ✓ Puissances massiques élevées.
- ✓ Absence de contacts glissants.
- ✓ Un bon rendement
- ✓ Absence des balais et d'alimentation continue.
- ✓ Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- ✓ Fonctionnement en survitesse.

Ainsi, cette machine convient parfaitement aux systèmes embarqués et peut être utilisée pour des systèmes à faible puissance (petits moteurs) ou à plus grande puissance (jusqu'à quelques dizaines de MW en courant moteur). [28]

II.9) Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- ✓ Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- ✓ Interaction magnétique due au changement de structure.
- ✓ Ondulations de couple.

II.9) DOMAINE D'APPLICATION DE LA MSAP

C'est ainsi que le moteur synchrone peut être très utile dans de nombreuses applications, comme :

- les équipements domestiques (machine à laver le linge),
- les automobiles,
- les équipements de technologie de l'information (DVD drives),
- les outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements,
- les équipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste),
- les servomoteurs,
- les applications robotiques,
- la production d'électricité,
- les propulsions des véhicules électriques et la propulsion des sous marins

- les machines-outils,
- les applications de l'énergie de l'éolienne

II .10) Conclusion :

Suite à la comparaison des machines synchrones à aimants permanents avec les autres types de machines nous pouvons confirmer que la machine à aimants permanents aura un avenir très intéressant surtout avec l'apparition des aimants à haute performance.

Nous avons présenté dans ce chapitre généralités sur la machine synchrone à aimants permanents et la modélisation et la simulation de la génératrice synchrone à aimants permanents sous l'environnement Matlab-Simulink. Après avoir présenté les types des aimants permanents, les différentes structures rencontrées, nous avons établie, les différentes équations de la machine électrique triphasée dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée au cours de ce travail. La modélisation a été validée par des résultats de simulation à vide, et avec une charge.

Chapitre III

Modélisation globale de la chaîne de conversion de l'aérogénérateur GSAP

III.1) Introduction

Après avoir exposé le principe de la conversion de l'énergie éolienne et modélisé les composants clés de la chaîne de conversion, à savoir la turbine et le générateur, ce chapitre se consacre à la présentation de la structure globale de cette chaîne. Une modélisation détaillée des différents éléments y est effectuée, suivie d'une simulation comportementale du système complet sur les plans électrique et énergétique.

III.2) Alimentation utilisant redresseur à diode et onduleur contrôlés par MLI, [12,14] :

Dans le but de réduire les coûts, l'utilisation d'un pont de diodes, économique, semble attrayante pour les applications de faible puissance, à condition que les performances énergétiques ne soient pas significativement compromises. Dans cette topologie, le redresseur à diodes est positionné entre le bus continu et le générateur, tandis qu'un onduleur à fréquence fixe, contrôlé par modulation de largeur d'impulsions (MLI), est placé entre le bus continu et le réseau de distribution (Fig. III.1). Ainsi, la puissance transférée entre le générateur et le bus continu est unidirectionnelle, ce qui restreint le fonctionnement du générateur au freinage uniquement. Cette configuration limite considérablement la régulation de la vitesse du générateur et, par conséquent, la capacité à extraire la puissance maximale.

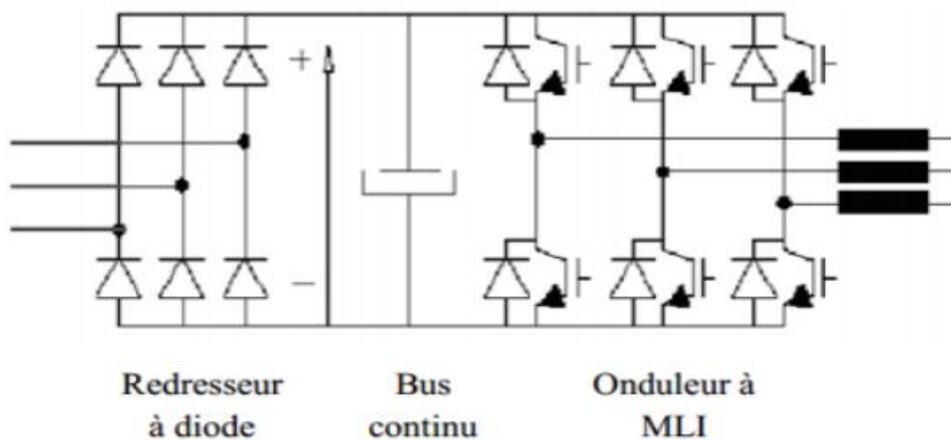


Fig.III. 1 :Alimentation avec un redresseur à diodes

III.3) Modélisation du redresseur triphasé double alternance à diodes, [32].

Le redresseur est un dispositif de conversion d'énergie qui transforme le courant alternatif (CA) en courant continu (CC). Ce processus de conversion permet de produire une source de courant continu à partir d'une source de courant alternatif. Le schéma de ce processus est illustré à la figure III.2.

