

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :
Énergies Renouvelables
Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

ETUDE ET MODELISATION D'UNE CHAÎNE EOLIENNE A BASE D'UNE MACHINE SYNCHRONNE A AIMANTS PERMANANTS (MSAP)

Présenté par :

- Boubekour Asmaa
- Boukourdane Randa

Soutenu le : 09 /06/2020 devant le Jury :

M. TAIBI Ibrahim	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
M. HABCHI Yassine	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. BRAHIMI Mohammed	MCB	Centre Universitaire Naâma	Co-Encadreur
M. BEN MOHAMED Faycal	MCB	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Remerciement

Au moment d'écrire les dernières lignes de cette mémoire

Avant tous nous aimons tous notre gratitude vers Allah celui qui nous a donné les capacités d'accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier :

Nos parents, qui nous ont aidé et soutenu soit par leurs conseil, leur encouragement tant sur le problème moral, affectif ainsi que financier.

Nos tiens à remercier spécialement nos encadreur de mémoire :

M.HABCHI Yassine, maître de conférences classe B au centre universitaire SALHI AHMED de Naama pour avoir bien assuré la direction et l'encadrement de nos travaux. Merci pour sa gentillesse, sa patience et ses précieux conseils. Et pour avoir cru en nos capacités,

Nos tiens à remercier M.BRAHIMI Mohammed, maître de conférence classe B au centre universitaire SALHI AHMED de Naama pour le temps et la patience qu'il nous a accordés toutes ces années.

Nous également remercier Monsieur le chef du Département de sciences et technologies au centre Universitaire SALHI AHMED de Naama

Nos enseignants qui nous ont enseignés durant notre formation, ainsi que l'équipe du personnel de centre universitaire, et qui par leur aimable état de compréhension et leur longue patience nous ont facilité à terminer notre travail dans les délais.

Et en fin, toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

DEDICACE:

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A cette formidable Maman qui a toujours cru en mes capacités et qui était toujours là pour me remettre sur rails lors des moments les plus difficiles

A mon père pour ses soutiens multiples et ses encouragements sans limites.

A mes chères sœurs SAMAH ET IMANE pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mon cher frère, ABD ELLATIF pour leur appui et leur encouragement,

*A Mon cher neveu : **Iyade***

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

Merci d'être toujours là pour moi.

Boubekeur Asmaa

DEDICACE

Je dédie ce mémoire aux personnes qui chers et qui m'ont soutenu tout au long des épreuves, je cite particulièrement :

Mes chères Parents qui m'on soutenu pendant toute la durée de ces longues études

Pour leur soutien moral

Pour tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts.

« Que dieux me les protègent »

Mes sœurs :

Fatima, Ikram, Nada et Nesrine

Mes Nièces :

**Ismahane Tesnime, Rihame et Khadouje,
Fawzi, Israe et Maisaa**

Ma grande mère

Mon fiancé et toute sa famille. Surtout « Doha & Mohammed »

À tous les membres de ma famille sans aucune exception.

À tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

À tous ceux qui me sont chers.

Boukourdane Randa

Résumé

Les énergies renouvelables est une solution alternative permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus dépourvu de tout apport énergétique, parmi ces énergies renouvelables est l'énergie éolienne.

L'objectif de ce mémoire est l'étude de simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne en énergie électrique à l'aide d'un générateur synchrone à aimant permanent destiné à un site isolé. Tout d'abord, présenté un modèle pour chaque composant de la chaîne de conversion, puis les différents composants de cette chaîne sont connectés ensemble pour former le modèle complet implémenté dans l'environnement Matlab.

Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink ont été donnés afin de prouver la validité de modèle proposés pour un aérogénérateur basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent(GSAP).

Mots clés

Energie éolienne ; Energies renouvelables ; Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP).

Abstract

Renewable energies is an alternative solution allowing a decentralized production of electricity, can help to solve the problem of electrification of isolated sites where a large number of individuals deprived of any energy supply, among these renewable energies is energy wind turbine.

The objective of this memory is the simulation study of a chain of conversion of wind energy into electrical energy using a permanent magnet synchronous generator intended for an isolated site. First, presented a model for each component of the conversion chain, then the different components of this chain is connected together to form the complete model implemented in the Matlab.

The simulation results under Matlab / Simulink were given in order to prove the validity of the model proposed for an aerogenerator based on a Permanent magnet synchronous generator (PMSG).

Key words:

Wind energy; Renewable energy; Synchronous permanent magnet generator (PM).

ملخص

الطاقات المتجددة هي حل بديل يسمح بإنتاج الكهرباء، بحيث يمكن أن تساعد في حل مشكلة تزويد المواقع المعزولة بالكهرباء فهناك عدد كبير من الأفراد المحرومين من أي مصدر للطاقة، ومن بين هذه الطاقات المتجددة الأكثر شيوعاً الطاقة الهوائية.

