

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

THÈME

**Commande non linéaire d'un système de conversion éolien utilisant
la machine synchrone à aimants permanents**

Préparé par :

LAMOURI kateb yassine
HASSI mohamed amine

Devant le Jury:

Nom et prénoms	Grade	Qualité
T. ALLAQUI	Pr	Président
A. SAIBI	MAA	Examineur
M. BADOUI	MCB	Examineur
C. OGAB	MCB	Encadrant

Promotion 2021-2022

Dédicace

Je dédie ce travail spécialement a

ma chère mère B.HALIMA et cher père ADDA,
qui sont la source de vie.

A mes très chères sœurs Khadidja, Aicha, et Souad et
mes frères Youcef et Brahim.

Un spécial dédicace à Sihem.

A mon binôme et cher ami Madjid

A Toute ma famille. A Tous mes amis.

Remerciements

*Louange à **ALLAH**, nôtre grand seigneur, de nous avoir éclairé le chemin du savoir et de nous avoir donné la bonne volonté et la patience pour l'achèvement de ce travail.*

*Que le salut d'A'LLAH soit sur son prophète **MOHAMED**, nôtre éducateur et guide du bon chemin.*

*Tout d'abord, nous remercions vivement notre encadreur Mm **OGAB Chahrazad**, Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour son encadrement et ses qualités humaines.*

*Nous remercions également le président de jury Mr **Allaoui**; ainsi que les membres de jury Mr.**SAIBI** et Mm.**BADOUI** , enseignants aux département de Génie Electrique à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, d'avoir accepter d'examiner et d'expertiser ce travail.*

Nous tenons tout particulièrement à remercier les enseignants du Département de Génie Electrique pour leurs disponibilités et encouragements, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à notre formation

Nous voudrions remercier tout particulièrement nos parents ainsi que tous les membres de nos familles de leurs soutiens et leurs encouragements tout au long de notre cursus.

Enfin, Nous remercions toutes celles et tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à l'élaboration de ce travail.

Abréviations

Sigles utilisés

SCEE : Systèmes de Conversion d'Énergie Éolienne.

GSAP : génératrice synchrone à aimants permanents

MSAP : la machine synchrone à aimants permanents

MPPT : Maximum Power Point Tracking

MLI : modélisation de largeur d'impulsion

PI : Régulateur Proportionnel Intégrateur

MG : Régulateur par Mode Glissant

Repères

A, B, C Axes liés aux enroulements triphasés.

d, q Axes de référentiel de Park.

α , β Axes de référentiel de Concordia.

Grandeurs

V_v : valeur moyenne de la vitesse du vent

E_c : Énergie cinétique.

P_{aero} : Puissance aérodynamique.

C_g : Couple entraînant à la génératrice électrique

C_{aer} : Couple aérodynamique

C_p : Coefficient de puissance

λ : Vitesse spécifique.

β : Angle d'inclinaison des pales [°].

ρ : Densité de l'air.

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine (avant le multiplicateur).

Ω_{mec} : Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur).

G : Rapport du multiplicateur.

C_g : Couple issu du multiplicateur.

C_{mec} : Couple mécanique total

C_f : Couple résistant dû aux frottements.

$f\Omega$ Couple de frottements visqueux (N.m)

λ^{opt} : Valeur optimale de la vitesse spécifique

Φ_{ds} : Flux d'axe direct (Wb)

Φ_{fs} : Flux de rotor (aimant permanent) (Wb)

Φ_{qs} : Flux en axe quadrature (Wb)

$\Phi_{sc}, \Phi_{sa}, \Phi_{sc}$: Les flux totaux à travers ces enroulements (Wb)

C_{em} : Couple électromagnétique

C_{pmax} : Coefficient de puissance maximale

$C_{poptimal}$: Coefficient de puissance optimal

C_m : couple moteur.

C_{emref} : couple électromagnétique de référence

G : gain de multiplicateur

C_T : Couple totale de l'éolienne (N.m).

F : coefficient des frottements visqueux

f : fonction de connexion

J_{pale} Inertie de la pale

J_h inertie de L'arbre d'entraînement des pales

J_g inertie de rotor de la génératrice

P Nombre paire de pole.

J moment d'inertie de la machine

I_q Composantes de courant statorique dans le repère dq

i_a, i_b, i_c courants d'entrée du redresseur MLI

I_i ($i = a, b, c$) courants des phases statorique

K_i le gain intégral

K_p le gain proportionnel

L_d inductance d'axe direct

L_q inductance d'axe en quadrature

R Longueur de pale

S Fonction

s Surfaces circulaires balayées par la turbine

w_e Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

ζ Taux d'amortissement imposé au système

ω_n Pulsation naturelle du système

C_T	Couple totale de l'éolienne (N.m).
I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}	Courants (A)
I_d, I_q	Composantes de courant statorique dans le repère dq (A)
L_{sa}, L_{sb}, L_{sv}	Inductances propres respectivement des phases a, b, c (H)
$P(\theta)^{-1}$	Matrice inverse de La transformation de Park

Liste des figures

Chapitre I:Généralité sur la chainec de con..version éolienne

Figure I.1: la production électrique d'origine renouvelable – 2017.....	4
Figure I.2: panneaux photovoltaïques.....	6
Figure I.3: Capacité éolienne mondiale installée. (De l'IRENA).....	9
Figure I.4: Les régions ventées en Algérie.....	10
Figure I.5: Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés.....	10
Figure I.6: Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie.....	11
Figure I.7: Tour d'une turbine.....	12
Figure I.8: Constitution d'une nacelle.....	13
Figure I.9: 1 ^{re} Éolienne Darrieus avec rotor de 8 m.....	14
Figure I.10: Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.....	15
Figure I.11 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	17
Figure I.12 : Structure d'un moteur synchrone à aimants permanents.....	21
Figure I.13 : Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents ...	22
Figure I.14: Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.....	23
Figure I.15 : Machines synchrones à aimants permanents insérés.....	23
Figure I.16 : Machines synchrones à aimants permanents enterrés.....	23
Figure I.17 : Machines synchrones à aimants permanents chapeautés.....	24

Chapitre II:Modélisation et simulation de la chainec de conversion éolienne

Figure II.1 : coefficient C_p en fonction de λ	27
Figure II.2 : Stratégies de commande de la turbine étudiée.....	28
Figure II. 3. Schéma bloc de simulation de la turbine.....	29

Figure II.4 : Transformation triphasée-diphasée.....	32
Figure II.5 : Schéma de l'association GSAP-Redresseur à MLI.....	35
Figure II.6 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé.....	38
Figure II.7 : Boucle de régulation du courant i_{sd}.....	38
Figure II.8 : Boucle de régulation de la vitesse.....	39
Figure II.9 : Schéma bloc de simulation de la GSAP.....	40

Chapitre III:Mode Glissant avec Simulation et résultats.

Figure III.1 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.....	43
Figure III.2 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.....	45
Figure III.3 : Commande appliquée aux systèmes à structure variable.....	46
Figure III.4 : Illustration du phénomène de broutement.....	46
Figure III.5: Fonction « SAT ».	47
Figure III.6: Fonction « SMOOTH ».....	47
Figure III.7 : GSAP à vide.....	49
Figure III.8: GSAP sur une charge séparée.....	51
Figure III.9: Profil du vent.....	54
Figure III.1: Résultats de simulation sans asservissement de vitesse.....	54
Figure III.11: Résultats de simulation avec régulateur PI.....	55
Figure III.12 : Résultats de simulation avec régulateur Mode Glissant.....	55

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Niveaux de bruit de certaines sources communément connues par rapport à l'éolienne.

Remerciements

Dedicas

Abréviations des symboles

Listes des figures

Listes des tableaux

Sommaire

Chapitre I: Généralité sur la chaîne de conversion éolienne

Introduction générale :	1
I.1 introduction	3
I.2 Généralité d'énergie renouvelable :	3
I.3 Type de l'énergie renouvelable :	4
- Energie hydraulique :	5
- Energie géothermique :	6
- Energie biomasse :	6
- Energie photovoltaïque :	6
- Energie éolienne :	7
I.4 L'énergie éolienne dans le monde :	9
I.5 L'énergie éolienne en Algérie :	10
I.6 Principaux composants d'une éolienne :	12
I.7 Les différents types des éoliennes :	14
I.7.1 L'éolienne verticale :	14
- Principe de l'éolienne verticale :	14
- Les différents types d'éolienne à axe vertical :	15
- Les avantages :	16
- Les inconvénients :	16
I.7.2 L'éolienne à axe horizontale :	17
- Principe de l'éolienne horizontale :	17
- Les différents types d'éolienne à axe horizontal :	17
- Les avantages :	18
- Les inconvénients :	18
I.8 Les Zones de fonctionnement de l'éolienne :	18
I.9 Aspects Environnementaux :	19
- Bruit audible :	19
- Interférence électromagnétique (IEM):	19
- Effets sur les oiseaux :	20

I.10 Historique sur les machines électriques :	21
I.11 Type des machines utilisées dans la chaîne :	21
- Machine asynchrone à cage d'écureuil :	21
- Machine asynchrone à double alimentation :	22
- Machine synchrone à aimants permanents (GSAP) :	22
I.12 Les rotors de la machine à aimants permanents :	23
- Machines synchrones à aimants permanents montés en surface :	24
- Machines synchrones à aimants permanents insérés :	24
- Machines synchrones à aimants permanents enterrés :	24
- Machines synchrones à aimants permanents chapeautés :	25
- Avantages de l'utilisation des GSAP :	25
I.13 Conclusion :	26

Chapitre II:Modélisation et simulation de la chaîne de conversion éolienne

II.1 Introduction :	25
II.2 Modélisation du vent et de la turbine :	25
II.2.1 Modèle du vent :	25
II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne :	25
II. 2. 2. 1 Modèle du Multiplicateur	27
II. 2. 2. 2 Principe de la MPPT :	28
II. 3 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent :	30
II.3.1 Généralités sur les machines synchrones à aimant permanent :	30
II.3.2 Modélisation mathématique de la GSAP :	30
II.3.2.1 Hypothèses simplificatrices :	30
II.3.2.2 Modèle de la GSAP dans le repère (abc) [39] :	30
II.3.3 Passage au repère de Park :	31
II.3.4 Modèle de la GSAP dans le repère de Park :	33
II.4 Redresseur	35
II.5 Commande de la machine synchrone à aimants permanents :	37
II.5.1 La commande vectorielle	37
II.5.1.1 Généralités sur les régulateurs classiques (PI) :	37
II.5.1.2 contrôles de la vitesse par le régulateur PI :	39
II. 6 Conclusion :	40

Chapitre III:Mode Glissant avec Simulation et résultats.

III.1 Introduction :	41
III.2 La commande par Mode Glissant :	41
III.2.1 Systèmes à structure variables :	41
III.2.1.1 Principe de la commande à structure variable par régime glissant :	42
III.3. Modes de la trajectoire dans le plan de phase :	42
III.4 Conception de la commande par mode glissant :	43
III.4.1 Choix de la surface de glissement :	43
III.4.2 Conditions de convergence et d'existence :	44
1. Fonction directe de commutation :	44
2. Fonction de LYAPUNOV :	44
III.6 Calcul de la commande :	45
III.7 Avantage et inconvénients de la commande par mode glissant :	46
III.8 Elimination du phénomène de "Chattering" :	47
III.9 Domaine d'application du réglage par mode glissant :	48
III.10 Résultats de Simulation :	53
III.10.1. GSAP à vide :	53
III.10.2 GSAP en Charge :	53
III.10.3 La turbine	56
III.11 Conclusion	60
Conclusion Générale :	57

Annexes

Bibliographie

Résumé

***Introduction
Générale***

Introduction générale :

La consommation mondiale d'énergie augmente malheureusement au détriment de l'environnement qui nous entoure d'une part et non renouvelable d'autre part. En effet, les énergies fossiles [charbon, pétrole, gaz naturel] sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. Aujourd'hui la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatiques sur les équilibres physiques, économiques, sociaux et politiques de notre planète. L'utilisation d'énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement économique et social des populations devient incontournable, parmi ces énergies on a étudié l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne est sans aucun doute la ressource renouvelable la plus difficile à capturer. En même temps, il finit souvent par être le plus attrayant. Faut-il être découragé par la difficulté du métier ? Non! Mais si nous ne prenons pas la difficulté au sérieux, nous serons déçus.

Plusieurs problèmes et échecs ont été constatés au cours des nombreuses années de travail avec les systèmes éoliens électriques. Certains d'entre eux étaient dus à des défauts de conception de l'équipement ou à des phénomènes naturels, mais la plupart étaient dus à des systèmes mal conçus et à un mauvais entretien.

Différents types de générateurs peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre du vent en énergie électrique. Les génératrices synchrones à aimants permanents, prirent de plus en plus la prédominance sur les autres machines électriques. Ce type de machine permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques, ceci en supprimant le multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des coûts de maintenance.

Notre travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude de l'énergie éolienne basée sur la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Cette étude est composée de trois chapitres :

Le premier inclut des généralités sur la chaîne de conversion éolienne (des définitions des éléments de l'énergie éolienne), à commencer par des statistiques montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde. Les avantages, les inconvénients, la constitution et les différents types d'éoliennes seront cités. Leurs différentes structures, leur fonctionnement seront également abordés.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'analyse et à la modélisation des éléments de la chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimant permanent, le modèle de l'éolienne est basé sur des concepts purement mécaniques et aérodynamiques et la vitesse du vent étant la pièce maîtresse en tant que source de puissance. Une mise en équations

mathématiques de la **GSAP** est alors nécessaire pour la mise en œuvre de sa commande. A noter que le modèle de Park, sous certaines hypothèses simplificatrices, permet de simplifier les équations de la **GSAP**.

Le troisième chapitre présentera les notions générales sur les systèmes à structures variables et la conception de la commande non linéaire par mode glissant traité dans le plan de phase, ainsi que les différents résultats de la simulation avec leurs interprétations.

Premièrement, la simulation du modèle du vent, source principale de l'énergie, sera effectuée. Ensuite, on présentera les résultats de simulation de la turbine éolienne, sa modélisation permet de la commander de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent. Ainsi, le contrôle de la vitesse de la turbine par un régulateur Proportionnel Intégrale, puis un régulateur Mode Glissant sera réalisé dans le but d'extraire le maximum de puissance sur toute la plage de fonctionnement de la turbine (**MPPT**).

Chapitre I

I.1 introduction

L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps. C'était l'une des premières sources que l'homme exploitait après le bois-énergie. Sur le Nil, cette énergie était utilisée pour transporter des voiliers, en Chine comme au Moyen-Orient pour le pompage de l'eau et l'irrigation, en Iran et en Afghanistan pour moulinier le grain. Depuis plusieurs décennies, l'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité. Selon l'Observatoire des énergies renouvelables, l'énergie éolienne est actuellement le secteur énergétique le plus dynamique au monde. Au lendemain de la crise pétrolière mondiale des années 1970, le développement et la commercialisation des éoliennes ont été fortement encouragés. Depuis lors, l'exploitation des ressources éoliennes est devenue plus efficace et l'industrie éolienne a connu une croissance importante au cours de la dernière décennie. Les éoliennes sont de plus en plus puissantes. Les rendements et la disponibilité augmentent et les parcs éoliens deviennent de plus en plus gros. Pour utiliser le vent comme source d'énergie, il est nécessaire de connaître le potentiel éolien de la région. Cependant, pour déterminer cette possibilité, il est nécessaire de procéder à un traitement statistique des mesures de la vitesse du vent. Cependant, une bonne connaissance des caractéristiques du vent à n'importe quel endroit est importante pour une bonne exploitation des ressources éoliennes. En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à l'autre, et cela est dû à une topographie et à un climat très divers [1].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons principalement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs composants et principes de fonctionnement, ainsi que les différents types de générateurs utilisés dans cette série de conversion.

I.2 Généralité d'énergie renouvelable :

Sont considérées comme énergies renouvelables toutes les énergies issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse), l'énergie issue du magma terrestre (géothermie) et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans, telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers, sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables. Elles sont inépuisables, mais en quantité limitée, à un endroit et en un instant donné. Dans le cas de la biomasse, le caractère renouvelable n'est réel que si l'on veille à la pérennité de la ressource. C'est le cas dans un pays comme la France, où la croissance en volume de la ressource forestière est supérieure à l'exploitation qui en est faite. En revanche, dans quelques pays en développement, notamment

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

en Afrique, la forêt est en nette régression et seule une bonne gestion de la ressource permettra de considérer à nouveau la biomasse comme une énergie renouvelable. La gestion d'une ressource géothermale doit tenir compte du fait que celle-ci n'est pas nécessairement renouvelable localement à l'échelle de temps humaine. L'épuisement peut être dû à une diminution de pression du fluide caloporteur et, dans ce cas, la réinjection est souvent la solution.

Ces énergies renouvelables n'exercent que peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux. Elles peuvent toutefois avoir des impacts visuels, sonores ou sur la faune ou la flore. Leur utilisation doit donc répondre à certains principes et réglementations pour limiter ces impacts locaux. La superficie « consommée » par les centrales utilisant les énergies renouvelables peut être relativement grande, mais il faut être prudent en matière de comparaisons. Par exemple, la surface nécessaire à l'implantation d'une ferme éolienne est de 1km² pour 8 MW, mais 99 % de cette surface reste utilisable pour d'autres fonctions, telles que l'agriculture ou l'élevage. De la même manière, il faut environ 10m² de modules photovoltaïques pour produire 1 kW de puissance, mais ces 10 m² peuvent faire partie des surfaces qui sont déjà utilisées, comme celle d'une toiture de bâtiment, en conséquence la surface occupée peut alors être considérée comme nulle [2].

I.3 Type de l'énergie renouvelable :

Au niveau mondial, l'énergie renouvelable provient de six sources distinctes. L'hydroélectricité est la principale avec une contribution de 82,9%. L'éolienne est la seconde source avec (8,3%). Viennent ensuite la filière biomasse (6,3%), la géothermie (1,6%), le solaire qui regroupe les centrales photovoltaïques et thermiques (0,8%), et enfin les énergies marines (0,01%). [3]

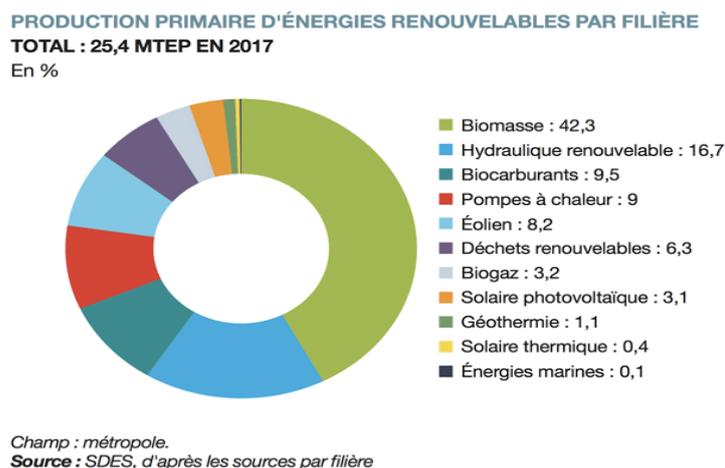


Figure I.1 : la production électrique d'origine renouvelable – 2017

Il existe plusieurs types :

- **Energie hydraulique :**

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins. Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermohaline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité). Attestés dès l'Antiquité, les moulins à eau ont exploité cette énergie pour pomper l'eau, moulin le grain ou encore actionner des marteaux-pilons. Leurs héritières modernes, les centrales hydroélectriques, fournissent une électricité renouvelable en produisant peu de gaz à effet de serre (sauf dans le cas des régions tropicales, où la dégradation de matière organique produirait du méthane). L'exploitation de l'énergie hydraulique a toutefois certains inconvénients, notamment en matière de continuité des cours d'eau. En effet, la création d'un barrage représente un obstacle pour la navigation, la migration des espèces aquatiques et le transfert de sédiments [4].