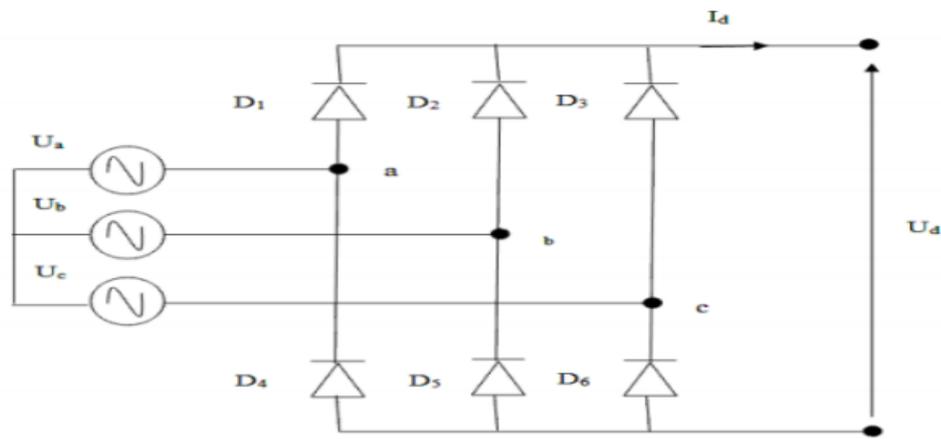


Fig.III. 2: représentation de la redresseur triphasé double alternance

Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D2, D3) à cathode comme assurant l’aller du courant I_d et trois diodes (D4, D5, D6) à anode comme assurant le retour du courant I_d . le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} U_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ U_b(t) = V_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ U_c(t) = V_m \sin(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

Et si on néglige d’empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suite :

$$U_{rd}(t) = \max[U_a(t), U_b(t), U_c(t)] - \min[U_a(t), U_b(t), U_c(t)]$$

III.4) Modélisation du filtre, [32].

Un filtre passe-bas de type LC est utilisé pour éliminer les hautes fréquences. Ce filtre est représenté par le schéma de la (figure III.3).

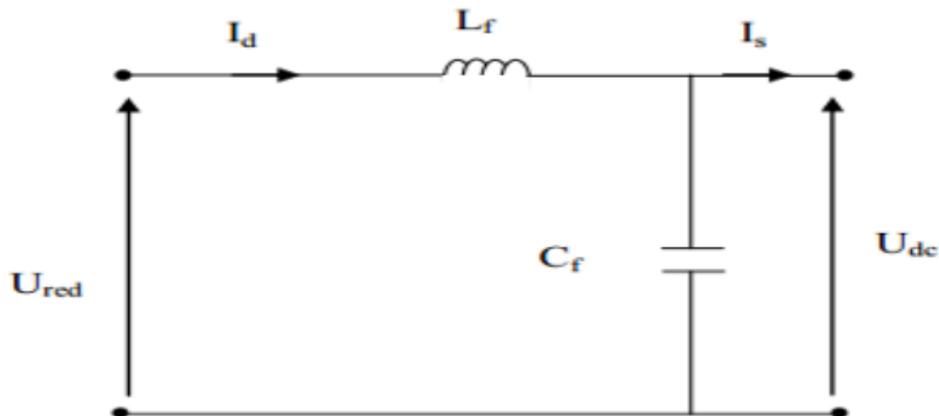


Fig.III. 3: Représentation d'un filtre passe-bas

Le modèle du filtre est défini par le système d'équation suivant :

$$U_{red}(t) = L_f \frac{dI_d(t)}{dt} + U_{dc}(t)$$

La fonction du transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{U_{dc}(t)}{U_{re}(t)} = \frac{1}{1 + (\sqrt{L_f C_f} S)^2}$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}}$$

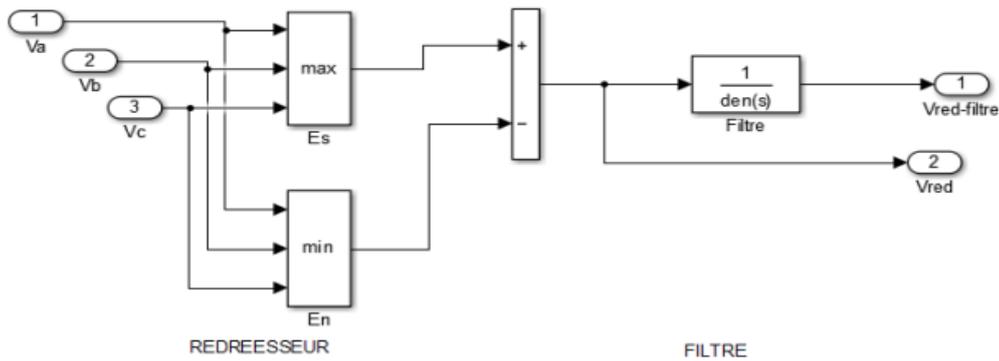


Fig.III. 4: schéma bloc du redresseur et du filtre

III.5) Modèle complet de la chaîne de conversion éolienne :

III.5.1) Modèle utilisant des interrupteurs idéaux des convertisseurs de puissance :