الهدف من هذه المذكرة هو دراسة محاكاة سلسلة تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية باستخدام مولد متزامن بمغناطيس دائم مخصص لموقع معزول. أولاً، يتم تقديم نموذج لكل عنصر من عناصر سلسلة التحويل و يتم بعد ذلك توصيل المكونات المختلفة لهذه السلسلة معاً لتشكيل النموذج الكامل الذي يتم تنفيذه في بيئة الماتلاب .

أعطيت نتائج المحاكاة في (Matlab/Simulink) لإثبات صحة النموذج المقترح لمولد هوائي على أساس مولد متزامن مع مغناطيس دائم (GSAP).

كلمات مفتاحية

طاقة الرياح؛ الطاقات المتجددة؛ مولد مغناطيسي دائم متزامن (GSAP).

Table des matières

Table des matières

Remerciement	ii
Dédicace	iii
Résumé.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	vii
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Généralité sur le système à énergie éolienne	
I.1.Introduction.....	04
I.2. Les sources d'énergie renouvelable.....	04
I.2.1. Énergiesolaire.....	05
I.2.2. Énergie hydraulique.....	05
I.2.3. Énergie géothermique.....	06
I.2.4. Énergie biomasse.....	06
I.2.5. L'énergie éolienne.....	07
I.3. Historique.....	08
I.4. Production mondiale d'énergie éolienne.....	10
I.4.1. Production optimale d'un système éolienne.....	11
I.4.2. Potentiel éolien en Algérie	11
I.5. Aspects Economiques de l'Eolienne.....	14
I.6. Impacts Environnementaux des éoliennes.....	14
I.7.Un système éolien.....	16
I.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	16
I.9 Eoliennes à vitesse fixe et variable.....	17
I.9.1 Eolienne à vitesse fixe	17
I.9.2 Eolienne à vitesse variable.....	17
I.10. Les différents types d'éoliennes.....	18
I.10.1. Eoliennes à axe vertical.....	18
I.10.1.1. Les éoliennes à axe vertical de type Savonius.....	18
I.10.1.2. Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus.....	19
I.10.2. Eoliennes à axe horizontal.....	19

I.11. Modélisation d'une chaîne éolienne.....	24
I.11.1. Le vent.....	25
I.11.2. Eolienne tripale.....	25
I.11.2.1. Modèle de la Turbine.....	26
I.11.2.2. Modèle de l'arbre.....	28
I.12. Stockage de l'énergie éolienne.....	29
I.12.1. Stockage par batteries.....	29
I.13. Avantages et inconvénients.....	30
I.13.1. Avantages.....	30
I.13.2. Inconvénients.....	30
I.14. Conclusion.....	31

Chapitre II : Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

II.1. introduction	33
II.2. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP).....	33
II.2.1. Principe de fonctionnement de la MSAP.....	33
II.2.2. Différentes structures de machines à aimants permanent.....	34
II.2.2.1. Structures à flux radial (RFPM).....	34
II.2.2.2. Structures à flux axial (AFPM).....	37
II.2.3. Les domaines d'application de MSAP.....	39
II.2.4. Avantages de la MSAP.....	39
II.2.5. Inconvénients de la MSAP.....	39
II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	40
II.3.1. Les hypothèses simplificatrices.....	40
II.3.2. Equations de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel (a,b,c)	40
II.3.3. Equations de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel de Park(d , q).....	41
II.3.4. Expressions du couple électromagnétique.....	44
II.3.5. Circuit équivalent de la MSAP.....	44
II.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en convention génératrice.....	44
II.4.1. Modélisation à vide de la GSAP.....	45

II.4.2. Modélisation en charge de la GSAP.....	45
II.5. Conclusion.....	47

Chapitre III Simulation d'une chaine de conversion éolienne

III.1.Introduction.....	49
III.2.Simulation de la chaine de conversion	49
III.3.Résultats de simulation.....	50
III.3.1.Résultats de simulation de la chaine de conversion éolienne à vitesse fixe	50
III.3.2.Résultats de simulation de la chaine de conversion éolienne à vitesse variable	55
III.3.3. Résultats de simulation de la chaine de conversion éolienne à vitesse aléatoire.....	59
III.4. conclusion.....	63