Les types de l'énergie hydraulique

- Energie des vagues : utilise la puissance du mouvement des vagues.
- Energie marémotrice : issue du mouvement de l'eau créé par les marées
- Energie hydrolienne : les hydroliennes utilisent les courants sous-marins.
- Energie thermique des mers : produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans.
- Energie osmotique : la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

salée de la mer est source d'énergie [4].

- Energie géothermique :

Le principe est d'extraire l'énergie qui se trouve dans la terre. Partout, la température augmente de la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec des profondeurs plus ou moins puissantes, elle varie de 3 °C par 100 mètres en moyenne jusqu'à 15 °C voire 30 °C. Cette chaleur est principalement causée par la radioactivité naturelle des roches composants de la croûte terrestre.

La géothermie a une fiabilité et une disponibilité dans le temps en quatre types selon la température de dépôt : haute (>180 °C), moyenne (>100 °C), basse (>30 °C) et très basse énergie. Les deux premiers types préfèrent réduire l'énergie électrique. La géothermie basse énergie couvre un large éventail d'utilisations : chauffage urbain, chauffage des serres, utilisation de la chaleur dans les procédés industriels... La géothermie basse énergie nécessite l'utilisation de pompes à chaleur et donc une installation spécifique [5].

- Energie biomasse :

L'énergie biomasse permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion des matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasses. Elle est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'homme et peut être répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) [6].

- Energie photovoltaïque :

Ce type d'énergie consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide des panneaux solaire [7]. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources conventionnelles tel que hydrocarbures ou le charbon.



Figure II.2 : panneaux photovoltaïques.

- Énergie éolienne :

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre ; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical ils ont été employés dans les montagnes [8].

Le terme 'aérogénérateur' désigne d'une manière générale une machine capable de capter l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie électrique. Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180 [8].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [4]

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a ses propres avantages permettant sa croissance et son évolution parmi d'autres sources d'énergie, ce qui lui donnera un rôle important dans le futur à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients listés ci-dessous :

• *Les avantages :*

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- Elle est une énergie renouvelable.
- Elle ne produit pas de déchets radioactifs.
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement en comparaison avec les centrales traditionnelles.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- Cette source d'énergie peut stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales
- Elle est également très intéressante pour les pays en voie de développement. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant.
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts).
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables [9].

- *Les inconvénients :*

- Le bruit : Cependant, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor
- la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne
- Le coût de l'énergie éolienne est plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

- L'impact visuel [9].

I.4 L'énergie éolienne dans le monde :

Comme l'énergie éolienne est devenue la source d'énergie électrique nouvelle la moins chère et compatible avec les programmes de préservation de l'environnement, de nombreux pays promeuvent la technologie éolienne au moyen de programmes nationaux et d'incitations commerciales.

L'agence internationale des énergies renouvelables (IRENA) a indiqué que la capacité mondiale de production éolienne installée à terre et en mer a été multipliée par près de 75 au cours des deux dernières décennies, passant de 7,5 gigawatts (GW) en 1997 à quelque 564 GW d'ici 2018. La production d'électricité éolienne a doublé entre 2009 et 2013, et en 2016 l'énergie éolienne représentait 16 % de l'électricité produite par les énergies renouvelables. De nombreuses régions du monde ont de fortes vitesses de vent, mais les meilleurs endroits pour produire de l'énergie éolienne sont parfois éloignés. L'éolien offshore et onshore offre un formidable potentiel.

La figure suivante montre la capacité éolienne totale installée dans le monde de 2010 à 2019 en MW par an : passer de 180 000 MW en 2010 à plus de 600 000 MW en 2019 correspond à un taux de croissance annuel moyen de 13 %.

Depuis 2010, plus de la moitié de toute la nouvelle énergie éolienne a été ajoutée en dehors de l'Europe et de l'Amérique du Nord, principalement en Chine et en Inde. La Chine a une capacité installée de 221 GW. Il possède le plus grand parc éolien terrestre au monde avec une capacité de 7 965 mégawatts (MW), soit cinq fois plus que son plus proche rival. Les États-Unis arrivent en deuxième position avec 96,4 GW de capacité installée.

L'Allemagne possède la capacité éolienne installée la plus élevée d'Europe. Ses plus grands parcs éoliens offshore sont les Gode Windfarms, qui ont une capacité combinée de 582 MW. L'Inde possède la deuxième plus grande capacité éolienne d'Asie, avec une capacité totale de 35 GW.

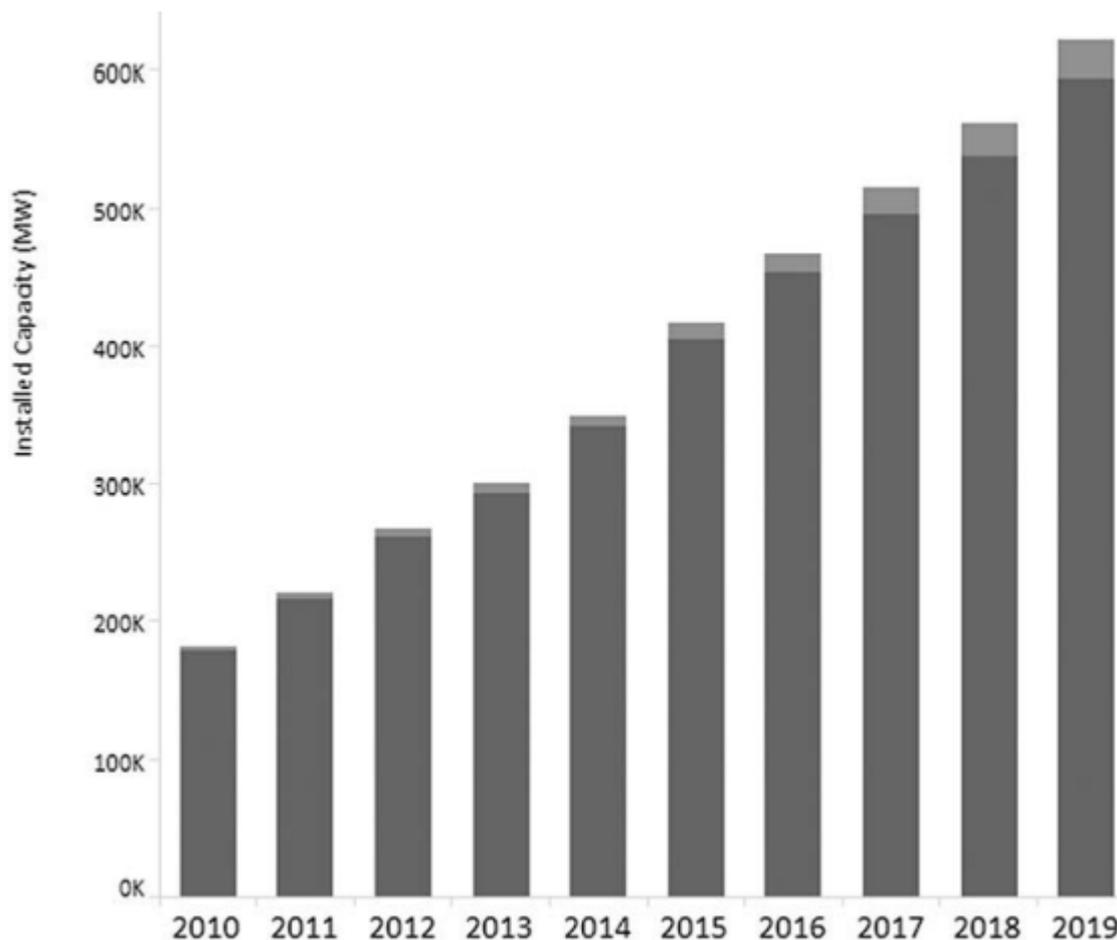


Figure III.3 Capacité éolienne mondiale installée. (De l'IRENA)

I.5 L'énergie éolienne en Algérie :

Répartition régionale de la vitesse du vent :

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; La Figure suivante montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'Énergie Éolienne du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER, Alger, Algérie) [10].

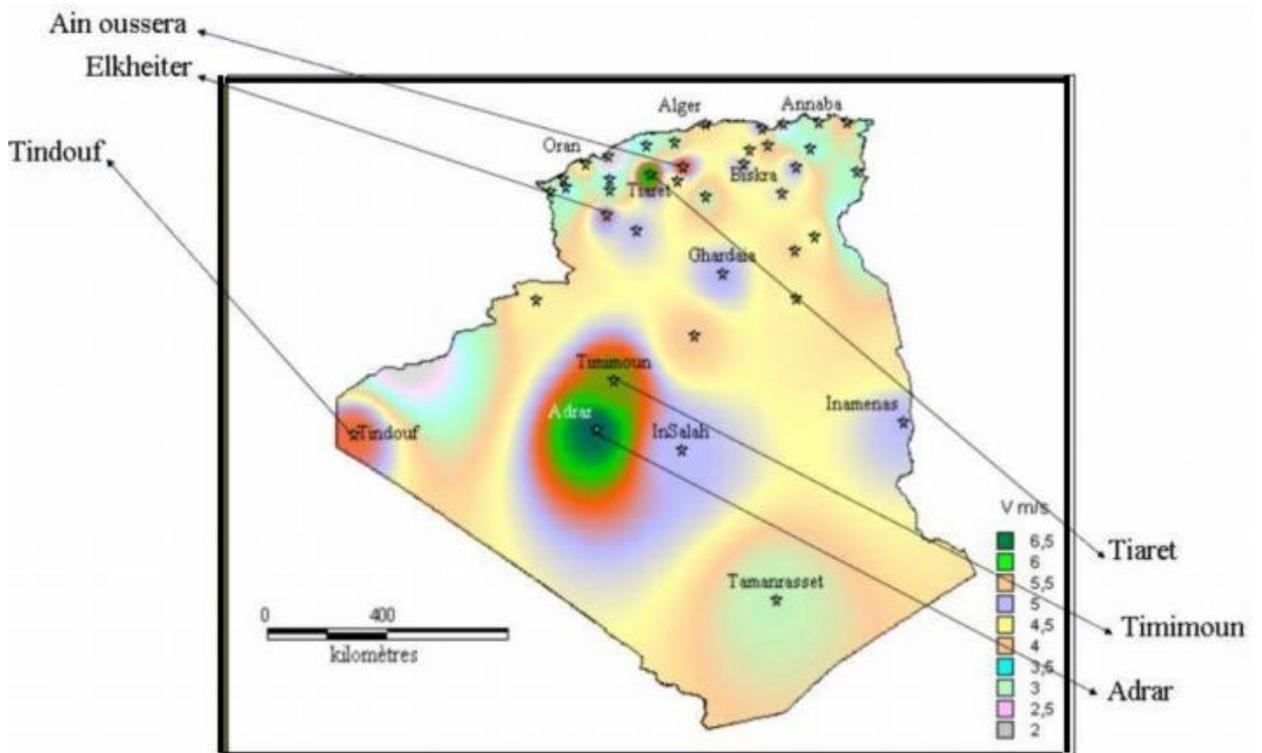


Figure IV.4: Les régions ventées en Algérie.

D'après les données du CDER, la figure suivante indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.

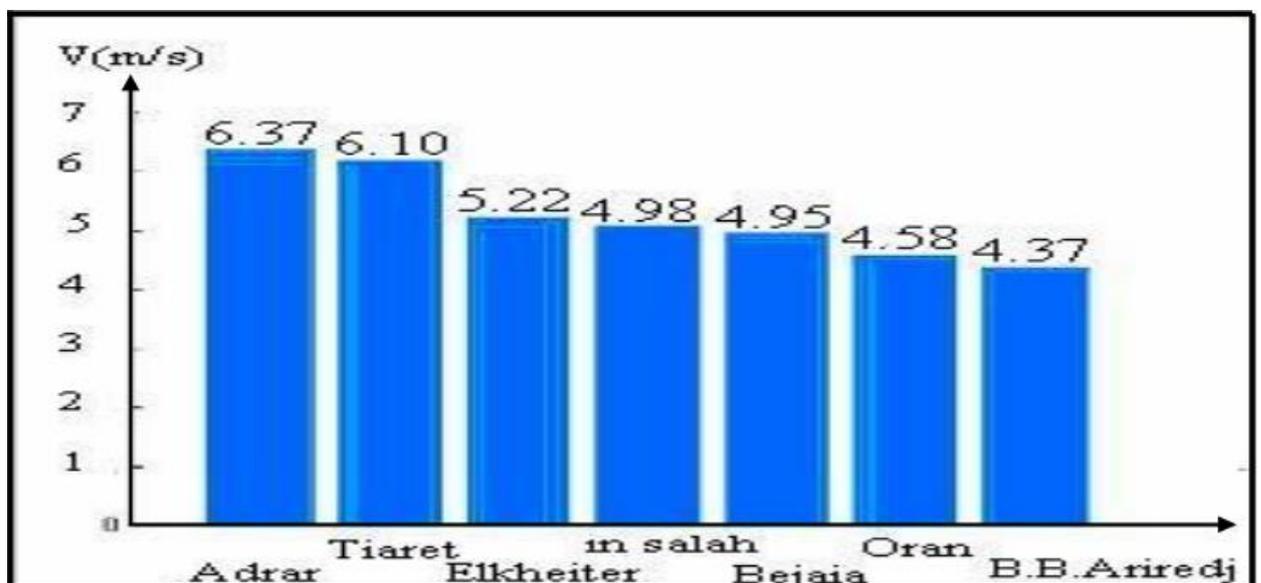


Figure I.5 : Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés.

L'Atlas de la puissance en Algérie : La figure ci-dessous représente l'atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m d'altitude en Algérie.

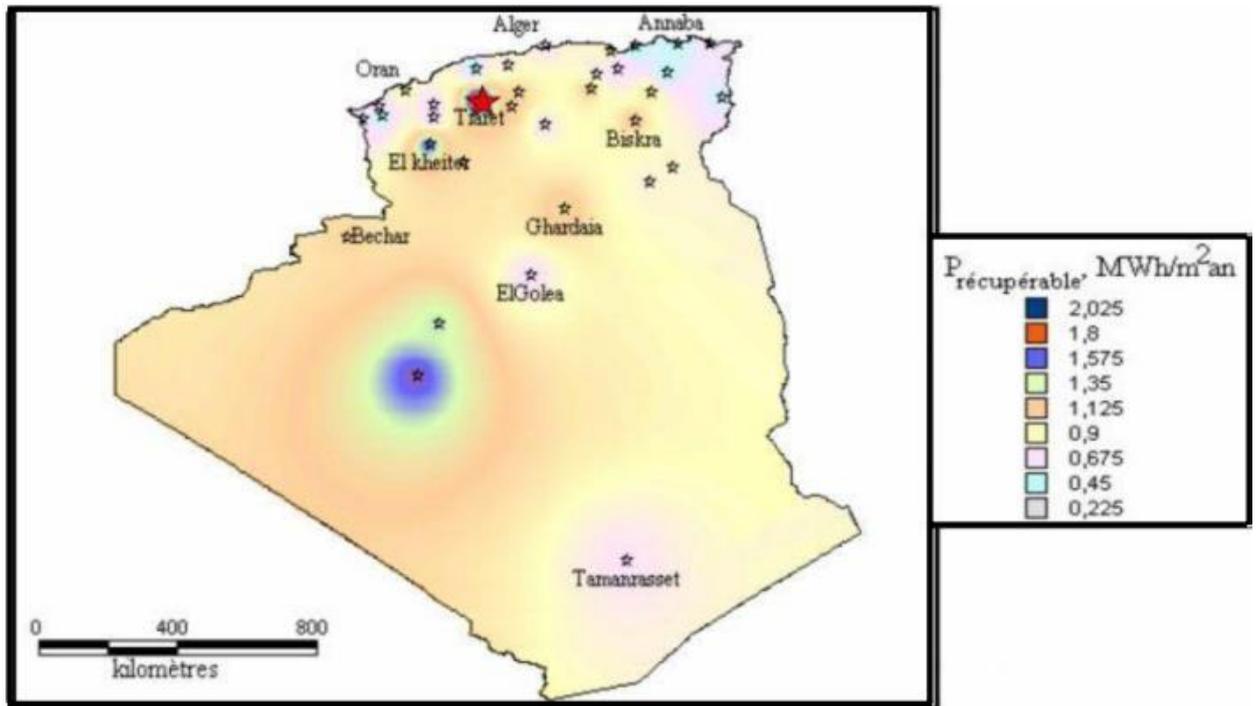


Figure V.6 : Puissance énergétique récupérable à 50 m Algérie.

I.6 Principaux composants d'une éolienne :

Le système éolien comprend une ou plusieurs unités éoliennes fonctionnant électriquement en parallèle. Chaque turbine est composée des composants de base suivants :

- Structure de la tour
- Rotor à deux ou trois pales fixées au moyeu
- Arbre avec engrenage mécanique
- Générateur électrique
- Mécanisme de lacet, tel que la palette de queue
- Capteurs et contrôle

En raison du grand moment d'inertie du rotor, les défis de conception comprennent le démarrage, le contrôle de la vitesse pendant l'opération de production d'énergie et l'arrêt de la turbine si nécessaire. Le courant de Foucault ou un autre type de frein est utilisé pour arrêter la turbine en cas d'urgence ou pour l'entretien de routine. Dans un parc éolien moderne, chaque éolienne doit avoir son propre système de contrôle pour fournir des fonctions opérationnelles et de sécurité à distance. Il faut aussi avoir un ou plusieurs composants supplémentaires suivants :

- Des anémomètres, qui mesurent la vitesse du vent et transmettent les données aux manettes.

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

- De nombreux capteurs pour surveiller et réguler divers mécanismes mécaniques et électriques (une turbine de 1 MW peut avoir plusieurs centaines de capteurs).
- Contrôleur de décrochage, qui démarre la machine à différentes vitesses de vent pour protéger les pales contre les contraintes excessives et le générateur contre la surchauffe.
- Électronique de puissance pour convertir et conditionner l'alimentation aux normes requises.
- Électronique de contrôle, intégrant généralement un ordinateur.
- Batterie pour améliorer la disponibilité de la charge dans une installation autonome.
- Liaison de transport pour connecter la centrale au réseau local [11].

Les trois composants nécessaires dans une éolienne, sont :

La tour : Généralement en tube d'acier ou peut-être en treillis métallique, il doit être aussi haut que possible pour éviter les turbulences près du sol. Cependant, la quantité de matière utilisée représente un coût important et le poids doit être limité. Le compromis est généralement de prendre une tour (mât) d'une taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'éolienne [12] .



Figure VI.7 : Tour d'une turbine.

La nacelle : Elle comprend tous les éléments mécaniques fonctionnant dans le cycle pré-rivière et, en cas de surcharge, il agit également comme un générateur (généralement une machine asynchrone) et des systèmes de direction ou électriques. A cela s'ajoutent un système de refroidissement à air ou à eau, et un anémomètre électronique pour gérer les éoliennes [12].