Ce modèle utilise des interrupteurs idéaux pour les deux convertisseurs, tandis que le filtre et le transformateur sont modélisés dans le repère naturel. La configuration est illustrée dans la (figure III.5)

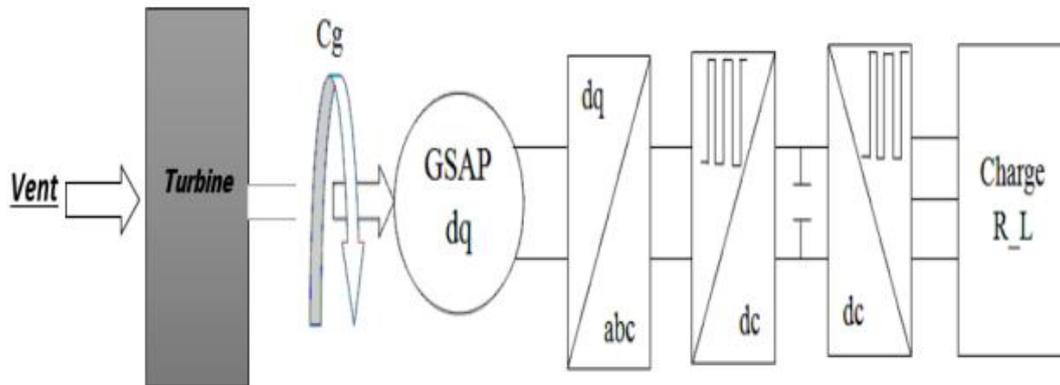


Fig.III. 5; Modèle à interrupteurs idéaux de la chaîne de conversion éolienne avec GSAP

III.5.2) Chaîne de conversion éolienne :

La figure (Fig. III.6) illustre le schéma de simulation de la chaîne complet de conversion éolienne

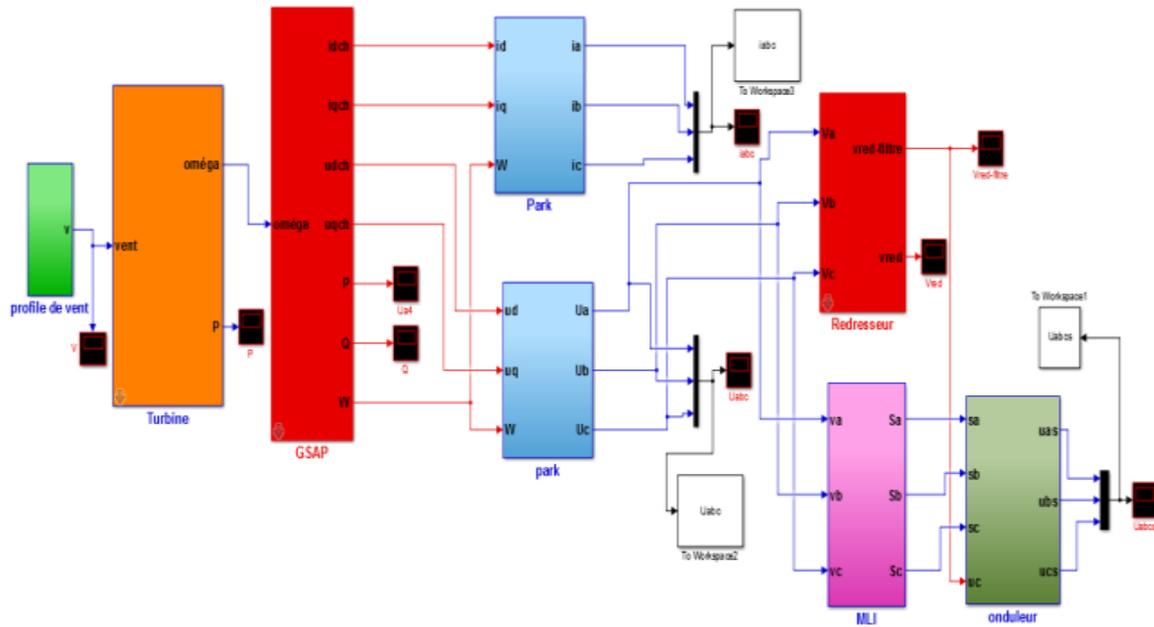


Fig.III. 6: Shéma bloc de la chaîne de la conversion éolienne

III.6) Résultats de simulations

Les résultats des simulations ont été obtenus pour une vitesse moyenne du vent de 7,5 m/s, variant entre 7,5 et 13 m/s.

🚩 Profile du Vent

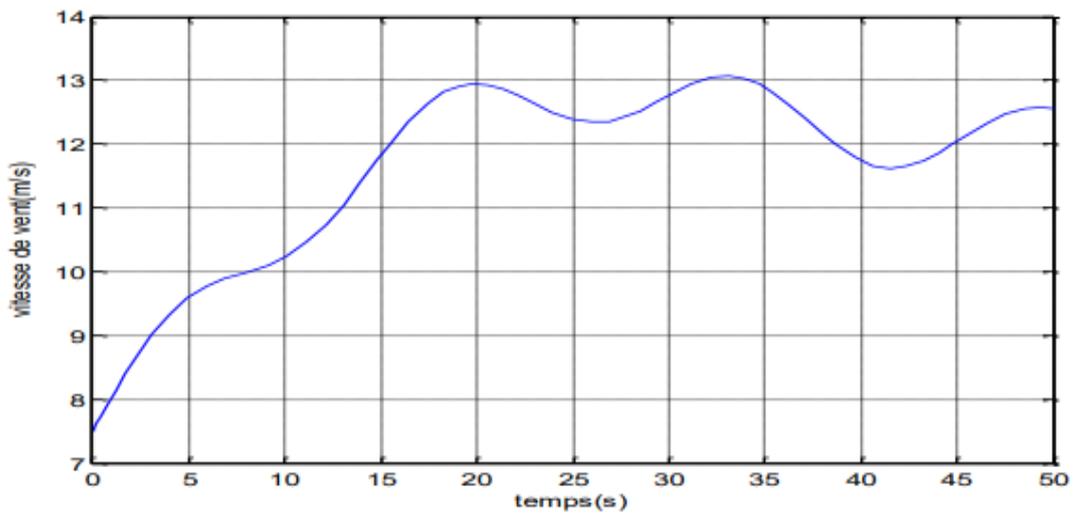


Fig.III. 7: Profile du vent appliqué à la turbine

⚡ Puissance active et réactive

À partir des résultats illustrés à la figure III .8, on observe que les puissances active et réactive s'ajustent en fonction de la variation de la vitesse du vent. De plus, on constate que la courbe de la puissance mécanique de la turbine est bien suivie par celle de la puissance électrique produite par la GSAP.

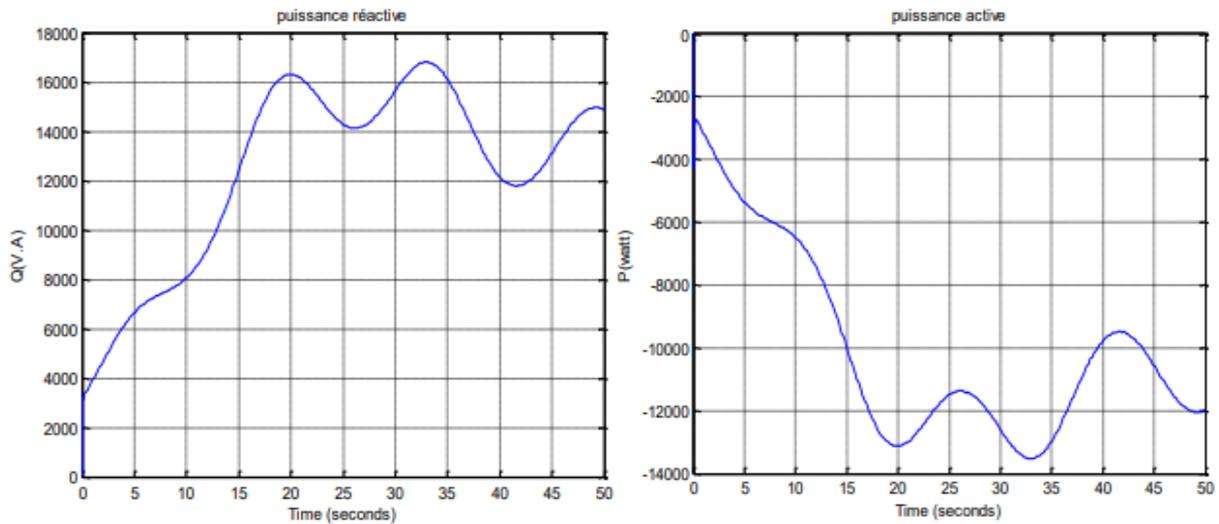


Fig.III. 8: Allure des Puissances active et réactive

⚡ les tensions

Les tensions statoriques de la GSAP, telles que représentées dans la figure III.9, adoptent des formes sinusoïdales et s'ajustent également en fonction de la variation de la vitesse du vent.