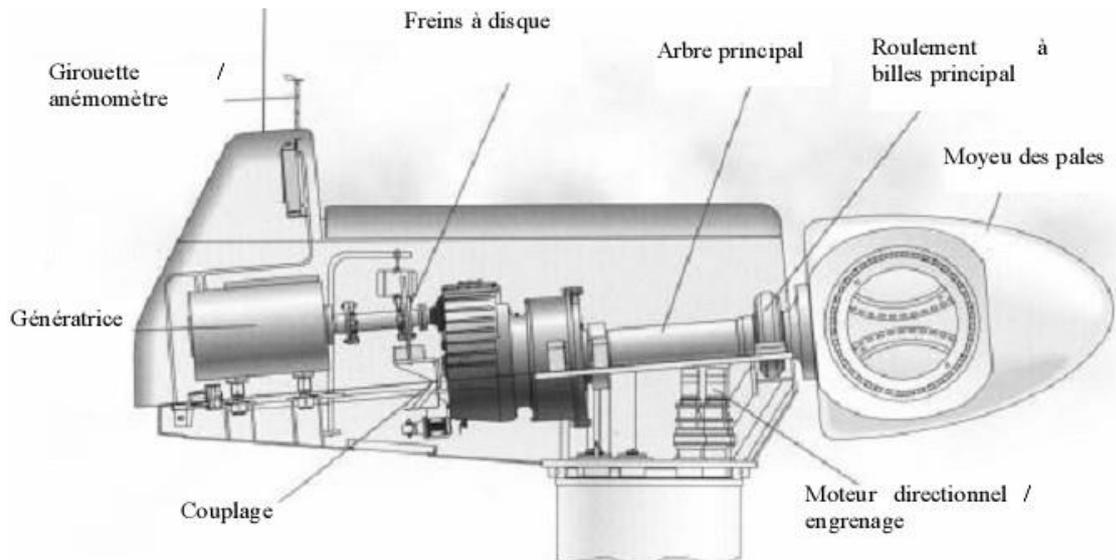


Figure VII.8 : Constitution d'une nacelle.

Le rotor : C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor...) [3].

I.7 Les différents types des éoliennes :

I.7.1 L'éolienne verticale :

- Principe de l'éolienne verticale :

Les pales de l'éolienne verticale, également appelée VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), s'articulent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique.

Cette solution est moins répandue que l'éolienne horizontale mais tend progressivement à la remplacer.

L'avantage de ce type réside dans sa capacité à capter les vents faibles. De plus, elle nécessite moins d'espace qu'une éolienne horizontale, le seul inconvénient est d'obtenir une éolienne avec un axe vertical car le marché est encore limité.

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

- Les différents types d'éolienne à axe vertical :

▪ Les éoliennes Darrieus :

Elles sont apparues en 1927 par l'ingénieur Georges Darrieus, et ce sont des éoliennes d'un diamètre de huit mètres, ce qui casse complètement la conception classique des moulins américains. (Figure 1.9)

- Vitesse de rotation rapide (80 tr/min) pour une puissance de 1.8 kW avec 5 m/s de vent,
- Rotor à 4 pales disposé en aval du mât,
- Absence de système additionnel d'orientation,
- Positionnement du système de production électrique dans une nacelle profilée en haut du mât [13].

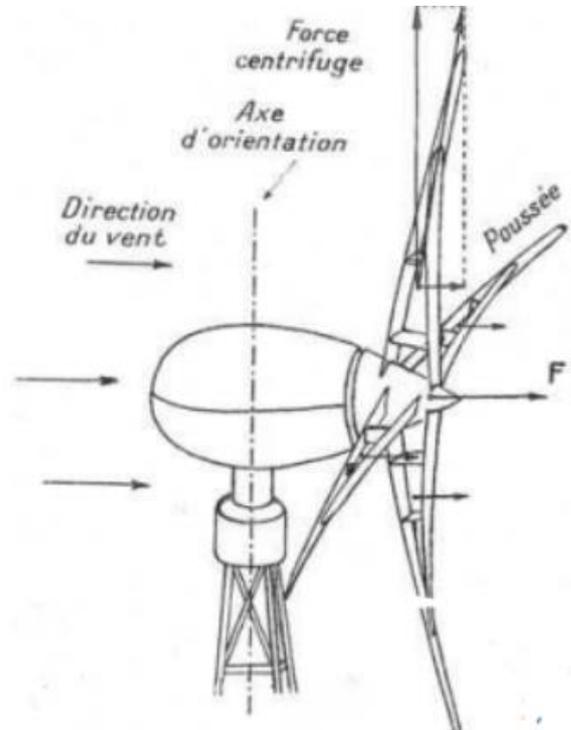


Figure VIII.9 : 1^{er} Éolienne Darrieus avec rotor de 8 m.

▪ Les éoliennes domestiques Savonius :

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure 1-10a) [14].

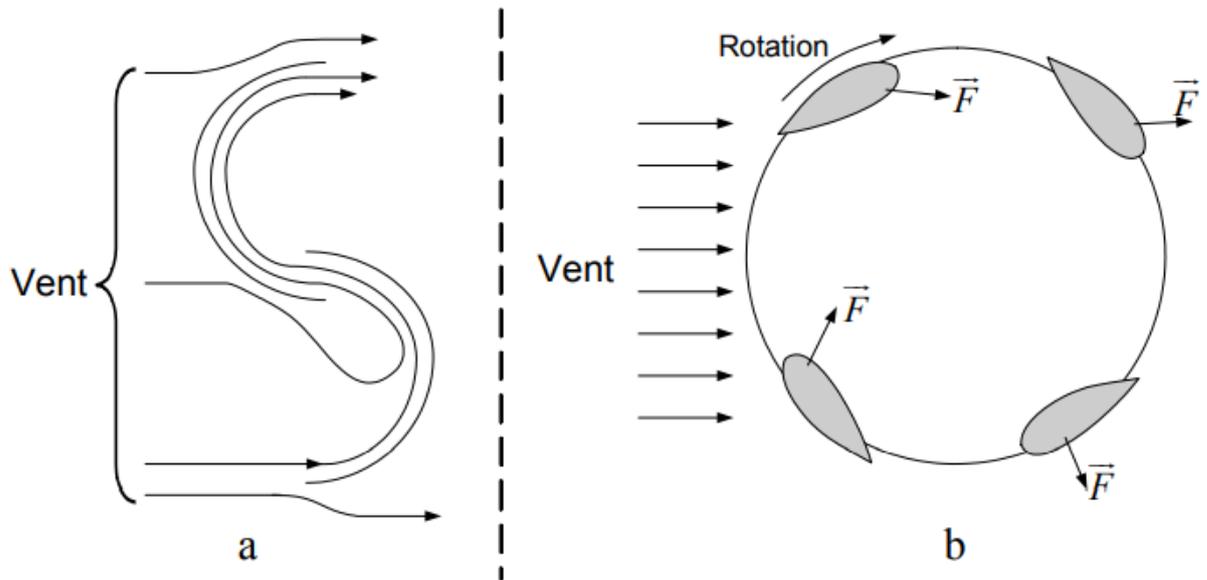


Figure I.10 : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable [14].

▪ **Éoliennes à voilure tournante :**

L'éolienne à voilure tournante a été inventée par Pierre Dieudonné en 2006. Les éoliennes à voilure tournante sont équipées de pales dont l'orientation dynamique permet de mieux exploiter l'énergie du vent, à la manière d'un voilier.

Ce mécanisme permet d'exploiter des vents plus puissants que ceux exploités par les éoliennes tri pales classiques. De plus, le bruit généré est fortement réduit par ce système.

- **Les avantages :**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir besoin d'orienter le rotor .
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

- **Les inconvénients :**

- Elles sont en général moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car il est souvent freiné par le relief.

- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, elle occupe donc une surface plus importante que l'éolienne à tour.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement [27].

I.7.2 L'éolienne à axe horizontale :

- Principe:

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [15]. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car il représente un coût moins important, il est moins exposé aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères [16]. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.

- Les différents types d'éolienne à axe horizontal :

▪ Les éoliennes à marche lente :

Les éoliennes à marche lente sont équipées d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur forte inertie impose généralement une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais diminue également rapidement par la suite.

▪ Les éoliennes à marche rapide :

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

▪ Les éoliennes tripales :

Les éoliennes tripales sont les plus courantes car elles représentent un compromis entre les vibrations provoquées par la rotation et le coût de l'éolienne. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et diminue lentement à mesure que la vitesse augmente. Ils fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [17].

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

- Les avantages :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

- Les inconvénients :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

I.8 Les Zones de fonctionnement de l'éolienne :

:

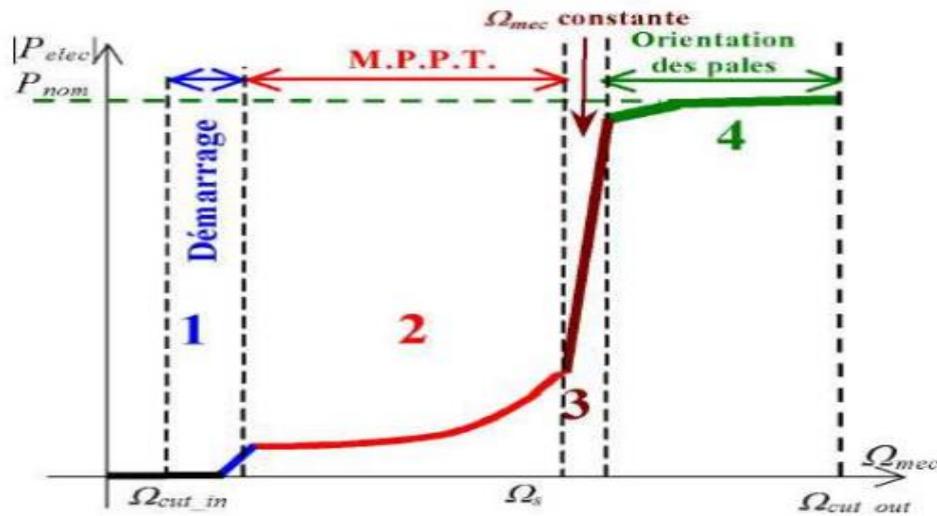


Figure I.11: Zones de fonctionnement d'une éolienne.

Les différentes vitesses indiquées sur la figure ci-dessus sont :

V1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine.

V2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale du générateur.

V3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales.

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées sur cette figure :

– **Zone I :** $V < V1$ La vitesse du vent est trop faible, la turbine ne fonctionne pas, par conséquent la puissance extraite est nulle.

– **Zone II :** $V1 < V < V2$ Dans cette zone un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale pour chaque vitesse du vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

– **Zone III** : 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 IV** : $V_2 < V < V_3$ 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.

I.9 Aspects Environnementaux :

Les aspects suivants des considérations environnementales entrent dans le cadre du parc éolien :

- Bruit audible :

L'éolienne est généralement silencieuse. Il ne pose aucune nuisance sonore répréhensible dans les environs. Les fabricants d'éoliennes fournissent les données de niveau de bruit de la machine en dB par rapport à la distance de la tour. Un niveau de bruit de machine typique de 600 kW, produit un bruit de 55 dB à 50 m de distance de la turbine et de 40 dB à 250 m. Le tableau 1-1 compare le niveau de bruit des turbines avec d'autres niveaux de bruit généralement connus. Le tableau indique que la turbine à une distance de 50 m ne produit pas de bruit supérieur à l'usine moyenne. Ce bruit, cependant, est un bruit constant. De plus, la turbine fait un bruit plus fort en lacet sous la direction changeante du vent. Dans les deux cas, l'ordonnance locale sur le bruit doit être respectée. Dans certains cas, des plaintes pour bruit ont été signalées par les communautés voisines. Bien que la pollution sonore ne soit pas un problème majeur avec les parcs éoliens offshore, cela dépend de la taille si l'on peut ou non entendre les éoliennes pendant leur fonctionnement. Il a également été suggéré que le bruit des turbines se déplace sous l'eau et perturbe également la vie marine [11].

Source	Niveau de bruit (dB)
Rame surélevée	100
Usine bruyante	90
Rue moyenne	70
Usine moyenne	60
Bureau moyen	50
Conversation calme	30

Tableau I.1 : Niveaux de bruit de certaines sources communément connues par rapport à l'éolienne.

- Interférence électromagnétique (IEM):

Toute structure fixe ou mobile à proximité d'une tour de radio ou de télévision interfère avec les signaux. La tour de l'éolienne, étant une grande structure, peut provoquer des IEM indésirables dans les performances d'un émetteur ou d'un récepteur à proximité. De plus, les pales rotatives

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

d'une éolienne en fonctionnement peuvent réfléchir des signaux incidents de sorte que les signaux électromagnétiques dans le voisinage peuvent subir des interférences à la fréquence de passage des pales. La nature exacte et l'ampleur de ces IEM dépendent d'un certain nombre de paramètres. Les principaux paramètres sont l'emplacement de la tour de l'éolienne par rapport à la tour de radio ou de télévision, les propriétés physiques et électriques des pales du rotor, le schéma de modulation de la fréquence du signal et les caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques à haute fréquence dans l'atmosphère locale [11].

- Effets sur les oiseaux :

L'effet des parcs éoliens sur la vie sauvage et la population aviaire - y compris les espèces en voie de disparition protégées par les lois fédérales - a créé la controverse et la confusion au sein de la communauté environnementale dominante. Les habitudes de reproduction et d'alimentation de certains oiseaux peuvent être perturbées. La pale de l'éolienne peut peser quelques tonnes et la vitesse de pointe de la pale peut atteindre 200 mph, une arme mortelle contre toute créature en vol. Les oiseaux peuvent être tués ou au moins blessés s'ils entrent en collision avec une lame. Souvent, le tirage d'aspiration créé par le vent s'écoulant vers une turbine attire les oiseaux dans le courant d'air dirigé vers les pales. Bien que moins habituels, les oiseaux sont attirés par le bourdonnement des tours (musique !) et volent simplement dans les tours. D'autre part, des études sur un site côtier près du Danemark ont déterminé que les oiseaux modifient leurs trajectoires de vol à 200 m autour de la turbine. Ainsi, un parc éolien peut modifier considérablement les trajectoires de vol de grandes populations aviaires. Dans une autre étude, la population d'oiseaux aquatiques a diminué de 75 à 90% en 3 ans après l'installation d'un parc éolien offshore au Danemark. Un déclin aussi important pourrait avoir un impact massif sur l'écosystème de la région environnante [19].

Autres incidences :

L'impact visuel du parc éolien peut être désagréable pour les propriétaires autour du parc éolien. C'est plus le cas pour les parcs éoliens offshore, où les propriétaires sont généralement des personnes aisées ayant une influence significative sur les organisations politiques de la région. Les concepteurs de parcs éoliens peuvent minimiser les plaintes esthétiques en installant des turbines identiques et en les espaçant uniformément. Le vent étant un important transporteur d'énergie à travers le monde, l'impact de l'énergie retirée par de nombreux grands parcs éoliens à grande échelle peut éventuellement avoir un impact sur le climat. Cela pourrait faire l'objet d'études futures.

I.10 Historique sur les machines électriques :

L'histoire des machines électriques débuta avec le professeur Pacinotti (1800-1849) qui effectua des travaux sur un anneau tournant dans un champ magnétique. Bien que restée au stade expérimental, il a envisagé une utilisation en mode générateur et moteur. Cependant certaines voix se sont levées pour réfuter cette théorie car l'effet magnétique du courant électrique a été découvert un peu plus tôt par Oersted en 1820 et l'induction magnétique par Faraday en 1831.

En 1869, le belge Zénobe Gramme réalisa les premières génératrices à courant continu en imaginant le collecteur. Ses travaux furent présentés à l'Académie des Sciences de Paris et cette première machine a reçu le nom de machine de Gramme.

En 1887 Nikola Tesla (1856-1943), ingénieur yougoslave en électronique, fonde une société de construction d'alternateurs. Grâce à ses travaux, l'utilisation du courant alternatif va se trouver profondément bouleversée et gagner la bataille du transport à distance. C'est donc dans les années 1890 que la première expérience de transport d'électricité s'est faite vers l'Allemagne sur une distance de 175 km avec un rendement de 75 %.

Tesla recommande d'abord l'utilisation des courants polyphasés et réussit à créer un champ magnétique tournant qui permet d'entraîner en rotation une armature mobile tournante. Grâce à l'électricien Russe Michail Ossipowitsch Dolivo-Dobrowolski, l'invention du moteur asynchrone à courant triphasé à cage d'écureuil intervient en 1889. Cette machine ne sera construite industriellement que deux ans plus tard. La paternité de cette invention est contestée et souvent attribuée à Tesla. Avant le début du vingtième siècle la plupart des machines électriques que nous connaissons actuellement avaient été mises en œuvre ou leur principe avait été déjà posé.

Les machines synchrones, asynchrones et à collecteur constituent l'essentiel du parc des machines électriques depuis un siècle et demi. Cependant, l'évolution de l'électronique de puissance, comme la découverte du transistor en 1948 et du thyristor en 1958, a permis au domaine des machines électriques de ne pas rester figé, des progrès immenses ont été effectués dans ce domaine conduisant à d'importants développements théoriques et technologiques [59].

I.11 Type des machines utilisées dans la chaîne :

- Machine asynchrone à cage d'écureuil :

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [20].

- Machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à rotor bobiné à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hypo-synchrone : le stator est connecté au réseau possédant une tension et une fréquence fixes, alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence [21].

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse, et leur robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un grand avantage [21] .

- Machine synchrone à aimants permanents (GSAP) :

Aujourd'hui la plupart des machines synchrones utilisées dans les petites éoliennes sont des machines synchrones à aimants permanents figure I.12 par rapport à la machine à rotor bobiné. Car leurs performances, notamment en termes de couple massique, sont très intéressantes lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles [22].



Figure I.12.: Structure d'un moteur synchrone à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents

dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [23].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, et a pu rendre la machine synchrone à aimants permanents un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation, car ces systèmes de couplage utilisant la GSAP, ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure I.13). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [23].

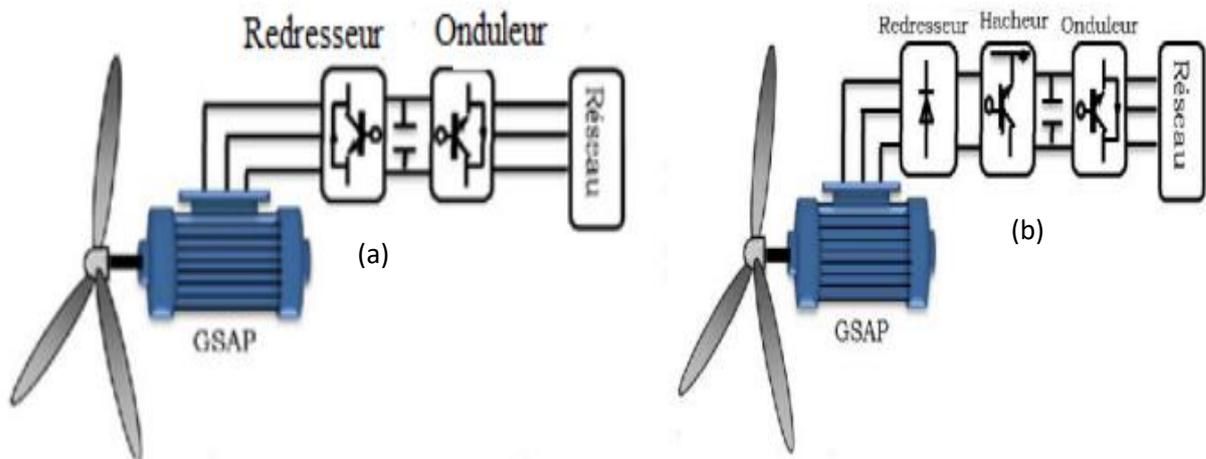


Figure I.13.: Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents :
(a) GSAP Avec convertisseurs à MLI, (b) Avec redresseur à diodes plus hacheur

I.12 Les rotors de la machine à aimants permanents :

Différentes configurations d'emplacement des aimants sont possibles, Chacune a ses avantages et ses inconvénients. En règle générale, les aimants en surface ont l'avantage d'être simples à mettre en place (un simple collage sur la surface du rotor suffit). A haute vitesse, cette configuration n'est pas adaptée car avec la force centrifuge, les aimants vont se détacher. Pour remédier à ce problème, il est préconisé de recourir soit à un rotor extérieur avec aimants en surface (les aimants étant plaqués à la surface grâce à la force centrifuge) soit à frotter les aimants. [24].