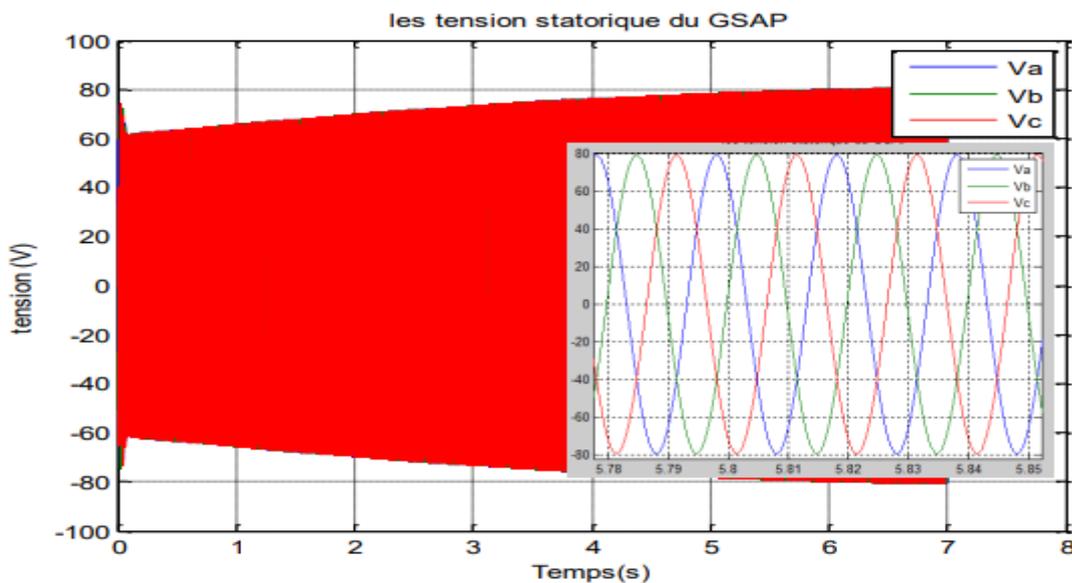


Fig.III. 9: Allure des Tensions statoriques Vabc de la GSAP

La figure (Fig III.10) représente les tensions du filtre et du redresseur

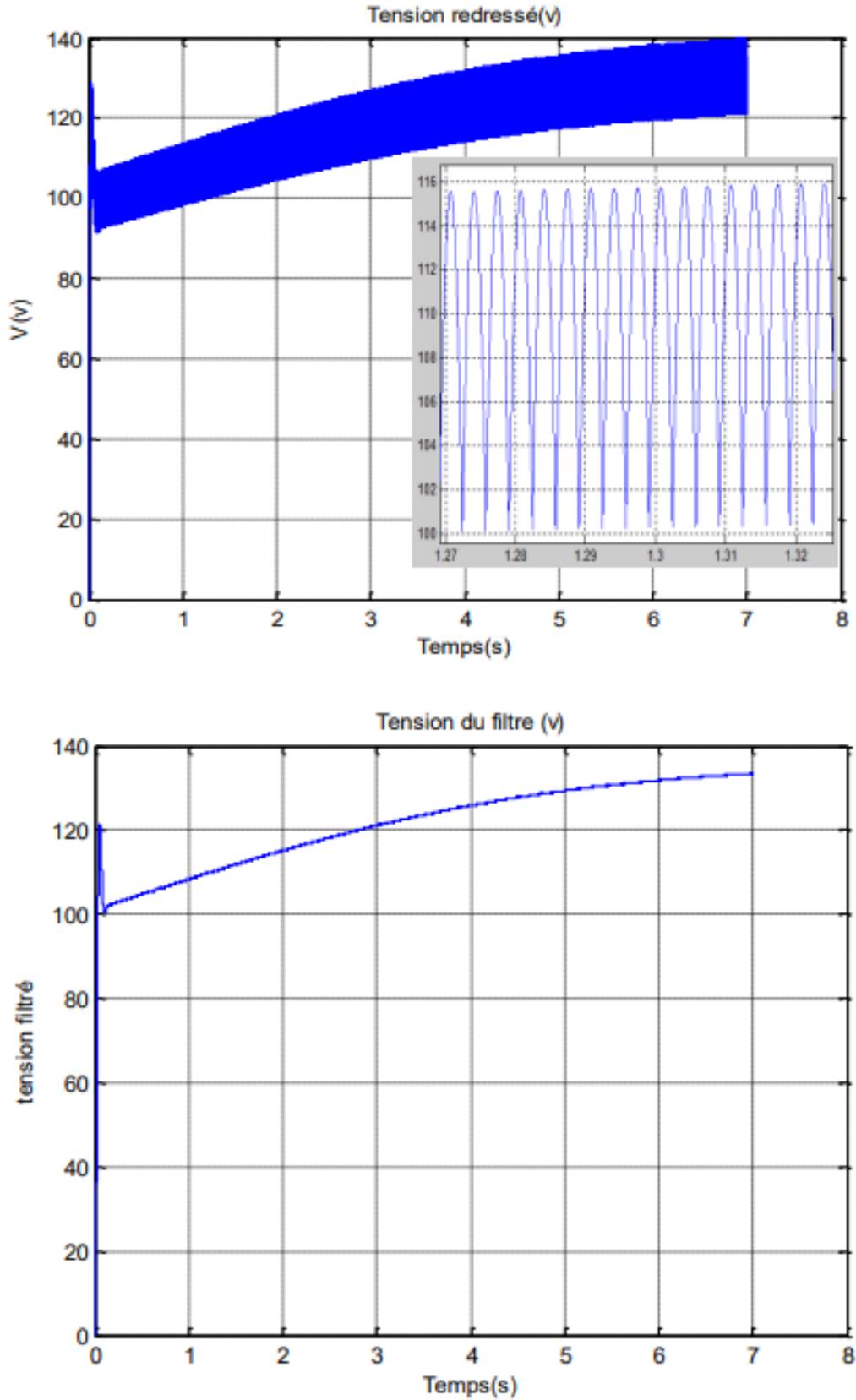


Fig.III. 10: Allure des Tensions redressé et filtrée

La figure. III 11 illustre l'allure de la tension à la sortie de l'onduleur. Il est évident que l'amplitude de la tension augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent.

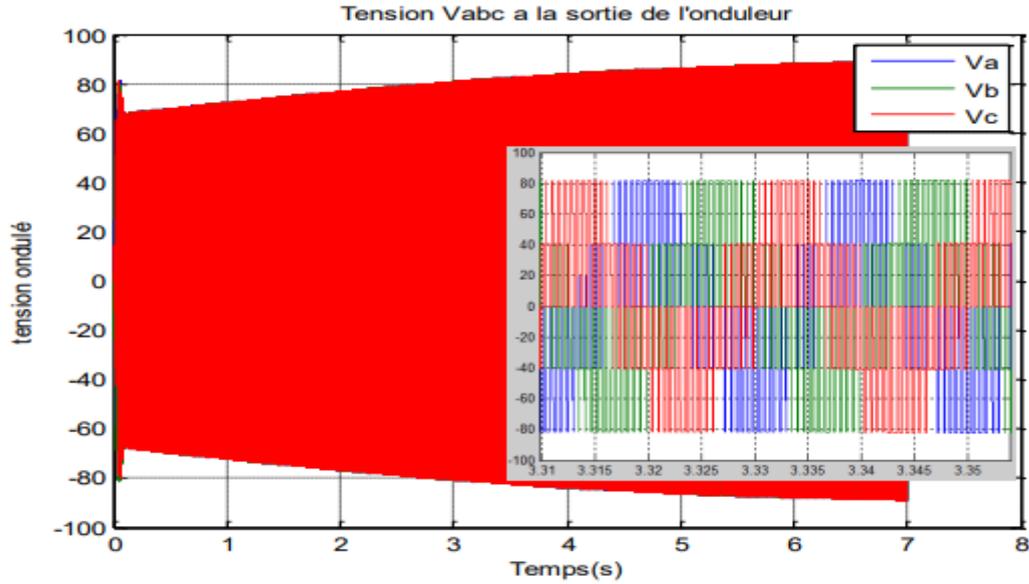


Fig.III. 11: Allure de la tension à la sortie de l'onduleur

Courant

Les courants statoriques, comme illustré dans la figure. III.12, adoptent des formes sinusoïdales et s'ajustent également en fonction de la variation de la vitesse du rotor. La fréquence rotorique est tributaire de la variation de rotation de l'éolienne.

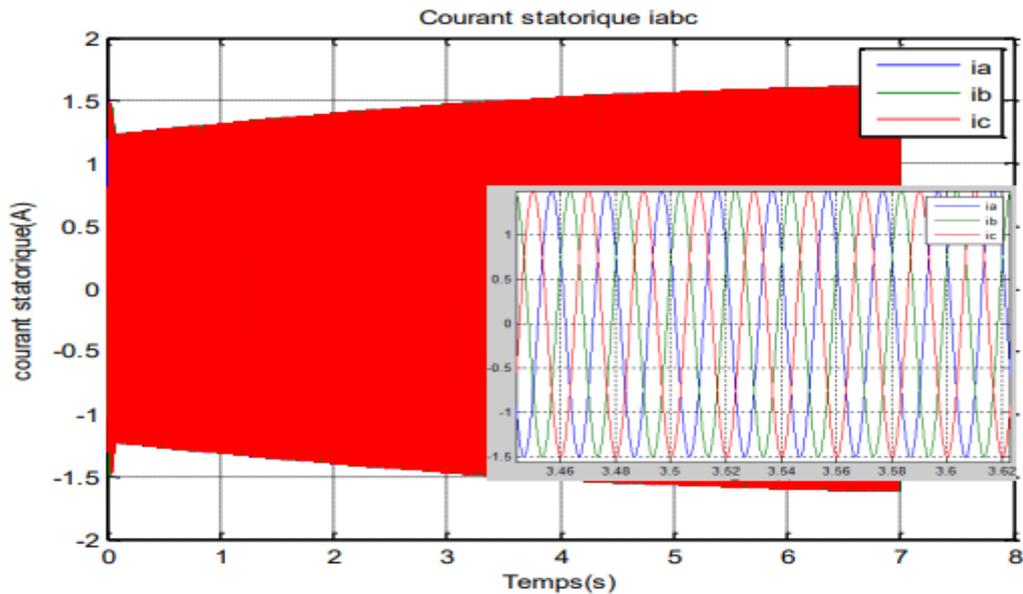


Fig.III. 12: Allure des courants

À partir des figures précédentes, on remarque l'influence de la vitesse du vent et, par conséquent, de son énergie cinétique sur les amplitudes des courants et des tensions. Avec l'augmentation de la vitesse du vent, les valeurs du courant et de la tension deviennent plus élevées, tant du côté de la génératrice que du côté de la charge.