- **Machines synchrones à aimants permanents montés en surface :**

Cette structure est la plus simple à construire parce que des aimants permanents à aimantation radiale sont disposés 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. La tenue mécanique des aimants est facilitée par la force centrifuge [25].

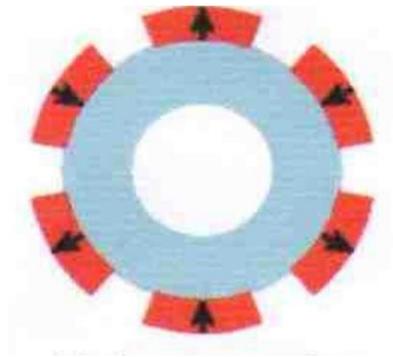


Figure I.14.: Machines synchrones à aimants permanents montés en surface.

- **Machines synchrones à aimants permanents insérés :**

À partir 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 interpolaire qui rajoutent de la saillance.

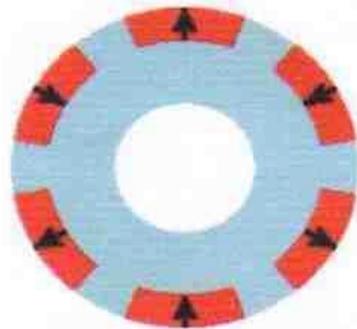


Figure I.15 : Machines synchrones à aimants permanents insérés.

- **Machines synchrones à aimants permanents enterrés :**

Le principe de cette structure est d'augmenter 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 [25].

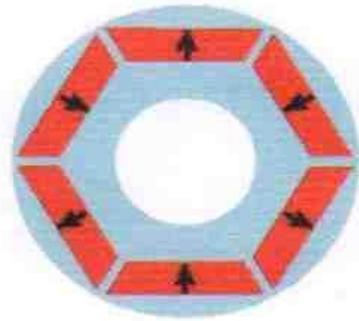


Figure I.16.: Machines synchrones à aimants permanents enterrés.

- **Machines synchrones à aimants permanents chapeautés :**

Cette structure est déduite de celles avec des aimants permanents montés en surface. On place sur les aimants des pièces polaires généralement en acier doux. La combinaison des aimants et des pièces polaires crée une anisotropie du rotor et rajoute une saillance. Les pièces polaires permettent de contrôler la forme de la f.é.m. Au stator en agissant sur le profil de la pièce [25].

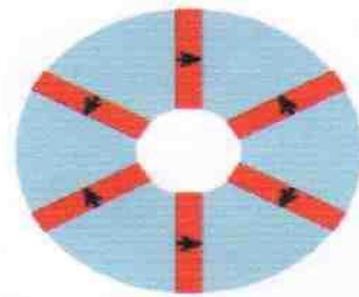


Figure I.17: Machines synchrones à aimants permanents chapeautés.

Dans la plupart des cas, le stator de l'alternateur est à base d'aimants permanents. Lorsque le nombre de pôles est élevé, les puissances peuvent atteindre quelques centaines de *Kilowatts*. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents à la place de l'enroulement inducteur annule les pertes par effet Joule au rotor et augmente le rendement. L'utilisation des aimants reste avantageuse à cause de la masse réduite, le rendement élevé et l'adaptation aux faibles vitesses. En outre, elles sont robustes et n'ont pas besoin d'une excitation externe. L'inconvénient majeur de l'utilisation de la *GSAP* est le coût des aimants utilisés [25].

- **Avantages de l'utilisation des GSAP :**

- Puissance optimisée pour les vents faibles et moyens,
- Pas de système balais collecteur et élimination des pertes rotoriques,
- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse,
- Simplicité de fabrication et moins de maintenance,
- Possibilité d'absence de boîte de vitesse (multiplicateur de vitesse),

Chapitre I : Généralité sur la chaîne de conversion éolienne.

- Bon rendement,
- Fort couple massique et volumique [26]

I.13 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur la production éolienne, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques ont été données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens. Dans le cadre de notre étude, la génératrice synchrone à aimant permanent, est le type de machine utilisé dans la chaîne de conversion éolienne.

Chapitre II

II.1 Introduction :

Dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne, une turbine éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utile sur son arbre, et entraîne une génératrice électrique (synchrone ou asynchrone) pour produire de l'électricité. L'utilisation des aimants permanents a été une vraie révolution dans le domaine de l'utilisation de ces machines, car elle a permis d'éliminer le bobinage rotorique et son excitation ainsi que les balais et les contacts glissants. Ce qui induit moins de maintenance et plus de robustesse pour la machine [27].

Dans ce chapitre, nous étudions la modélisation des éléments de la chaîne de conversion éolienne, en commençant par la première partie qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice, la deuxième qui représente la machine synchrone à aimant permanent, fonctionnant en générateur. Ainsi que les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau, ceci dans le but de capter un maximum d'énergie sur la plus large plage de variation de vitesse du vent possible, en vue d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

II.2 Modélisation du vent et de la turbine :

II.2.1 Modèle du vent :

La modélisation des éoliennes nécessite la modélisation du vent et du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de contrôle. Le vent est la variable d'entrée du système de vent. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, $V = f(t)$. La vitesse moyenne du vent est donnée par l'expression suivante [25] :

$$V(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \quad (\text{II-1})$$

Avec

A : Valeur moyenne de la vitesse du vent

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

w_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

II.2.2 Modélisation de la turbine éolienne :

La partie mécanique de la turbine étudiée comportant des aubes réglables ayant leurs propres coefficients d'inertie, elles sont fixées sur un arbre moteur tournant à une vitesse de la turbine

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

La puissance P_v d'une masse d'air traversant la section S_v et se déplaçant à la vitesse V_v peut s'exprimer comme suit [28] :

$$P_v = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_v V_v^3 \quad (\text{II-2})$$

Avec :

ρ : densité volumique de l'air (kgm^{-3}),

V_v : vitesse de vent (ms^{-1})

La puissance mécanique apparaissant au rotor de la turbine s'écrit :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II-3})$$

λ : la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire en bout de pales de l'éolienne et la vitesse du vent. Et il est défini comme suit :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{\text{turbine}}}{V} \quad (\text{II-4})$$

Ω : La vitesse de rotation de la turbine.

R : Le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

Le coefficient de puissance est une fonction non linéaire dépend à la fois de l'angle de calage β et de la vitesse réduite λ [30]. Ce coefficient présente une limite théorique, appelée limite de *Betz*, égale à 0,593 et qui n'est jamais atteinte en pratique [29].

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p , et différentes expressions ont été proposées, les expressions les plus utilisées dans les articles scientifiques et les ouvrages sont Forme exponentielle, Forme sinusoïdale et Forme polynomiale (linéaire), dans notre cas on utilise une forme linéaire.

Le schéma de La figure suivante indique l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse réduite λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β . On constate que pour chaque valeur du coefficient de puissance a une valeur maximale, correspondante à une vitesse réduite optimale λ_{op} [30] :

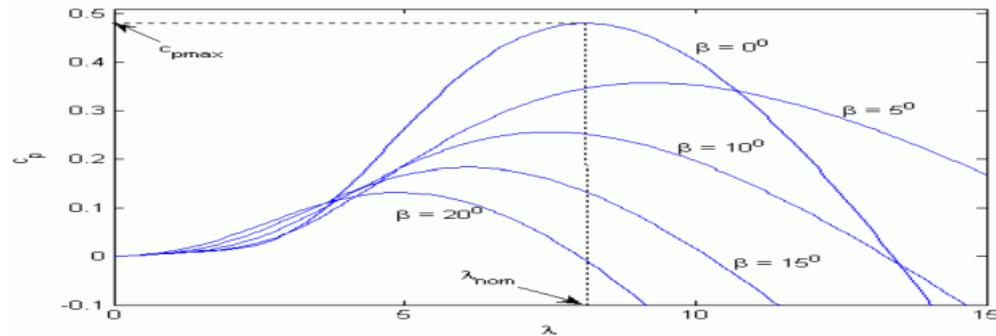


Figure II.1: coefficient Cp en fonction de λ

II. 2. 2. 1 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse du générateur et le couple aérodynamique au couple du multiplicateur. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes[31] :

$$\Omega_{turbine} = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (II-6)$$

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_{turbine} \quad (II-7)$$

G = Rapport de multiplication.

C_{mec} = Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur.

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [32] :

$$J = \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II-8)$$

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

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor:

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II-9)$$

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

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II-10)$$

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

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

II. 2. 2. 2 Principe de la MPPT :

La puissance captée par l'éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse du générateur. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable maximise cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de contrôle pour maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme une grandeur perturbatrice. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne.

Pour cela, on peut distinguer deux approches possibles (types) [33] :

- La première, considère que la caractéristique C_p n'est pas connue, et il est la moins classique
- La deuxième façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de profil aérodynamique soit connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans un état optimal

Dans le cadre de notre étude, on distingue deux familles de structures de commande qui sont :

- ❖ – Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- ❖ – Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

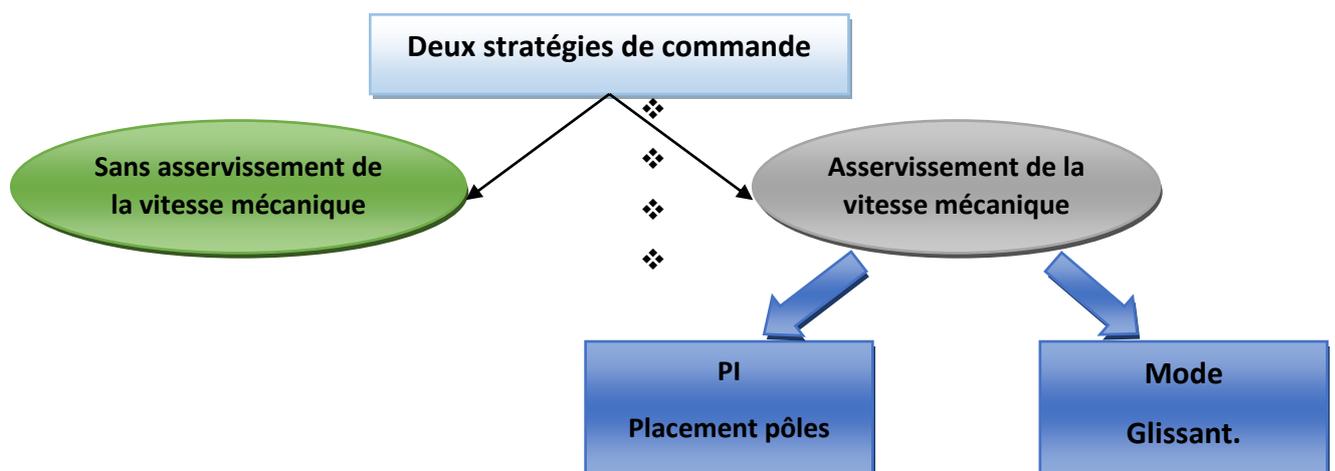


Figure II.2 : Stratégies de commande de la turbine étudiée.

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

L'équation donnant la puissance, correspond à une vitesse de vent V . Si le rapport de vitesse est maintenu à sa valeur optimale, le coefficient de puissance est à sa valeur maximale, ainsi que la puissance de l'éolienne [34] :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho \pi R^2 V^3 \quad (II-11)$$

Si à partir de l'équation du rapport de vitesse supposé maintenu à la valeur optimale, on isole la vitesse du vent pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale, on obtient l'équation :

$$V = \frac{R \Omega_{turbine}}{\lambda^{opt}} \quad (II-12)$$

$$P_{turbine}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho \pi R^2 \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3 \Omega_{turbine}^3 \quad (II-13)$$

On obtient ainsi une forme analytique de la puissance mécanique maximale de l'éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω uniquement. En supposant que les conditions sont optimales (à puissance optimale), alors l'équation (II.15) permet de calculer la valeur du couple optimal [35] [32] :

$$C_{turbine}^{opt} = \frac{1}{2} C_{pmax} \rho \pi R^2 \left(\frac{R}{\lambda_{opt}}\right)^3 \Omega_{turbine}^2 \quad (II-14)$$

Schéma bloc de simulation de la turbine :

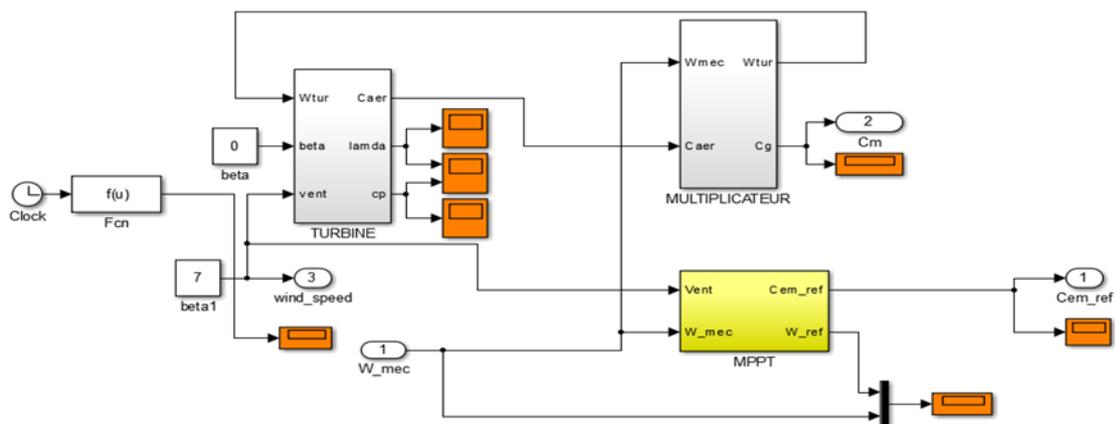


Figure II. 3. Schéma bloc de simulation de la turbine.

II. 3 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent :

II.3.1 Généralités sur les machines synchrones à aimant permanent :

Le développement rapide des MSAP à haute énergie avec une courbe de démagnétisation plutôt linéaire a conduit à une large utilisation des moteurs synchrones à aimant permanent pour les variateurs de vitesse. Les machines électriques étant réversibles par principe, le régime générateur est également disponible et, pour les éoliennes à entraînement direct de l'ordre de la centaine de kW ou du MW (8 MW, 490 tr/min), de telles solutions sont proposées. Des GSAP entraînés par turbine à gaz à très grande vitesse dans la plage de 100 kW à 60–80 krpm sont également introduits [36].

II.3.2 Modélisation mathématique de la GSAP :

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types des machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne [37]. Les machines à courant alternatifs sont en générale modélisées par des équations différentielles non linéaires. Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée-diphase est nécessaire pour simplifier le modèle [38].

II.3.2.1 Hypothèses simplificatrices :

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent obéit à certaines hypothèses essentielles de simplification [37], [39].

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- La répartition de l'inductance dans l'entrefer est quasi – sinusoïdale.
- La MSAP est supposée symétrique et linéaire.
- Les réactances de fuites sont indépendantes de la position du rotor.
- La saturation et l'hystérésis du circuit magnétique sont négligeables ainsi que les pertes par courant de Foucault, ceci permet l'établissement des relations linéaire entre flux et courant.

II.3.2.2 Modèle de la GSAP dans le repère (abc) [39] :

A) Les équations électriques :

$$V_{sa} = R_s I_{sa} + \frac{d\phi_{sa}}{dt} \quad (\text{II-15})$$

$$V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \quad (\text{II-16})$$

$$V_{sb} = R_s I_{sb} + \frac{d\phi_{sb}}{dt} \quad (\text{II-17})$$

Ces équations peuvent s'écrire sous forme matricielle :

$$[V_{s,abc}] = [R_s][I_{s,abc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s,abc}] \quad (\text{II-18})$$

Avec :

R_s : Résistance des phases statoriques.

$V_a V_b V_c$: Tensions des phases statoriques.

$I_a I_b I_c$: Courants des phases statoriques.

$\phi_a \phi_b \phi_c$: Flux totaux à travers les bobines statoriques.

B) Les équations magnétiques :

Les relations entre flux et courants s'écrivent sous forme matricielle comme suit :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][i_s] + [\Phi_{sf}] \quad (\text{II-19})$$

$$\text{Avec : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_{sf}] = [\Phi_{af} \quad \Phi_{bf} \quad \Phi_{cf}]^T$$

$[L_{ss}]$: Matrice d'inductances statoriques. Elle contient des termes constants regroupés dans

$[L_{s0}]$ et des termes variables dépendant de constantes θ , que nous regroupons dans $[L_{s2}(\theta)]$:

II.3.3 Passage au repère de Park :

Il existe plusieurs transformations visant à simplifier les équations de la machine en les rendant plus faciles à résoudre numériquement. Parmi ses transformations, la transformée de Park qui consiste à remplacer les enroulements triphasés (a b c) par deux enroulements d et q [17]. Et Cette transformation mathématique transforme les trois bobines statoriques déphasées

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor. Le principal avantage de cette transformation est d'avoir des axes magnétiquement indépendants [34].

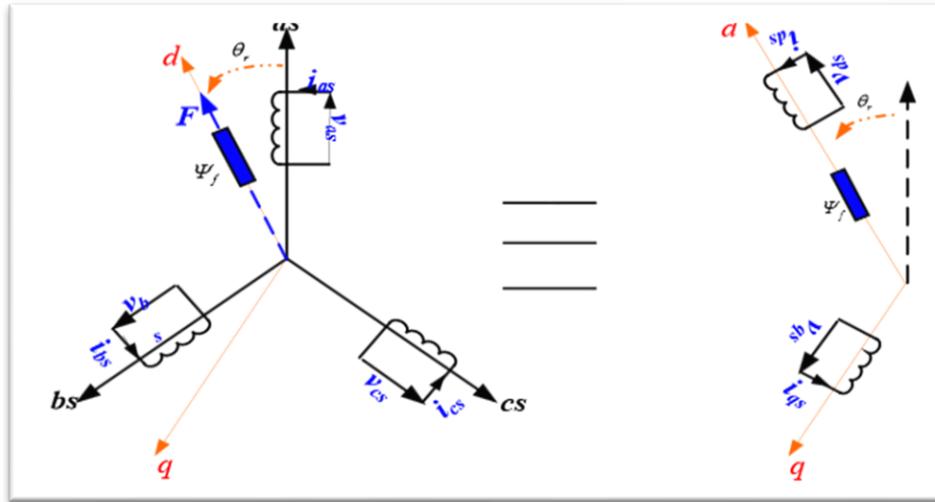


Figure II.4 : Transformation triphasée-diphasee.

Les axes (d, q) sont liés au rotor et tournent avec lui. Ainsi les grandeurs réelles (tensions, courants ou flux) sont liées aux grandeurs de Park par la relation suivante :

$$[V_{abc}] = [P(\theta)][V_{dq}]$$

$$[V_{dq}] = [P(\theta)]^{-1}[V_{abc}]$$

Avec $[P(\theta)]$ et $[P(\theta)]^{-1}$: Sont les matrices de passage direct et inverse qui conserve les puissances et qui assure le changement de variable. Elle est donnée par la matrice suivante [20][17] :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

Et la matrice inverse :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & 1 \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

II.3.4 Modèle de la GSAP dans le repère de Park :

Le schéma simplifié du GSAP dans le référentiel de Park est représenté sur la Figure (II.2), le modèle GSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

A) Equations électriques

Les équations électriques de la GSAP convention moteur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - W_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} - W_r \cdot L_d \cdot i_d + W_r \phi_f \end{cases} \quad (\text{II-22})$$

En fonctionnement génératrice, on inverse le sens des courants on a donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} - L_d \frac{di_{ds}}{dt} + W_r \cdot L_q \cdot i_q \\ V_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} - L_q \frac{di_{qs}}{dt} - W_r \cdot L_d \cdot i_d + W_r \phi_f \end{cases} \quad (\text{II-23})$$

Cette convention de signe sera conservée tout au long de cette modélisation.