III .7) Conclusion

Après avoir examiné les diverses topologies des convertisseurs statiques couramment utilisés dans les structures éoliennes basées sur la génératrice synchrone à aimants permanents, nous avons développé un modèle de la chaîne de conversion éolienne comprenant une turbine, une génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur triphasé, un filtre et un onduleur. Ce système est connecté à une charge RL. Nous avons simulé l'ensemble pour une vitesse de vent variable, avec une valeur moyenne de 7,5 m/s et une variation entre 7,5 et 20 m/s. Les résultats de la simulation ont démontré la capacité d'extraire un maximum d'énergie du vent.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Une grande partie des enjeux environnementaux actuels sont associés à des problèmes liés à l'énergie. Le changement climatique et toutes ses répercussions sur la planète, par exemple, sont principalement liés à notre production d'énergie, car ce sont les énergies que nous utilisons.

Les ressources que nous utilisons (en particulier les énergies fossiles) sont responsables de l'effet de serre et des émissions de CO₂. [3]

Tout d'abord, une brève description des systèmes éoliens a été exposée. Comme de nombreuses énergies renouvelables, le potentiel éolien mondial est important car il dépasse largement la consommation énergétique actuelle.

L'humanité. Toutefois, la croissance de son utilisation ne sera pas influencée par les défis technologiques actuellement surmontés sur le plan pratique, mais plutôt par les données économiques et politiques qui favorisent ou non les différentes formes d'énergies exploitables.

En ce qui concerne la technologie éolienne, quelques concepts clés ont été exposés, principalement en ce qui concerne la conception, les différents types d'éoliennes utilisés et la classification des éoliennes.

Dans cette situation, ce mémoire a examiné un système de conversion d'énergie éolienne qui utilise une génératrice synchrone à aimants permanents, une turbine et des convertisseurs statiques de puissance pour produire de l'électricité. Ce choix a été fait.

L'intérêt des chercheurs et des industriels pour ce type de structures d'éoliennes explique cela. Effectivement, les avancées actuelles dans le domaine des matériaux magnétiques offrent une utilisation améliorée des génératrices synchrones à aimant permanent et à moindre coût pour la fabrication de machines de grande taille. [5]

On y traite du modèle du système éolien, qui tient compte de l'aérodynamique et de la dynamique électrique d'un générateur pour sa gestion. Le modèle est simulé à l'aide du logiciel Matlab/Simulink du système en question. Nous avons examiné les simulations de l'éolienne utilisant un générateur synchrone à aimant permanent et des convertisseurs électroniques de puissance en fonction de leurs performances à différentes vitesses du vent. Ainsi, dans ce mémoire, les résultats de la simulation du modèle mathématique du système complet sont présentés, démontrant ainsi la validité et l'efficacité du système proposé. [5]

Les résultats de simulation pour la vitesse du vent variable permettent d'observer l'influence de la vitesse du vent sur le courant, la tension et la puissance, qui évaluent plus avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Paramètres de Simulation

1. Paramètres de la génératrice synchrone à aimants permanents

- Génératrice à aimant permanent à vide

	Désignation	Valeur	Unité
R_s	Résistance statorique	2.875	Ω
L_d	Inductance statorique selon l'axe d	0.0085	H
L_q	Inductance statorique selon l'axe q	0.0085	H
ψ_f	Flux des aimants permanents	0.7006	Wb
f	Coefficient de frottement	0	(Nm/rd)/s
J	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice	0.0008	Kg. m ²
P	Nombre de paire de pôles	4	—

- Génératrice à aimant permanent en charge

	Désignation	Valeur	Unité
R_s	Résistance statorique	0.895	Ω
R_{ch}	Résistance de charge	50	Ω
L_d	Inductance statorique selon l'axe d	0.012	H
L_q	Inductance statorique selon l'axe q	0.0211	H
L_{ch}	Inductance de charge	0.002	H
ψ_f	Flux des aimants permanents	0.9	Wb
f	Coefficient de frottement	0.001	(Nm/rd)/s

2. Paramètres de la Turbine éolienne

	Désignation	Valeur	Unité
<i>R</i>	Rayon de la surface balayée par les pales	3.1915	<i>m</i>
<i>f</i>	Coefficient de frottement	0.001	(Nm/rd)/s
<i>J</i>	Moment d'inertie de la turbine	7.68	Kg. m²
<i>ρ</i>	Densité de l'air à 15°C	1.08	m⁻³
<i>G</i>	Gain du multiplicateur	1	—
<i>C_{p_max}</i>	Coefficient de puissance maximal	0.442	—
<i>Landa_opt</i>	vitesse spécifique optimale correspondant à <i>C_{p_max}</i>	9.81	—

- [1] Commande d'un système éolien basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent.(MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ENELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE/UNIVERSITE LARBI TEBESSI –TEBESSA/Présenté par le binôme :-KefaliKhouala-MecheriWahid).
- [2] Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne à base d'un générateur synchrone à aimants permanents.(MEMOIRE DE FIN D'ETUDES Pour l'obtention du diplôme de Master/UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET/Préparé par: DEBBA Souhila KERBACHE Saadia).
- [3] Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP.(MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER/UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR/Présenté par : Mahdaoui Hamza).
- [4] Commande prédictive d'une Génératrice Synchrone à aimant permanent (GSAP).(Mémoire de fin d'étude Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE/Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued/ - KERROUCHE Mohammed- GAGAA Ali Abdullah Ali - HATHROUBI Kame).
- [5] Modélisation et simulation d'un générateur synchrone à aimant permanent couplé à un aérogénérateur. (MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER/UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR/Présenté par : YAICHI Hayat GUENDOUIZ Sarah).
- [6] Modélisation et simulation d'un système hybride (turbine éolienne – générateur synchrone) pour une compagnie isolée. (Mémoire de Fin d'Étude En vue de l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE/Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued/Réalisé par: BAADI Fatiha BEN HAOUA Chouaib).
- [7] Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent. (THESE Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3ème cycle/BADJI MOKHTAR ANNABA UNIVERSITY عنابة باجي جامعة مختارUNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA/ParLOUAR FATEH).
- [8] Commande prédictive d'une Génératrice Synchrone à aimant permanent (GSAP).(Mémoire de fin d'étude Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER ACADEMIQUE/Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued/ - KERROUCHE Mohammed- GAGAA Ali Abdullah Ali - HATHROUBI KameL).
- [9] L. Louze, «Production décentralisée de l'énergie électrique : modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée», thèse de doctorat de l'université de Mentouri –Constantine, 08 juillet 2010.
- [10] L. Khettahe, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine Électrique double alimentée », thèse de magistère de l'université de El Hadj Lakhdar–Banta, option énergie renouvelable, 2007.
- [11] S.HAMECHA, «Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents», thèse de magistère de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 25/06/2013.
- [12] M. Mayouf, «Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à Aimants permanents », thèse de magistère de l'université d'Al Hadj Lakhdar – Banta, option énergie renouvelable, 2007.
- [13] A.BOUHEDDA, «Contribution à étude de systèmes de commande d'une éolienne», thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 07/07 /2011

- [14] S. El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat de l'université des sciences et Technologie de Lille I, N°d'ordre 4, 06 décembre 2004.
- [15] I. Hamzaoui, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur », thèse de magistère de l'école nationale polytechnique Alger, 20 janvier 2008.
- [16] T.Hualin and J. Chang, "Field Orientation and Adaptative Backstepping for Induction Motor Control", Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, IEEE Industry Applications Conference, Vol.4, pp. 2357 – 2363, Oct 3-7, 1999.
- [17] LAHOUEL Dalila, Commande non linéaire adaptative d'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [18] BENBRAHIM Amel, Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, année 2009.
- [19] A.TITAOUINE, F. BENCHABANE, K. YAHIA, PR: A. MOUSSI, Commande d'une machine synchrone à aimants permanents et estimation de ces paramètres en utilisant le filtre de Kalman étendu, Courrier du Savoir – N°07, pp.37-43, Décembre 2006.
- [20] FAROOQ Jawad Ahmed, Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort, MONTBELIARD, France. année 2008.
- [21] BENCHABANE Fateh, Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattering, mémoire de magister, Université mohamed khider de Biskra, Algérie, année 2005.
- [22] Eddie Smigiel et Guy Sturtzer, Modélisation et commande des moteurs triphasés, édition : Ellipses, Collection : Technosup ,Année 2000
- [23] MERZOUG Med Salah, Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une machine synchrone à aimants permanents, mémoire de magister, Université de Batna, Algérie.
- [24] François LEPRINCE-RINGUET, Techniques de l'Ingénieur D2 100, aimants permanents matériaux et applications.
- [25] AID Houssem et AINA Wafaa, "Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents", mémoire de master, Université de Tlemcen, Algérie, 2013
- [26] CIMUCA Gabriel Octavian, Système inertiel des stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure D'arts et Métiers Centre de Lille, France. année 2005.
- [27] S.Hamecha, Ep.Bourekache. Etude Et Commande D'une Eolienne A Base D'une Machine Synchrone A aimants Permanents, Mémoire de Magister, Université mouloud mammeri de Tizi-Ouzou, 2013
- [28] M.D. Bidart. Commande Coopérative Des Systèmes Monoconvertisseurs Multimachines Synchrones, Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011
- [29] Moteurs à flux radial | Comment ça marche, application et avantages - Electricity – Magnetism

- [30] A. Ameer, « Commande sans capteur de vitesse par DTC d'un moteur synchrone à aimants permanents en utilisant des techniques de l'intelligence artificielle », thèse de doctorat de l'université El Hadj Lakhdar –Batna, 23 mai 2012.
- [31] B. Sebti « Etude comparative des performances statiques et dynamiques d'un contrôle de découplage et d'un moteur à induction alimenté par un convertisseur statique », thèse magistère université de El Hadj Lakhdar –Batna, 2005
- [32] M. L. Mennai, « Contribution à la modélisation d'un aérogénérateur à aimants permanent », thèse de master de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option commande électrique, 2011.