B) Equations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_d \cdot i_{ds} + \phi_f \\ \phi_{qs} = L_q \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II-24})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux d'axe direct ϕ_{ds} et en quadrature ϕ_{qs} sont fonction linéaire des courants (i_{ds} et i_{qs}) respectivement d'axe direct et en quadrature.

c) Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle du stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor.

$$C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} P \frac{dw_e}{d\theta_r}$$

Avec,

w_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

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

P : Nombre de paires de pôles.

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2}(V_{ds} \cdot i_{ds} + V_{qs} i_{qs})$$

En remplaçant V_{ds} et V_{qs} par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s(i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - (i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} + i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt}) + \frac{d\theta_r}{dt} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds}) \right]$$

$\frac{3}{2} \cdot R_s(i_{ds}^2 - i_{qs}^2)$: représente la puissance dissipée par effet Joule

$\frac{3}{2} \cdot (i_{ds} \frac{d\phi_{ds}}{dt} - i_{qs} \frac{d\phi_{qs}}{dt})$: la variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} (\phi_{ds} i_{qs} - \phi_{qs} i_{ds})$: la puissance électromagnétique.

Sachant que : $P = C_{em} \cdot \Omega$ et $W = p \cdot \Omega$ (Ω : vitesse mécanique)

Alors,

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds})$$

et après l'affectation des valeurs de flux on aura :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot P \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + i_{qs} \cdot \phi_f]$$

C) Equations mécaniques :

L'équation de la dynamique de la *GSAP* est donnée comme suit:

$$Cm - Cem - f\Omega = j \frac{d\Omega}{dt}$$

Avec :

Cem : Couple résistant (électromagnétique).

$f\Omega$: Couple de frottements visqueux.

f: Coefficient des frottements visqueux.

J: Moment d'inertie de la machine.

II.4 Redresseur

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs *MLI* sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture [30]. On modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux : c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

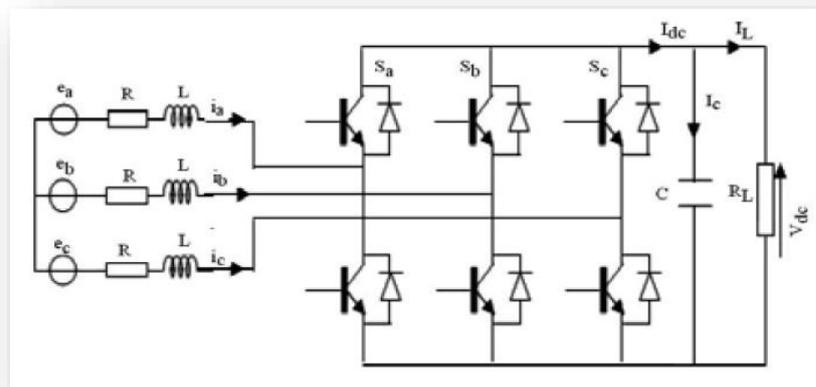


Figure II.5 : Schéma de l'association *GSAP*-Redresseur à *MLI*.

La fonction des interrupteurs établie une liaison entre le coté alternatif et le bus continu ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1, S = -I \\ -1, S = +I \end{cases} \quad (II-25)$$

Pour: $S=a, b, c$

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

Puis, les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction de S_j , V_{dc} et les courants d'entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par:

$$U_{Sab} = (S_a - S_b).V_{dc} \quad (\text{II-26})$$

$$U_{Sbc} = (S_b - S_c).V_{dc}$$

$$U_{Sca} = (S_c - S_a).V_{dc}$$

Les équations de tension pour le système triphasé équilibré sans raccordement neutre peuvent être écrites ainsi

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = R. \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L. \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-27})$$

Avec :

$$V_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3}.V_{dc} \quad (\text{II-28})$$

$$V_{sb} = \frac{2S_b - S_a - S_c}{3}.V_{dc}$$

$$V_{sc} = \frac{2S_c - S_a - S_b}{3}.V_{dc}$$

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme suit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{c^*}$$

Le courant dans la capacité peut aussi écrire :

$$i_{c^*} = i_c - i_{ch}$$

Finalement, on déduit l'équation de couplage entre côtés alternatif et continu par:

$$C. \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch} \quad (\text{II-29})$$

$$C. \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_{ch}$$

Les équations précédentes dans les coordonnées synchrones d q sont:

$$e_D = R i_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega L i_q + U_{sd}$$

$$e_Q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} - wL_{id} + U_{sq}$$

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = Si_d - S_q i_q - i_l \quad (\text{II-30})$$

$$S_d = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c) \cdot \cos(wt) + \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \cdot \sin(wt) \quad (\text{II-31})$$

$$S_q = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \cdot \cos(wt) + \frac{1}{6}(2S_a - S_b - S_c) \cdot \sin(wt) \quad (\text{II-32})$$

II.5 Commande de la machine synchrone à aimants permanents :

L'approche la plus utilisée en commande machine consiste à modifier le modèle de Park. La saturation magnétique est considérée d'un point de vue global en regardant ces effets sur les grandeurs accessibles à la mesure comme les courants ou les flux magnétiques. La notion d'inductance est conservée en régime saturé. La saturation est prise en compte en modulant la valeur des inductances en fonction des courants circulant dans les bobinages de la machine [41].

Cette commande est basée sur la transformation de Park qui se base sur l'orientation du champ magnétique ou le vecteur courant stator va se décomposer en deux composantes, l'une assure le contrôle du flux et l'autre agit sur le couple et rend sa dynamique identique à celle du Machine à courant continu à excitation séparée. :

II.5.1 La commande vectorielle

La commande vectorielle est une méthode qui traite la technique de contrôle des machines alternatives. Son principe consiste à éliminer le couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes (i_{sd}, i_{qs}) en quadrature dans un référentiel lié au champ tournant de façon que l'une des composantes (i_{qs}) commande le couple et l'autre (i_{sd}) commande le flux, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement comparable à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée [42].

$$i_{sd} = 0 \Rightarrow C_{em} = p\phi_{sf} i_{sq} \quad (\text{II-33})$$

II.5.1.1 Régulateur classique PI :

On appelle régulateur ou (contrôleur) la partie d'un système de contrôle comparant le signal de mesure $y(t)$ au signal de consigne $r(t)$ afin de générer un signal de contrôle $u(t)$ (figure II.6) [43].

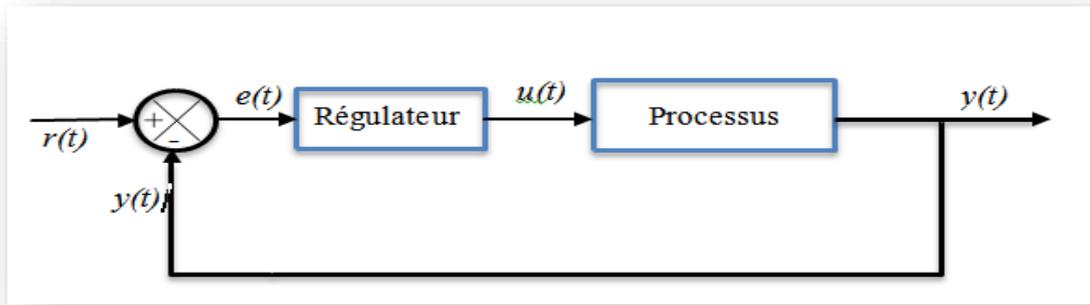


Figure II.6 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé.

A) Calcul des paramètres du régulateur PI :

L'entrée du régulateur est prise comme étant la différence entre le courant de référence i_{sd_ref} et la valeur du courant i_{sd} mesuré. Le schéma block suivant montre la procédure de la commande.

Dans le but d'obtenir un facteur de puissance unitaire (la puissance réactive $Q=0$), on pose le courant direct de référence nul ($i_{sd_ref}=0$).

On retrouve la même boucle de régulation pour le courant i_q . La fonction de transfert en boucle ouverte $F_{bo}(s)$

$$F_{bo}(s) = \left(k_p + \frac{k_i}{s}\right) \left(\frac{1}{R_s + sL_d}\right)$$

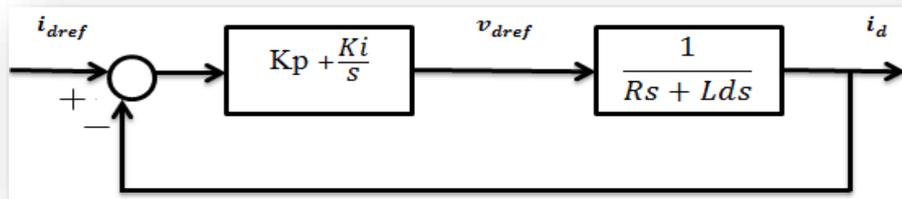


Figure II.7 : Boucle de régulation du courant i_{sd} .

Si on compose le terme $\frac{K_p}{K_i}$ par le terme $\frac{L_d}{R_s}$, on obtient la condition suivante $\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_p}{K_i}$.

Par contre, la fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit maintenant $F_{bo}(s) = \frac{K_i}{sR_s}$ en boucle

fermée nous obtenons un système du premier ordre défini par :

$$F_{bf}(s) = \frac{1}{\frac{R_s}{k_i} s + 1}$$

La constante de temps en boucle fermée est définie par : $\tau_{bf} = \frac{R_s}{K_i}$

L'action intégrale du **PI** est obtenue comme suit : $K_i = \frac{R_s}{\tau_{bf}}$

Si on choisit le temps de réponse souhaité, On aura donc :

$$\begin{cases} K_p = \frac{3L_d}{t_{rep}} \\ K_i = \frac{3R_s}{t_{rep}} \end{cases}$$

II.5.1.2 contrôles de la vitesse par le régulateur **PI** :

Une fois la régulation de la boucle de courant validée, il est alors possible de mettre en place, en cascade, une boucle de vitesse souhaitée. En négligeant la constante du temps électrique par rapport à la constante du temps mécanique. Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est le suivant :

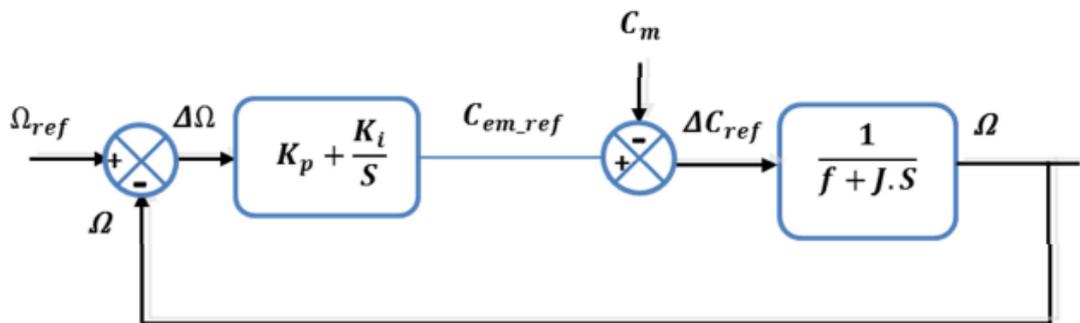


Figure II.8 : Boucle de régulation de la vitesse.

Le réglage de la vitesse nécessite l'ajout d'un correcteur (PI par exemple) permettant d'optimiser les performances du système. La dynamique du système est régie par une équation différentielle du premier ordre, caractérisée par une constante de temps seulement :

$$\begin{aligned} \Delta C &= C_m - C_{em} = f \cdot \Omega + J \frac{d\Omega}{dt} \\ \Rightarrow \Delta C &= f\Omega + J \cdot S \cdot \Omega \\ \Rightarrow \frac{\Omega}{\Delta C} &= \frac{1}{f + J \cdot S} \end{aligned}$$

(II-34)

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

La fonction de transfert de la boucle de vitesse en boucle fermée est donnée par:

$$G_{BF}(s) = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} = \frac{K_p s + K_i}{s(j s + f) + K_p s + K_i} = \frac{\frac{K_p s + K_i}{j}}{s^2 + \frac{(K_p + f)s}{j} + \frac{K_i}{j}} \quad (II-35)$$

Après identification avec un système de second ordre on obtient:

$$F(s) = \frac{\alpha}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (II-36)$$

Avec:

ζ : est le taux d'amortissement imposé au système.

ω_n : est la pulsation naturelle du système.

Donc

$$K_p = 2\xi\omega_n j - f \quad (II-37)$$

$$K_i = j\omega_n^2 \quad (II-38)$$

Schéma bloc de simulation de la GSAP :

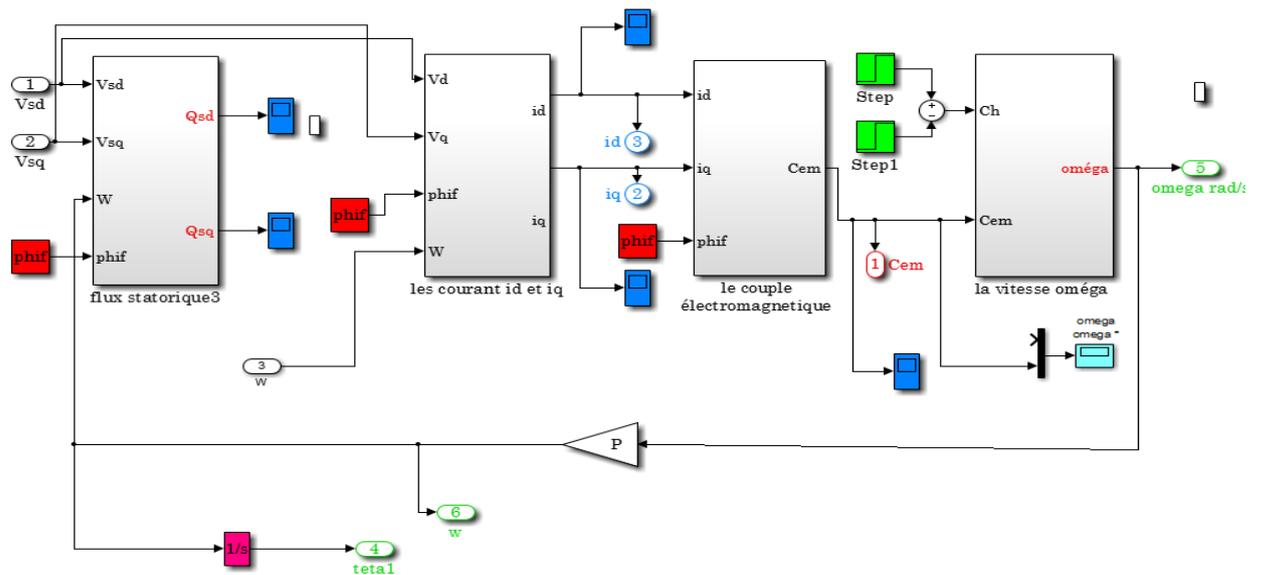


Figure II.9 : Schéma bloc de simulation de la GSAP.

II. 6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit les trois parties essentielles du système de conversion éolienne, la première représente la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice. Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine à aimant permanent, fonctionnant en génératrice. Nous avons constaté que le modèle de la machine synchrone à aimant permanent est un système à équations

Chapitre II: Modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

différentielles dont les Coefficients sont des fonctions périodiques du temps, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle.

Chapitre III

III.1 Introduction :

La technique de commande par modes glissants comme toutes les autres techniques de commande non linéaire a été développées depuis le début des années 80. Cette commande consiste à définir une surface dite de glissement, et une loi de Commande par Mode Glissant (CMG) de manière à conduire et à contraindre le système à rester au voisinage de cette surface dite de "commutation". La CMG s'inscrit dans le cadre de la théorie des systèmes à structure variable qui a pour but l'obtention, en boucle fermée, d'une dynamique largement indépendante de celle du processus et surtout de ses variations paramétriques éventuelles. En ce sens, la commande à structure variable est une commande non linéaire qui possède la propriété de robustesse. Elle est basée sur la commutation autour d'une hyper surface de glissement pour forcer la dynamique du système à correspondre avec celle définie par l'équation de la variété quand l'état est maintenu sur cette hyper surface. Le système se trouve en régime glissant, et sa dynamique est alors insensible aux variations des paramètres du processus, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations extérieures [44]. Plusieurs méthodes existent pour la détermination de la commande par mode de glissement, La méthode de Filippov, La méthode de la commande équivalente et La méthode de régularisation [44] [45].

Ce chapitre est consacré dans un premier temps à une présentation générale des concepts de base de La CMG. Son principe, ses propriétés de robustesse ainsi que ses défauts, puis on applique la méthode de la commande équivalente sur le système éolien étudié. Enfin la simulation totale, par le logiciel *Matlab/Simulink*, du modèle global de la chaîne de conversion ainsi que sa commande, sera présentée et discutée.

III.2 La commande par Mode Glissant :

L'objectif de la commande par mode glissant (MG) se résume en deux points essentiels :

- synthétiser une surface $S(x, t)$, telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité.
- déterminer une loi de commande (commutation) $u(x, t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface.

III.2.1 Systèmes à structure variables :

Lorsque la structure du système ou du correcteur utilisé prend de manière discontinue deux ou plusieurs expressions, la notion de système à structures variables intervient [46], Cela se traduit par les définitions suivantes :

1) c'est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, il est caractérisé par le choix d'une structure et d'une logique de commutation. Ce choix permet au système de commuter d'une structure à l'autre à tout instant [47].

2) Un système est dit à structure variable s'il admet une représentation par des équations différentielles du type :

$$\dot{X} = \begin{cases} f_1(x) & \text{si condition 1 est vérifiée} \\ \downarrow \\ f_n(x) & \text{si condition n est vérifiée} \end{cases}$$

III.2.1.1 Principe de la commande à structure variable par régime glissant :

La commande des systèmes non linéaires à structure variable est caractérisée par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation appropriée. Ce choix permettra de basculer entre ces structures à tout moment, en combinant les propriétés utilisées de chacune de ces structures afin d'avoir un comportement souhaité du système global [48].

La forme d'une commande à structure variable peut être donnée par :

$$\begin{cases} U_i = U_{max} & \text{si } S_i(x) > 0 \\ U_i = U_{min} & \text{si } S_i(x) < 0 \end{cases} \text{ avec } i=1, \dots, m \quad (\text{III-1})$$

u (i 1,...,m) i = : les composantes du vecteur de commande.

III.3. Modes de la trajectoire dans le plan de phase :

La technique de commande par (MG) consiste à ramener la trajectoire d'état d'un système vers la surface de glissement et à la commuter à l'aide d'une logique de commutation appropriée jusqu'au point d'équilibre. Cette trajectoire se compose de trois parties distinctes [49].

- **Mode de convergence (MC):** durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase et tend vers la surface de commutation $S(x_1, x_2) = 0$. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence[48].

- **Mode de glissement (MG) :** pendant laquelle la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $S(x)=0$ [46].

- **Mode de régime permanent (MRP):** ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre, il est caractérisé par la qualité et la performance de la commande [50].

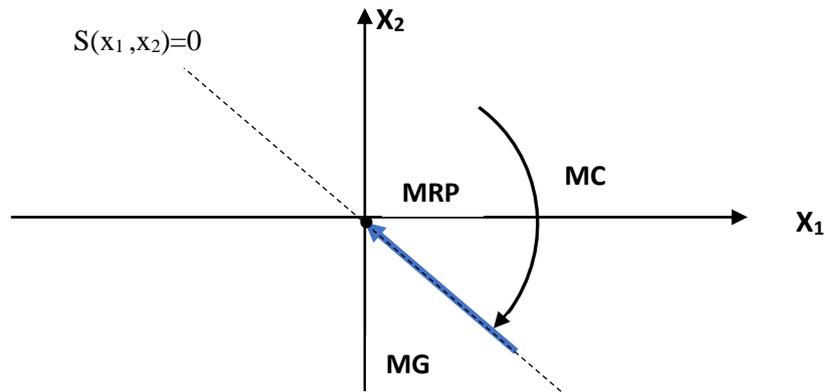


Figure III.1 : Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

III.4 Conception de la commande par mode glissant :

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche [10]. En général, pour réaliser ce type de commande trois étapes doivent être effectuées [51]:

- Choix de la surface de glissement.
- Détermination des conditions d'existence du régime glissant ou conditions d'accès.
- Synthèse des lois de commande du mode glissant.

III.4.1 Choix de la surface de glissement :

La surface de glissement ou la fonction de commutation représente le comportement dynamique désiré du système en boucle fermée. Elle peut être choisie linéaire ou non linéaire.

En général, pour un système défini par l'équation d'état suivante [65].

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + b(x, t)U(t) \quad (\text{III-2})$$

La forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable à sa valeur de consigne: [66], [67], est donnée par:

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda\right)^{r-1} e(x) \quad (\text{III-3})$$

Avec :

λ : Constante positive.

r : est le degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire

Apparaître la commande.

$e(x) = x - xd$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence.

x : variable d'état.

xd : valeur désirée.

$$\text{Pour } r = 1, S(x) = e(x) \quad (\text{III-4})$$

$$\text{Pour } r = 2, S(x) = \lambda_x e(x) + \dot{e}(x) \quad (\text{III-5})$$

$$\text{Pour } r = 3, S(x) = \lambda_x^2 e(x) + 2\lambda_x \dot{e}(x) + \ddot{e}(x) \quad (\text{III-6})$$

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro ($S(x)=0$), dont l'unique solution est $S(x)=0$ pour un choix convenable des paramètres.

III.4.2 Conditions de convergence et d'existence :

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent à la dynamique du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation [53]. Pour cela nous avons deux conditions :

1. Fonction directe de commutation :

Elle est proposée et étudiée par [54][55]. Il s'agit de donner à la surface une dynamique convergente vers zéro.

$$\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0 \quad (\text{III-7})$$

2. Fonction de LYAPUNOV :

Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive $V(x) > 0$ pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction ($0 < V(x) < \infty$), l'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence et de concevoir une commande V tel que le carré de la surface correspond à une fonction de Lyapunov. Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires [56].

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (\text{III-8})$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \tag{III-9}$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$S(x)\dot{S}(x) < 0 \tag{III-10}$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par $S^2(x)$, diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux cotés Figure(III.2). Cette condition suppose un régime glissant idéal [57].

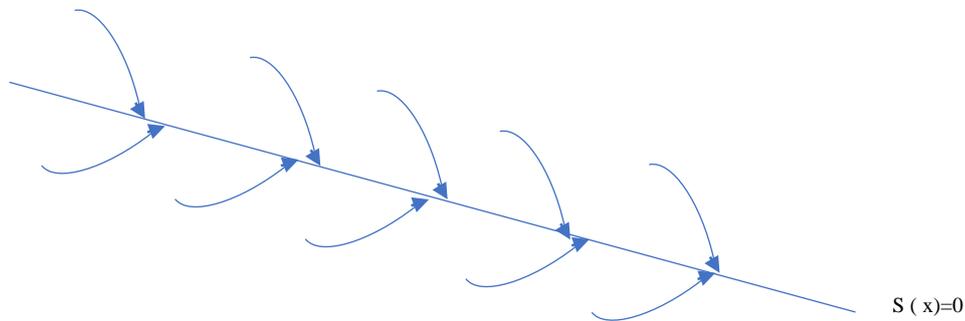


Figure III.2 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.

III.6 Calcul de la commande :

Une fois la surface de glissement est choisie, ainsi que le critère de convergence, il reste à déterminer la commande nécessaire pour ramener la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence des modes glissants. Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structure variable contrôlés par les modes glissants, est que la commande doit commuter entre V_{Max} et V_{Min} instantanément (fréquence infinie), en fonction du signe de la surface de glissement figure (I.3). Dans ce cas, des oscillations de très haute fréquence appelées « broutement » ou « Chattering » apparaissent dans le mode de glissement [57].

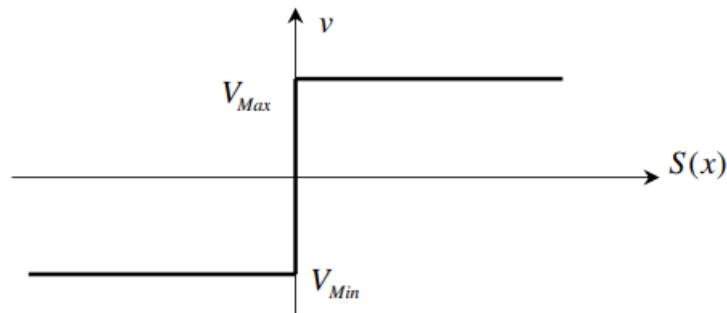


Figure III.3 : Commande appliquée aux systèmes à structure variable

III.7 Avantage et inconvénients de la commande par mode glissant :

Il y'a plusieurs avantages pour la commande par mode glissant : la précision, stabilité, simplicité, faible temps de réponse et la robustesse. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour traiter les systèmes qui ont des modèles mal connus, soit à cause de problèmes d'identifications des paramètres, soit à cause de la simplification sur modèle des systèmes.

Néanmoins, elle présente aussi des inconvénients car cette technique fait appel à un grand effort de commande, chose qui peut détériorer les organes de commande.

De plus, en réalité, on n'a pas le glissement idéal sur la surface mais des zigzags autour de celle-ci. Ce phénomène est appelé 'broutement' ou encore 'chattering', il engendre plusieurs effets indésirables sur la qualité et la réalisation de la commande et sur le système comme la figure (III.4) représente ce phénomène.

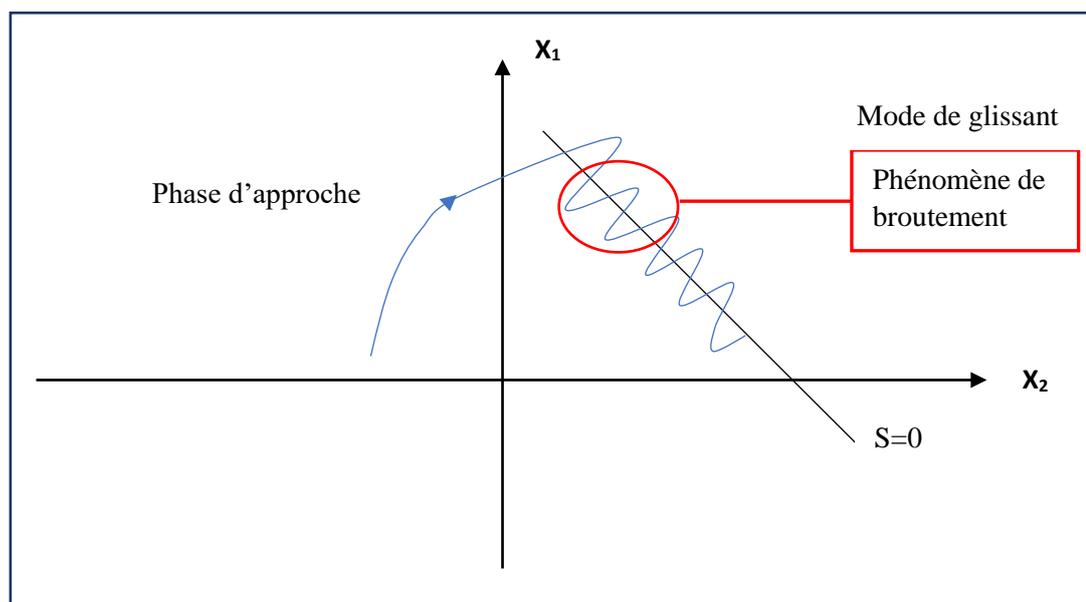


Figure III.4 : Illustration du phénomène de broutement.

Le phénomène de broutement est considéré comme un obstacle réel pour l'application de la commande par mode glissant, pour y remédier plusieurs solutions ont été proposées. On peut citer : La première c'est l'utilisation d'un observateur d'état asymptotique pour limiter la réticence. La deuxième c'est l'utilisation d'algorithmes de commande par mode de glissement d'ordre supérieur [60], cette dernière solution a permis la réduction ou même l'atténuation du phénomène de chattering tout en gardant les propriétés de robustesse et la convergence en temps fini etc...

III.8 Elimination du phénomène de "Chattering" :

Le phénomène de Chattering est provoqué par une commutation non infiniment rapide de la commande quand les techniques des modes glissants sont utilisées.

Ce phénomène est indésirable car il ajoute au spectre de la commande des composantes de haute fréquence [56]. Le broutement (phénomène de Chattering) peut être réduit en remplaçant la fonction « signe » par une fonction de saturation adéquate qui filtre les hautes fréquences.

On donne ci-dessous un exemple de fonction de saturation Figure (III.5):

Fonction **SAT** :

$$\left\{ \begin{array}{ll} Sat(S) = 1 & si \quad S > \mu \\ Sat(S) = -1 & si \quad S < -\mu \\ Sat(S) = \frac{S}{\mu} & si \quad |S| < \mu \end{array} \right. \quad (III-11)$$

μ : Un paramètre petit et positif.

Fonction **SMOOTH** :

On peut aussi remplacer la fonction « signe » par une fonction de classe C^1 . On donne ci-dessous un exemple de ce type de fonction, figure (III.6) [57].

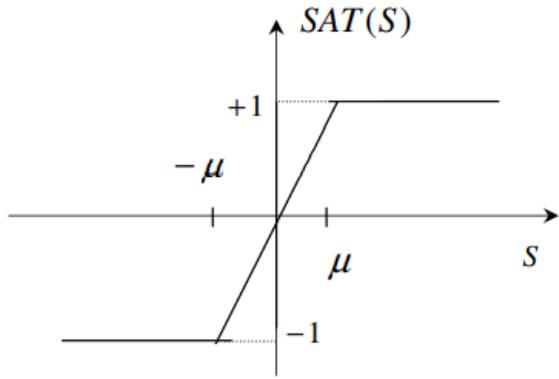


Figure III.5: Fonction « SAT ».

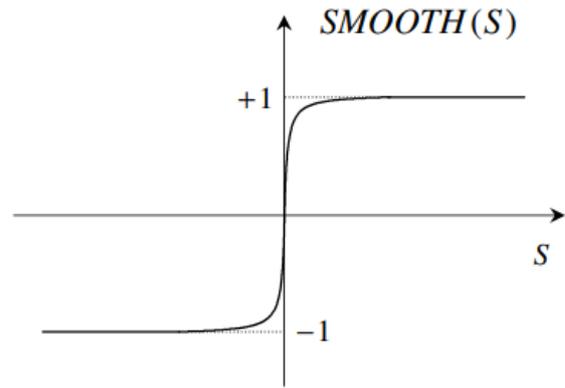


Figure III.6: Fonction « SMOOTH ».

III.9 Domaine d'application du réglage par mode glissant :

La technique de réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des vannes fonctionnant par tout ou rien qui n'ont que deux états stables, complètement ouvert ou complètement fermé. Ces vannes admettent des fréquences de commutation de l'ordre de 10 Hz.

Entraînements électriques pour machines-outils ou robots, entraînements nécessitant soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de la position. Dans ce cas, le comportement dynamique performant et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation) sont des avantages incontestables en faveur du réglage par mode glissant.

Il convient de mentionner que dans certains domaines tels que : les procédés chimiques et métallurgiques, où il existe des paramètres qui utilisent des régulateurs à deux positions, le procédé en mode glissant peut apporter plusieurs avantages mentionnés ci-dessus [58].

III.10 Détermination de la loi de commande

III.10.1 La commande équivalente:

Un vecteur de commande équivalente U_{eq} se définit comme étant les équations du régime glissant idéal. Nous nous intéressons au calcul de la commande équivalente et par la suite au calcul de la commande attractive du système défini dans l'espace d'état par l'équation (III.3). Le vecteur U est composé de deux grandeurs U_{eq} et U_n soit : [4]

$$U(t) = U_{eq} + U_n \tag{III-12}$$

L'utilisons de l'équation (III-2) et (III-12) permet obtenir la commande équivalente U_{eq} : Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{ds}{dt} = \frac{\partial s}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial s}{\partial x} \{f(x, t) + g(x, t)U_{eq}(t)\} + \frac{\partial s}{\partial x} \{g(x, t)U_n\} \quad (III-13)$$

En mode de glissement et en régime permanent, La surface $S(x)$ est nulle par conséquent sa dérivée et la composante discontinue U_n sont aussi nulles. D'où, nous déduisons l'expression de la commande équivalente:

$$U_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} B(x, t) \right]^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial x} f(x, t) \right) \quad U_n = 0 \quad (III-14)$$

En portant U_{eq} dans l'équation (III-2), on obtient l'équation du régime glissant idéal :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) - B(x, t) \left[\frac{\partial s}{\partial x} B(x, t) \right]^{-1} \left(\frac{\partial s}{\partial x} f(x, t) \right) \quad (III-15)$$

Cette équation représente la dynamique du système équivalent dans la surface de glissement.

La commande équivalente U_{eq} peut être interprétée comme la valeur moyenne modulée ou grandeur continue que prend la commande lors de la commutation rapide entre U^+U_{max} et U^-U_{min} [28], [71]

Tant que le régime glissant est assuré (condition (III-10) vérifiée), le système décrit par l'équation (III-2) est robuste, indépendant des variations des paramètres de la partie commandée et des perturbations qui agissent sur lui.

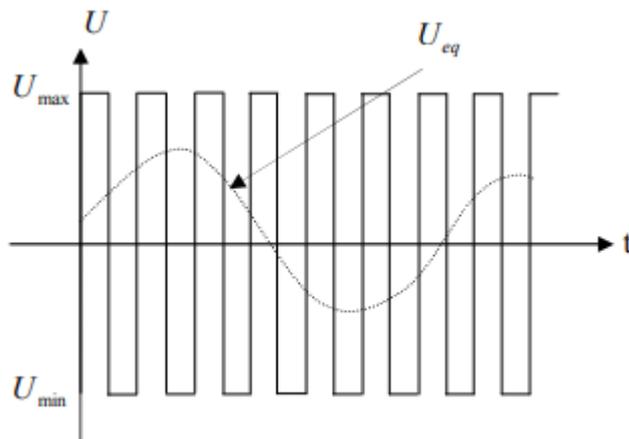


Figure III-7 : Commande équivalente U_{eq}

III.10.2 La commande discontinue de base

L'addition du terme U_n à la loi de commande permet d'assurer l'attractivité de la surface de glissement $S(x)$. Celle-ci est attractive si seulement si $S(x). \dot{S}(x) < 0$ Cette condition permet de définir la région dans laquelle le mode de glissement existe. [72]

Durant le mode de convergence, on remplace le terme U_{eq} par sa valeur donné par (III-14) dans l'équation (III-13). Nous obtenons donc une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial X} [B(x, t)U_n] \quad (III-16)$$

Le problème revient à trouver U_n tel que :

$$S(x). \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B(x, t)U_n] < 0 \quad (III-17)$$

La solution la plus simple est de choisir U_n sous la forme de relais. Dans ce cas, la commande s'écrit comme suit:

$$U_n = K. \text{sign}(s(x)) = K. \frac{S(x)}{|S(x)|} \quad (III-18)$$

En remplaçant l'expression (III-18) dans (III-17) on obtient :

$$S(x). \dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial X} [B(x, t)] K. \frac{S(x)}{|S(x)|} < 0 \quad (III-19)$$

Où le facteur $\frac{\partial S}{\partial X} [B(x, t)]$ est toujours négatif pour la classe de systèmes que nous considérons.

Le gain K doit être positif afin de vérifier les conditions de l'attractivité et de la stabilité. Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et, s'il est choisi très grand, nous aurons des fortes oscillations au niveau de l'organe de la commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande.

III.10 Application de la commande par mode de glissement au système :

Les lois de commande pour l'asservissement de vitesse ou de position ont pour objectifs :

- ✓ d'assurer la rapidité et la précision de la réponse des grandeurs régulées,
- ✓ d'assurer la robustesse du système vis-à-vis des perturbations et des variations des paramètres de la charge mécanique sur l'arbre de la machine.

Nous rappelons également les équations d'ordre électrique, ainsi que celles d'ordre mécanique représentant la dynamique de la machine.

$$\begin{cases} \dot{I}_d = -\frac{R_s}{L_d} I_d + \frac{W_r L_q}{L_d} I_q - \frac{V_d}{L_d} \\ \dot{I}_q = -\frac{W_r L_d}{L_q} I_d - \frac{R_s}{L_q} I_q - \frac{W_r \phi_{sf}}{L_q} - \frac{V_q}{L_q} \\ \dot{\theta} = \Omega \\ J. \dot{\Omega} = C_m - C_{em} - f \Omega \end{cases} \quad (III-20)$$

III.10.1 L'asservissement de vitesse

III.10.1.1 Stratégie de réglage à trois surfaces

Le réglage de la vitesse de la machine nécessite le contrôle du courant absorbé par la machine. Une solution classique consiste à utiliser le principe de la méthode de réglage en cascade (structure de trois surfaces) la boucle interne permet de contrôler les courants, tandis que la boucle externe permet de contrôler la vitesse.

Nous définissons les trois surfaces par :

❖ **La première surface**, celle de la vitesse, est décrite par :

$$S(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \tag{III-21}$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, nous avons :

$$S(\Omega) = 0 \quad \text{et} \quad \dot{S}(\Omega) = 0 \tag{III-22}$$

D'où nous déduisons : $I_{qn} = 0$

$$\dot{S}(\Omega) = 0 \quad \longrightarrow \quad I_{qeq} = \frac{C_m - f\Omega}{P \cdot [\phi_{sf} - (L_d - L_q)I_d]} \tag{III-23}$$

Durant le mode de glissement, le produit de la surface par sa dérivée doit être inférieur à zéro. Cela exige de vérifier la condition de Lyapunov suivante :

$$\lim_{s \rightarrow 0} S(\Omega) \dot{S}(\Omega) < 0 \tag{III-24}$$

En substituant l'expression de la commande équivalente (III-14) dans (III-15), la dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(\Omega) = -\frac{P}{J} [\phi_{sf} - (L_d - L_q)I_d] I_{qn} \tag{III-25}$$

Avec :

$$I_{qn} = K_v \cdot \text{sign}(S(\Omega)) \tag{III-26}$$

Ainsi, la commande I_{qref} représente la somme des grandeurs I_{qeq} et I_{qn} :

$$I_{qref} = I_{qeq} + I_{qn} \tag{III-27}$$

❖ **La deuxième surface** de la boucle interne, responsable de contrôle du courant I_{qn} , est décrite par :

$$S(I_q) = I_{qref} - I_q \tag{III-28}$$

La dérivée de la surface est donnée par :

$$\dot{S}(I_q) = -\frac{L_d W_r}{L_q} I_d - \frac{R_S}{L_q} I_q + \frac{W_r \phi_{sf}}{L_q} - \frac{V_q}{L_q} \tag{III-29}$$

Étant donné que : $V_q = V_{qeq} + V_{qgn}$

On obtient:

$$\dot{S}(I_q) = -\frac{L_d W_r}{L_q} I_d - \frac{R_S}{L_q} I_q + \frac{W_r \phi_{sf}}{L_q} - \frac{V_{qeq}}{L_q} - \frac{V_{qgn}}{L_q} \quad (\text{III-30})$$

Durant le mode de glissement en régime permanent, nous avons :

$$S(I_q) = 0 \quad \text{ET} \quad \dot{S}(I_q) = 0 \quad (\text{III-31})$$

Avec : $V_{qgn} = 0$

On obtient:

$$V_{qeq} = -R_S I_q + W_r [\phi_{sf} - L_d I_d] \quad (\text{III-32})$$

$$\text{Et} \quad V_{qgn} = K_q \cdot \text{sign}(S(I_q)) \quad (\text{III-33})$$

$$\text{D'où l'expression de } V_{qc} : \quad V_{qc} = V_{qeq} + V_{qgn} \quad (\text{III-34})$$

❖ **La troisième surface** est celle du contrôle du courant I_d . Elle est décrite par :

$$S(I_d) = I_{dref} - I_d \quad (\text{III-35})$$

Dans ce cas nous donnons juste les expressions de :

$$V_{deq} = -R_S I_d + W_r \cdot L_q \cdot I_q \quad (\text{III-36})$$

$$V_{dgn} = K_d \cdot \text{sign}(S(I_d)) \quad (\text{III-37})$$

$$V_{dc} = V_{deq} + V_{dgn} \quad (\text{III-38})$$

La stabilité du système nécessite de vérifier que le produit de la surface et sa dérivée est inférieur ou égal à zéro. Afin d'assurer cette condition, les paramètres, K_v , K_d et K_q sont toujours positifs.

Ces paramètres sont choisis de façon à :

- ✚ assurer la rapidité de la convergence,
- ✚ imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement,
- ✚ limiter le courant à une valeur admissible pour un couple maximal.

Dans le régime permanent, on a :

$$\dot{I}_d = 0, \quad \dot{I}_q = 0, \quad \dot{\Omega} = 0 \quad (\text{III-39})$$

III.11 Résultats de Simulation :

Dans cette partie nous allons simuler la génératrice synchrone à aimants permanents utilisée avec la turbine dans la chaîne globale proposée pour la conversion de l'énergie éolienne.

La GSAP sera simulée sur deux cas différents, GSAP fonctionnant à vide et en charge, alors que trois modèles d'optimisation de puissance dans le cas de la turbine, ont été réalisés et comparés dont, le premier a été basé sur l'estimation de la vitesse du vent, tandis que, dans les deux autres, nous avons utilisé deux correcteurs différents dans les boucles de régulation de vitesse.

III.11.1. GSAP à vide :

Les courants sont nuls donc :

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = 0 \end{cases} \tag{III-40}$$

Les expressions des tensions et couple deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega\psi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \tag{III-41}$$

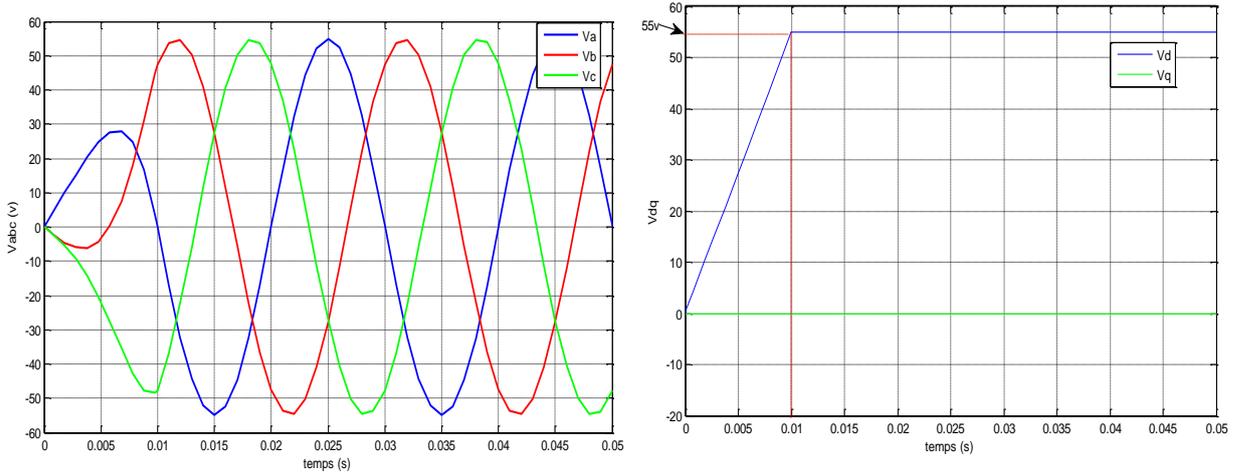
On fait lancer la génératrice par un couple moteur égale à 6.28Nm pour une durée de 10(ms), puis, on la laisse tourner librement. Etant donné que le frottement considéré dans ce cas est nul, on constate sur la figure (III-8) que la vitesse est stabilisée à une valeur de 78.5 (rad/s), alors que les tensions des phases sont parfaitement sinusoïdales en régime stable, avec une valeur crête de 55(V) et une fréquence de 50(HZ).

III.10.2 GSAP en Charge :

La génératrice alimente dans ce cas une charge électrique (Rch, Lch).

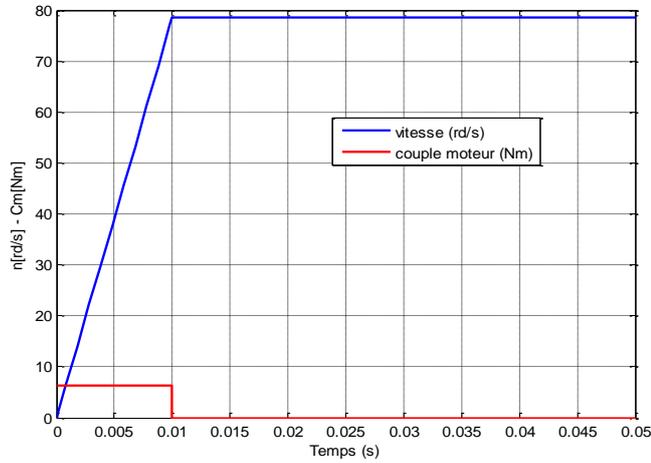
Pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice, on applique les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega\psi_f \end{cases}$$



a): tensions statoriques

b): Composantes V_d et V_q



c): vitesse de rotation et couple moteur

Figure III.8: GSAP à vide.

D'autre part, l'application des tensions V_d et V_q sur la charge donne :

$$\begin{cases} V_d = -R_{ch}I_d - L_{ch} \frac{d}{dt} I_d + \omega L_{ch} I_q \\ V_q = -R_{ch}I_q - L_{ch} \frac{d}{dt} I_q - \omega L_{ch} I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (III-42)$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans (III.10), on aura le système suivant :

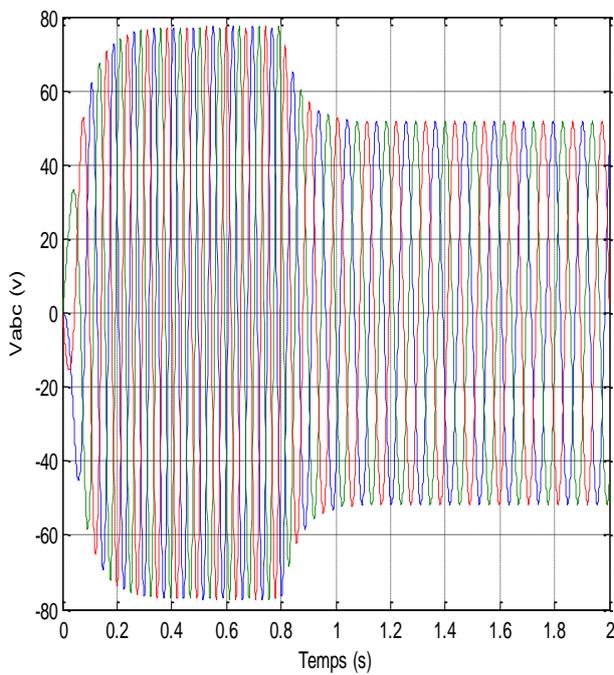
$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})I_d - (L_d + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})I_q - (L_q + L_{ch}) \frac{d}{dt} I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (III-43)$$

En introduisant la transformée de Laplace dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

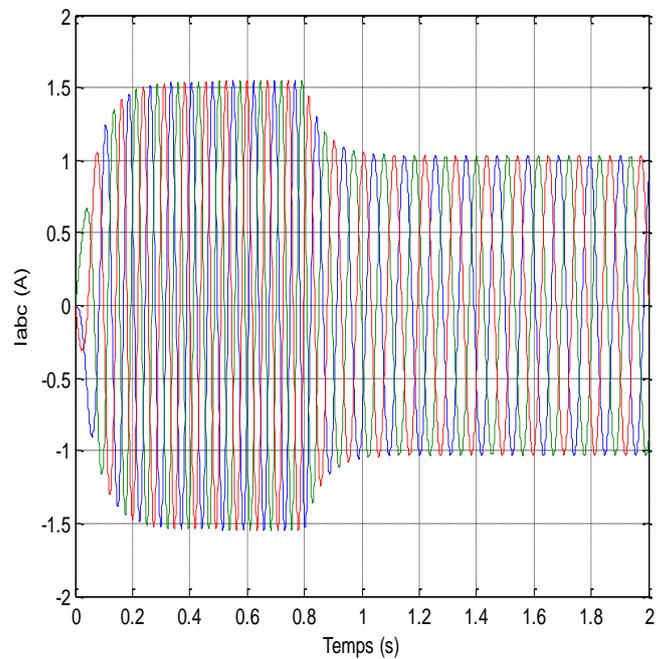
$$\begin{cases} SI_d = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_d + \omega(L_q + L_{ch})I_q] \\ SI_q = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})I_q - \omega(L_d + L_{ch})I_d + \omega \psi_f] \end{cases} \quad (III-44)$$

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

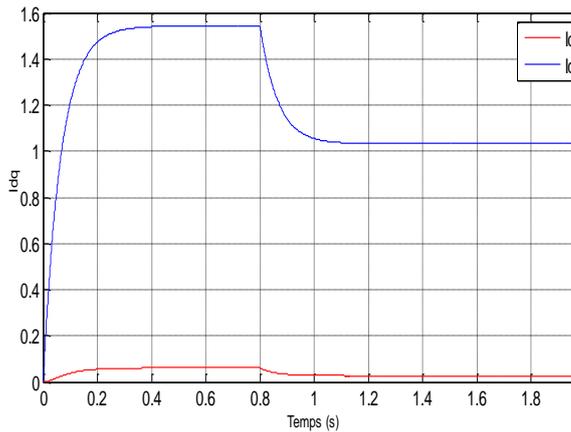
Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la génératrice en fonction de la puissance mécanique fournie, deux couples moteurs différents sont appliqués (Figure III-9-e). On constate sur la figure (III-9-f) que la vitesse de la génératrice est faible et loin de celle de synchronisme, ce qui traduit par des faibles fréquences de tension et courant représentés sur les figures (III-9-a), et (III-9-b). Ceci est expliqué par le fait que le couple moteur appliqué est insuffisant. En diminuant le couple moteur de 6.28 (Nm), à 4.2 (Nm), la vitesse mécanique varie de 277(tr/mn) jusqu'à 185(tr/mn). La tension et le courant diminuent respectivement de 77.17 (V), à 51.6 (V), et de 1.54 (A), à 1.03 (A). Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie



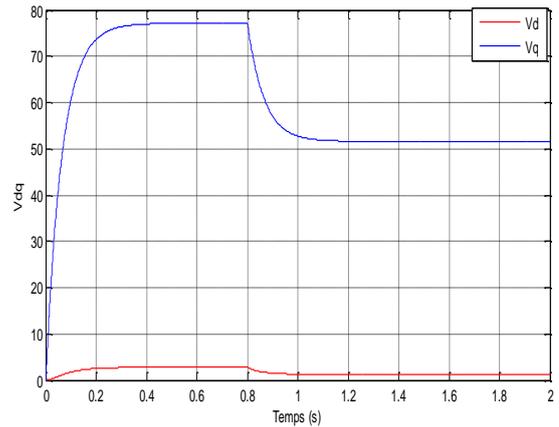
a): Tensions statoriques



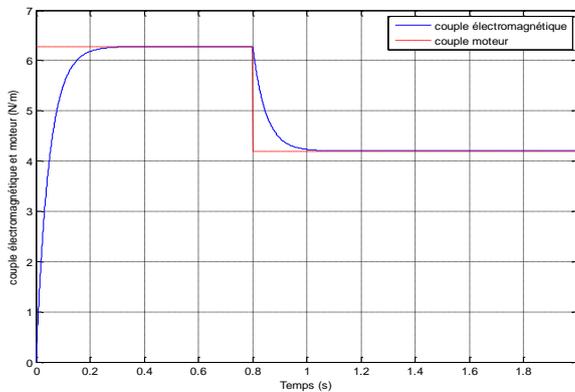
b): Courants statoriques Iabc



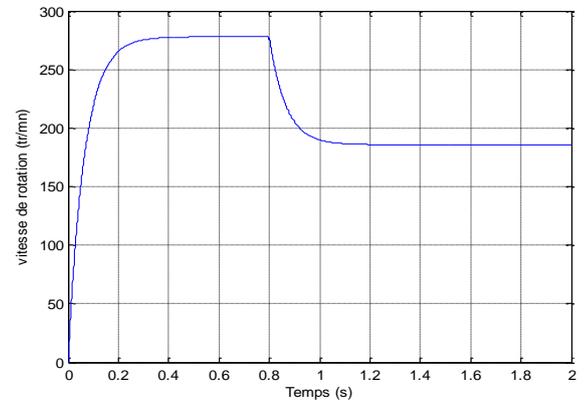
c) : Composantes Id Iq



d): Composantes Vd Vq



e): Couples électromagnétique et moteur



f): vitesse de rotation

Figure III-9: GSAP sur une charge séparée.

III.11.3 La turbine

A) Conception du correcteur de vitesse de la turbine

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

Deux correcteurs ont été utilisés dans le développement du modèle, un correcteur Proportionnel Intégral (PI), et un correcteur Mode Glissant.

B) Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse de la turbine

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons : L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui errone la lecture de la

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

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [29].

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

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (III-45)$$

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

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (III-46)$$

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

$$C_{em_ref} = \frac{C_{aer_estimé}}{G} \quad (III-47)$$

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

$$C_{aer_estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine_estimé}} \cdot v_{estimé}^3 \quad (III-48)$$

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

$$\Omega_{turbine_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III-49)$$

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

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (III-50)$$

En utilisant les formules du (III-15), au (III-18), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em_ref} = \frac{C_p}{\lambda^3 G^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \Omega_{mec}^2 \quad (III-51)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur λ_{opt} qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax}

Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{C_{pmax}}{\lambda^3_{opt}} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \tag{III-52}$$

La figure (III-10) montre le profil du vent considéré pour la simulation des différentes stratégies de commande utilisées. La puissance électrique est considérée égale à la puissance électromagnétique en négligeant les pertes électriques, cette puissance est défini par $C_{em} \times \Omega_{mec}$.

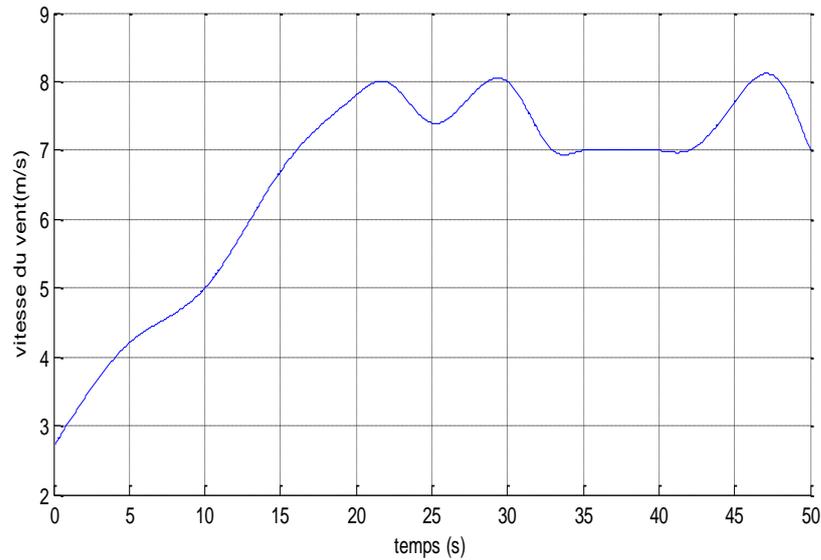
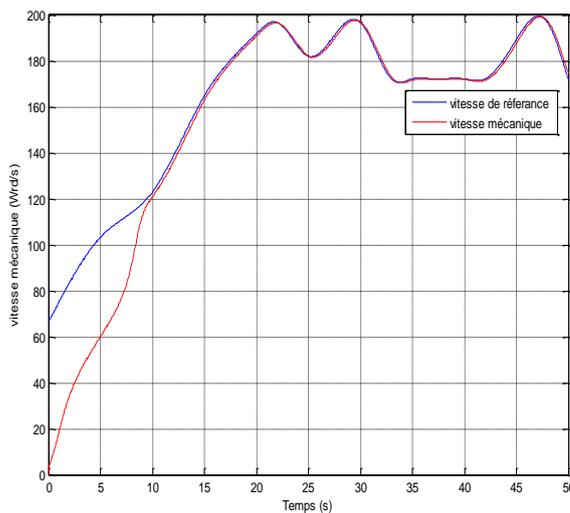
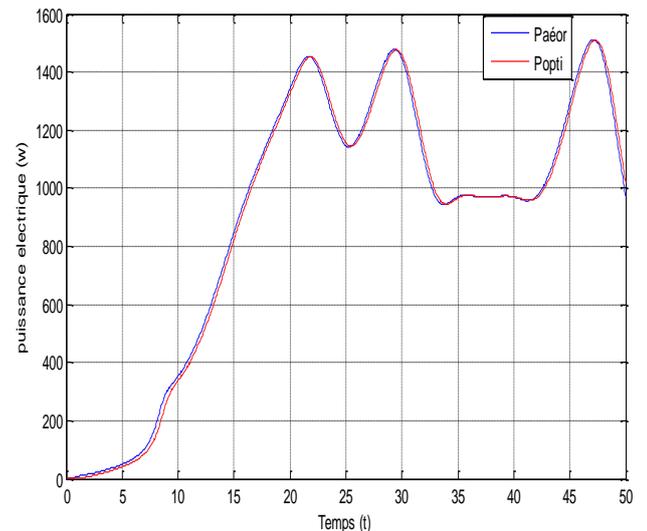


Figure III.10: Profil du vent.

✓ **Résultats de simulation sans asservissement de vitesse**



a) vitesse mécanique



b) puissance électrique

Figure III.11: Résultats de simulation sans asservissement de vitesse.

Ces résultats de simulation montrent bien l'adaptation de vitesse, et en comparant entre la grandeur de référence et la grandeur électrique; une erreur faible qui se manifeste avec les variations de la vitesse du vent.

✓ **Résultats de simulation avec asservissement de vitesse :**

Dans cette partie, on a implanté de la régulation seulement dans la boucle de vitesse.

1- Régulateur PI

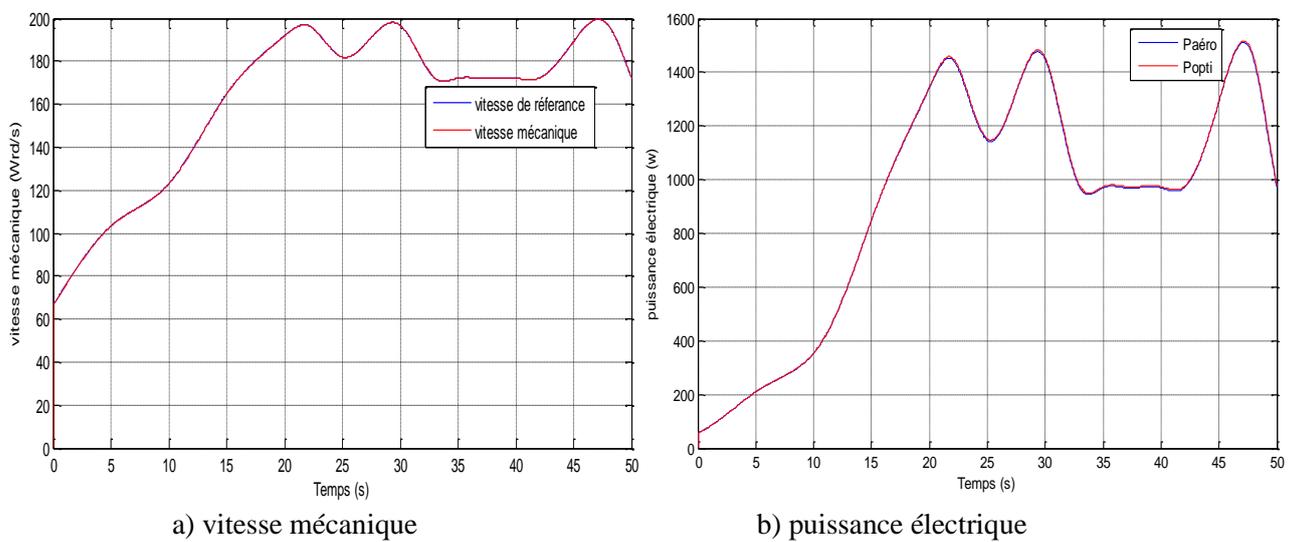
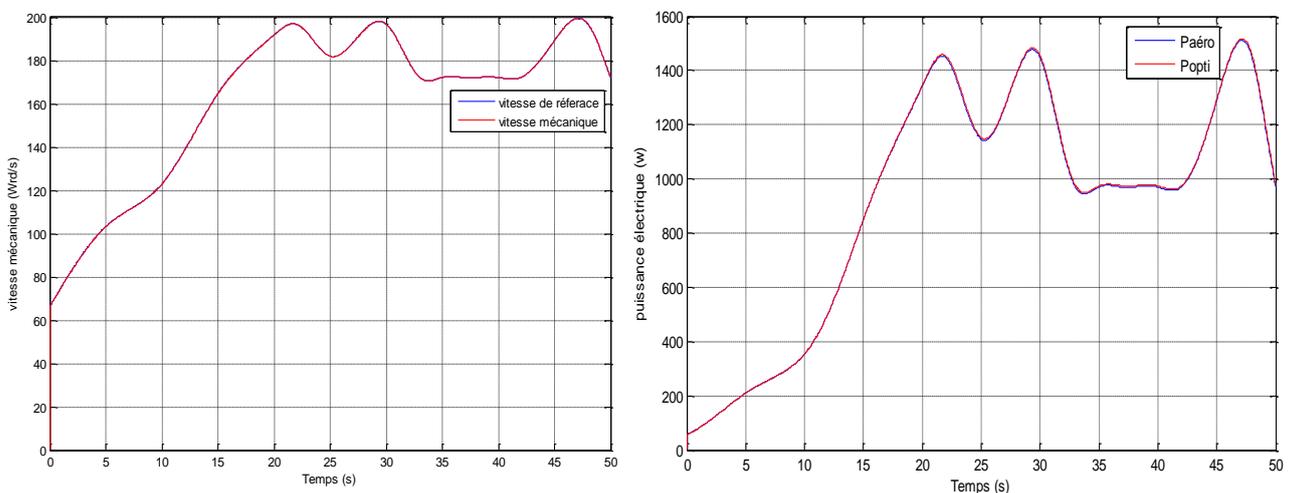


Figure III.12: Résultats de simulation avec régulateur PI.

La figure (III-12-a) montre une légère erreur de vitesse mécanique en régime permanent. La figure (III-12-b) montre que l'erreur obtenue entre la puissance électrique et la puissance de référence est inférieure à celle obtenue dans la stratégie précédente.

2-Régulateur MG



a) vitesse mécanique

b) puissance électrique

Figure III.13 : Résultats de simulation avec régulateur Mode Glissant.

Les résultats de simulation montrent un contrôle très dynamique de vitesse, et l'erreur entre la grandeur de référence et la grandeur électrique obtenue est légèrement inférieure à celle obtenue dans la stratégie précédente (PI).

III.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit en premier lieu les caractéristiques principales de la turbine éolienne après une étude aérodynamique. Trois modèles d'optimisation de puissance ont été réalisés et comparés dont, le premier a été basé sur l'estimation de la vitesse de vent, tandis que, dans les deux autres, nous avons utilisé deux correcteurs différents dans les boucles de régulation de la vitesse mécanique. Les résultats de simulation ont montré la spécificité de chaque stratégie de contrôle

*Conclusion
général*

Conclusion Générale :

Etant donné la tendance de la majorité des pays vers les énergies renouvelables, le gisement éolien présente un potentiel propre et un rendement élevé par rapport à l'énergie solaire, et dans le cadre de la réalisation du mémoire de Master, nous avons choisi de travailler sur le thème de la production et de la conversion de l'énergie éolienne, nous avons pris comme objectif la modélisation des différents composants d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents à vitesses variables, et de concevoir une stratégie de commande permettant de maximiser le rendement aérodynamique..

Le travail présenté dans ce mémoire s'est principalement concentré sur des généralités sur l'énergie éolienne et les différents types d'éoliennes existantes avec leurs différentes structures, à savoir les éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

Afin de comprendre le comportement global du système éolien, nous avons présenté la modélisation du vent et de l'éolienne sur lesquelles s'appuie l'étude.

Nous avons constaté que le modèle triphasé du générateur synchrone à aimant permanent est non linéaire, complexe et fortement couplé. En revanche, l'introduction des transformations triphasées-biphasées de Park a simplifié ce modèle

Nous avons décrit les caractéristiques principales de la turbine éolienne. Ensuite trois modèles d'optimisation de puissance (MPPT) ont été réalisés et comparés dont, le premier a été basé sur l'estimation de la vitesse du vent, tandis que, dans les deux autres, nous avons utilisé deux correcteurs différents dans les boucles de régulation de vitesse; à savoir le régulateur classique PI; et la commande non linéaire par mode glissant. Les résultats de simulation ont montré la spécificité de chaque stratégie de contrôle.

La validation numérique du système étudié a été réalisée par une simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Les résultats des différentes simulations réalisées ont été commentés et ont permis de valider les modèles mathématiques du système proposé.

Suite aux travaux réalisés, on peut proposer quelques perspectives qui peuvent améliorer les performances de la chaîne de conversion proposée :

- Réduire les hypothèses simplificatrices de la turbine
- Intégration des pertes négligées dans cette étude.
- Adaptation du modèle développé et stratégies de contrôle sur des aérogénérateurs de puissances plus importantes.

Références

Bibliographie

Références Bibliographie

- [1] Azzouz Tamarat ,Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie à base d'une MADA , Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra ,08/12/2015
- [2] Jean-Louis Bal, Bernard Chabot, Les énergies renouvelables. État de l'art et perspectives de développement, Article, C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes.
- [3] MABROUK Younes Abdel Badie, BERROUANE Islem Imad eddine, Amélioration de l'énergie produite par un aérogénérateur synchrone à aimants permanents,thèse de Master, Université Ibn Khaldoun Tiaret,2019/2020.
- [4] AKKOUCHE Nabil, OUCHIHA Mohamed, L'investissement dans les energies renouvelables en algerie, thèse de Master, Universite Abderrahmane Mira de Bejaia,2019/2020.
- [5] Kadid Ilyes Lotfi, « modélisation et simulation des différents aérogénérateurs éoliens », thèse de master, Université Djilali Liabes Sidi-Bel-Abbès. 2018.
- [6] Zine Souhila Rached « commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone a aimant permanent », thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. 2016/2017.
- [7] Energie renouvelable <http://www.energie renouvelable. com>.
- [8] A. Graueurs, « Design of direct-driven permanent- magnet generators for wind turbines », Chalors university of technology, school of electrical and computing engineering, technical report, N° 292, Goteborg, Sweden, 1996, doctoral thesis.
- [9] BOUSMAHA Thawriyyaa et TAHIR Zineb, Etude et Simulation d'une ferme éolienne en vue d'une application hybride, thèse de master, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen, 19/06/2016.
- [10] N. Kasbadji Merzouk1 et M. Merzouk, Perspectives du pompage eolien en algerie
- [11] mukund R. patel and omid beik , wind and solar power systems-third edition , livre
- [12] Della mohamed - Dibouche Taha amine - Ahmad mohamed, Production D'énergie Electrique Par Système Eolien, these de technicien supérieur, INSFP Kadda Belkacem – Tiaret, 2018/2021
- [13] Marc Rapin -Jean-Marc Noël, ÉNERGIE EOLIENNE, livre, © Dunod, Paris, 2010 ISBN 978-2-10-055060-9
- [14] Frédéric Poitiers, Etude Et Commande De Generatrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'energie Eolienne, Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DE NANTES, 2003
- [15] O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.
- [16] J.L. Menet, L.-C. Valdès, B. Ménart, "A comparative calculation of the wind turbines capacities on the basis of the L- σ criterion", Renewable Energy 22, 2001, pp. 491-506.
- [17] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [18] DAHBI Abdeldjalil, "Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes", Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas, Setif, 2012.

- [19] par André Cailleux, 'énergie éolienne en France et dans le monde, annales, 74e Année, No. 403 (Mai-Juin 1965), pp. 257-270
- [20] Belabbed Med/ Benyahya Tariq « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents ». Université Dr Tahar Moulay Saida. 2015
- [21] TOUAL Belgacem, Contribution à la Commande et la Gestion des Sources Hybrides d'Énergie Electrique, these Doctorat, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 27-12- 2018
- [22] HERISSI Belgacem, "Commande d'une Eolienne basée sur les modèles flous de TakagiSugeno ", mémoire de master, université larbi tebessi-Tébessa, 2016.
- [23]] Mayouf messaoud, "Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents", université de Batna, 2008.
- [24] BENKHALED Bilal, " Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne", université de m'sila, 2013.
- [25] Hassani Hicham , Belbali Abdelkader, Commande directe de puissance (DPC) de la GSAP intégré dans un système éolien, thèse de master, UNIVERSITE d'ADRAR, 2017.
- [26] HASSINI ABD ELHAKIM, "Comparaison entre les techniques de commande de la puissance de vent dans une éolienne à vitesse variable", Université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016.
- [27] ABDELHADI- Hakim-BAKKI Abdelmadjid, commande d'un système éolien basé sur GASP alimentée par un convertisseur multicellulaire, thèse de master, université ibn khaldoun de tiaret, 2019/2020.
- [28] TAHRI Ahmed, contribution a l'identification et a la commande robuste des génératrices synchrones a aimants permanents associées aux générateurs éoliens, Mémoire de doctorat (L.M.D), Université ibn khaldoun de Tiaret (2018) .
- [29] MANSOURI Mohamed, commande d'une génératrice synchrone a aimant permanents dédiée a la conversion de l'énergie éolienne, Mémoire de doctorat (L.M.D), université de IBN KHALDOUN Tiaret, (2020) .
- [30] TEBBAL Abderezzak - SEKHRI Miloud, Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent, Université Mohammed Seddik Benyahia de Jijel, thèse de master, 2019.
- [31] L. Leclercq. « Apport du stockage inertiel associe a des éoliennes dans un reseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ». These de doctorat, Laboratoire.
- [32] Samir, "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA". Thèse de Magister. Promotion 2009. École nationale supérieure polytechnique d'Alger « Département de Génie Électrique » Laboratoire de Recherche en Électrotechnique. Algeria.
- [33] Sadek Ameziane-Said Drid-Tarek Boutabba, Implantation Expérimentale D'un M.P.P.T Pour Un Systeme De Generation Eolienne A Axe Horizontal, Article, Laboratoire LSPIE- Université de Batna, 12/04/2010.
- [34] Belgharbi Nour el Houda Toriki- BELKAIM Hanane , Observation de la GSAP en vue de sa commande vectorielle dans un système de conversion d'énergie éolienne, thèse de master, Université Ibn-Khaldoun De Tiaret, 2019/2020.
- [35] S. El Hani et S. Guedira. Commande d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimant permanent avec convertisseur complet. Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°4 (2014) 507 – 5186.

- [36] Ion boldea, SYNCHRONOUS GENERATORS-second edition, livre, University Politehnica Timisoara Timisoara, Romani, 2016.
- [37] F. Kendouli « Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique », thèse de doctorat, en Sciences en Electrotechnique.
- [38] Allali Loubna, Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents, thèse de master, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI, 2015-2016.
- [39] A. Houssem et A. wafaa « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour un entraînement électrique à vitesse variable basé sur un moteur synchrone à aimants permanents » Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen.
- [40] Mazouz Fares, Korichi Mohand, « modélisation et commande d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents », mémoire de master, université A, Mira, Bejaia. 2019.
- [41] Thierry Lubin, Modélisation et commande de la machine synchrone à réluctance variable: prise en compte de la saturation magnétique, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, 2003.
- [42]] B. N. Mobarkah, " Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres ", thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001.
- [43] K.J. Åström, T. Hägglund, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning" Instrument Society of America, 2nd edition, ISBN 1-55617-516-7. (1995).
- [44]] M. Rabia Benayache, 'Contribution `a la commande robuste des systèmes non linéaires incertains: application à un système hydraulique', thèse de doctorat .Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis France.
- [45] Mohammed Chakib Sosse Alaoui, 'Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur', Thèse de doctorat. Université Sidi Mohammed Ben Abdallah.
- [46] TALHAOUI Hicham, Contrôle par mode glissant: Observation et estimation paramétrique d'une machine à induction avec défauts, thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 28/01/2016.
- [47] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones modèles et outils Paramétriques dédiés à la simulation et à la détection de défauts", thèse de doctorat, université de Nantes 1999.
- [48] Adile Yahdou, commande et observation par modes glissants d'une machine asynchrone double étoile sans capteur mécanique , thèse de magister , université Hassiba Benbouali de chlef , 2011.
- [49] H. Buhler, "Réglage par mode de glissement", Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, Suisse, 1986.
- [50] SAIBI Hayat- KASSOURI Dalila, Commande par mode glissant d'ordre fractionnaire d'un réseau électrique, thèse de master, Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou, 21/06/2018.
- [51] ARDJOUN Sid Ahmed El Mahdi « Commande en vitesse par mode glissant d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation », magister en Electrotechnique, université Djillali Liabes de SIDI-BEL-ABBES, 2010.
- [52] Amar si Amour, Contribution de la commande par modes glissants d'ordre fractionnaire, Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri. Tizi-Ouzou, 2011.
- [53] B. Benazza, « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse », Mémoire De Magistère En Electrotechnique, Université Djillali Liabes De Sidi

BelAbbès, Algérie, 2008.

[54] S.V. Emilyanov, «Sliding mode control systems», Nauka, Moscow, 1967

[55] V.I.Utkin, «Variable structure systems with sliding mode», IEEE.TAC, Vol. AC-22, N°2, p.212-222, 1977.

[56] H.Tamrbed et T.Azarobr « Réglage par mode glissant d'un machine asynchrone » proceedings de la conférence CEE'00, pp.136-141, 2000. V.I.Utkin, «Variable structure systems with sliding mode», IEEE.TAC, Vol. AC-22, N°2, p.212-222, 1977.

[57] Zouaoui Yamina, Commande par mode glissant des courants statoriques de la machine asynchrone statoriques de la machine asynchrone, thèse de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF, 03 / 03 / 2010.

[58] A. Dechoucha « Commande par Mode de Glissement par Imposition des Pôles d'une Machine à Induction Linéarisée par orientation du Flux » IEEE Trans. Indust. Applic. Vol.40, N° .1, pp45-55, 2005.

Résumé

L'objectif de ce travail est de contrôler une éolienne basée sur un générateur synchrone à aimants permanents GSAP. Les généralités des éoliennes, les différentes structures d'alimentation, le type de générateurs utilisés ainsi que la modélisation sont présentés.

Trois modèles d'optimisation de puissance (MPPT) ont été réalisés et comparés dont, le premier a été basé sur l'estimation de la vitesse du vent, tandis que, dans les deux autres, nous avons utilisé deux correcteurs différents dans les boucles de régulation de vitesse; à savoir le régulateur classique PI; et la commande non linéaire par mode glissant. Les résultats de simulation ont montré la spécificité de chaque stratégie de contrôle.

Mots clés : Eolienne, GSAP, MPPT, régulateur PI, mode glissant.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو التحكم في توربينات الرياح على أساس مولد متزامن مغناطيسي دائم GSAP. تم تقديم العموميات لتوربينات الرياح، هياكل الطاقة المختلفة، نوع المولدات المستخدمة بالإضافة إلى النمذجة. تم تنفيذ ومقارنة ثلاثة نماذج لتحسين القدرة (MPPT)، كان أولها يعتمد على تقدير سرعة الرياح، بينما في النموذجين الآخرين استخدمنا مصححين مختلفين في حلقات التحكم في السرعة. وهي منظم PI الكلاسيكي؛ والتحكم في وضع الانزلاق غير الخطي. أظهرت نتائج المحاكاة فعالية كل استراتيجية تحكم.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح، GSAP، MPPT، منظم PI، الوضع الانزلاقي.

Abstract

The objective of this work is to control a wind turbine based on a GSAP permanent magnet synchronous generator. The generalities of wind turbines, the different power structures, the type of generators used as well as the modeling are presented.

Three power optimization models (MPPT) were carried out and compared, the first of which was based on the estimation of the wind speed, while in the other we used two different correctors in the control loops. speed regulation; namely the classic PI regulator; and nonlinear sliding mode control. The simulation results showed the specificity of each control strategy.

Keywords: Wind turbine, GSAP, MPPT, PI regulator, sliding mode

Annexes

ANNEXE A : Paramètres de simulation

<i>Élément de la chaîne de Conversion éolienne</i>	<i>Valeur numérique</i>	<i>Signification</i>
<i>Turbine éolienne</i>	$\rho=1.08$	Masse volumique de l'air (Kg/m^3)
	$R= 1.525$	Rayon de l'éolienne (m)
	$G=5$	Gain du multiplicateur de vitesse
	$\Omega_0=20$	Vitesse initiale (rd/s)
<i>Génératrice synchrone A aimants permanents</i>	$P=1$	Puissance nominale (Kw)
	$R_s= 1.137$	Résistance statorique (Ω)
	$L_d=0.012$	Inductance statorique selon l'axe d (H)
	$L_q=0.012$	Inductance statorique selon l'axe q (H)
	$\psi_f=0.175$	Flux des aimants permanents (Wb)
	$P=3$	Nombre de paires de pôles
	$J=0.0141$	Inertie de l'ensemble turbine et génératrice ($Kg.m^2$)

Vitesse du vent est variable : on a utilisé un relevé expérimental pris à partir d'une référence.

C_p est linéaire (polynomial) :

$$C_p = 0.043 - 0.108 * \lambda + 0.146 * \lambda^2 - 0.0602 * \lambda^3 + 0.0104 * \lambda^4 - 0.0006 * \lambda^5$$

Dédicace

*Je dédie ce travail spécialement a ma chère mère
B.REKIA et mon chère père DJILALI qui sont la source
de ma vie .*

*Et ma très chère sœur FATIMA et mes frères
ABDELLAH ,ILYES ,et YASER.*

un spéciale dédicace à ASSIA et AMINA .

A mon cher ami Fouad et Amine et Ayad djamel.

Et a toute ma famille et toute mes amis.