Liste des figures

Liste des Figures

Figures de chapitre I

Figure I.1 : Les sources d'énergie renouvelable	04
Figure I.2 : Énergie solaire	05
Figure I.3 : Schéma de principe de l'énergie hydraulique.....	05
Figure I.4 :L'énergie géothermique.....	06
Figure I.5 : Schéma de principe d'une usine biomasse	07
Figure I.6 : L'énergie éolienne	07
Figure I.7 : L'énergie éolienne entre le passé et le futur	09
Figure I.8 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW	10
Figure I.9 : Carte du potentiel éolien en Algérie	12
Figure I.10 : La première ferme éolienne en Algérie	13
Figure I.11: La vitesse moyenne du vent en Algérie.....	14
Figure I.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique	16
Figure I.13: Principe de la conversion d'énergie éolienne.....	17
Figure I.14 : L'éolienne à axe vertical de type Savonius.....	19
Figure I.15 : L'éolienne à axe vertical de type Darrieus.....	19
Figure I.16: Différentes parties d'une éolienne à axe horizontal.....	20
Figure I.17 : Tour éolienne et ses composants électroniques à l'intérieur.....	21
Figure I.18 : Pales d'une éolienne.....	22
Figure I.19 : Le rotor	22
Figure I.20: La nacelle éolienne.....	23
Figure I.21: Eléments d'une nacelle éolienne.....	24
Figure I.22: La partie mécanique d'une éolienne tripale.....	25
Figure I.23: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ	28
Figure I.24 : Stockage d'énergie éolienne par Batterie.....	29

Figures de chapitre II

Figure II.1 : Vue schématique des machines.....	34
Figure II.2 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe.....	35
Figure II.3 : Structure à aimant en surface	35
Figure II.4 : Structure à aimants encastrés	36
Figure II.5: Structure à aimants enterrés	37
Figure II.6 : Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.....	38
Figure II.7 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator.....	38
Figure II.8 : Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor	38
Figure II.9: Représentation d'une MSAP dans le repère (abc).....	40
Figure II.10 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.....	42
Figure II.11: Circuit équivalent de la MSAP.....	44

Figures de chapitre III

Figure III.1 :Bloc de simulation de l'association Turbine GSAP avec la charge	49
Figure III.2 : Simulation de la partie mécanique à vitesse fixe.....	51
Figure III.3: Simulation de la partie électrique à vitesse fixe.....	54
Figure III.4 : Simulation de la partie mécanique à vitesse variable	56
Figure III.5 : Simulation de la partie électrique à vitesse variable.....	58
Figure III.6 : Simulation de la partie mécanique à vitesse aléatoire.....	60
Figure III.7 : Simulation de la partie électrique à vitesse aléatoire.....	62

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableaux de chapitre I

Tableau I.1 : Comparaison des émissions des centrales à charbon et à gaz avec les centrales éoliennes.....	15
---	----

Liste des Symboles et Notations

Symboles

Symboles spécifiques à la turbine :

p_v	(W)	Puissance cinétique du vent
C_p	(-)	Coefficient de puissance aérodynamique
ρ	(Kg/ m ³)	Masse volumique de l'air
m	(Kg)	Masse de l'air
S	(m ²)	Surface circulaire balayée par la turbine $S = \pi.R^2$
v	(m/s)	Vitesse du vent
R	(m)	Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne)
p_D	(W)	Puissance aérodynamique de la turbine
β	(deg)	Angle de calage des pales
λ	(-)	Vitesse relative ou Ratio de vitesse
λ_{opt}	(-)	Vitesse relative optimale
$C_{p_{max}}$	(-)	Le coefficient de puissance maximum
Ω_t	(rad/s)	Vitesse mécanique de la turbine
C_t	(N.m)	Couple mécanique disponible sur l'arbre la turbine
C_c	(N.m)	Le coefficient de couple
C_g	(N.m)	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice
C_f	(N.m)	Couple de frottement visqueux
Ω_g	(rad/s)	Vitesse mécanique de la génératrice
f_m	(N.m./rad)	Coefficient dû frottements visqueux de la génératrice
J	(Kg.m ²)	Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice»
J_t	(Kg.m ²)	L'inertie de la turbine

Liste des Symboles et Notations

J_m	(Kg.m ²)	L'inertie de la génératrice
f_t	(N.m/rad)	Le coefficient de frottements visqueux de la turbine
ω_v	(rad/s)	La pulsation propre
t	(s)	Le temps(s)

Symboles spécifiques à la modélisation de la MSAP :

C_{em}	(N.m)	Couple électromagnétique de la génératrice
φ_{abc}	(Wb)	Les vecteurs flux statorique des phases a,b et c
V_{abc}	(V)	Les tensions des phases statoriques
i_{abc}	(A)	Les courants des phases statoriques
(d, q)		L'indice du repère de Park lié au rotor
$P(\theta)$		La matrice de la transformation de Park
$P(\theta)^{-1}$		La matrice inverse de la transformation de Park
(V_d, V_q)	(V)	Les composantes de la tension au stator dans le repère de Park
(φ_d, φ_q)	(Wb)	Les composantes du flux au stator dans le repère de Park
(i_d, i_q)	(A)	Les composantes du courant au stator dans le repère de Park
φ_f	(Wb)	La valeur efficace du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques
R_s	(Ω)	La Résistance d'une phase d'enroulement statorique
θ	(deg)	L'angle de repère de Park
ω	(rad/s)	La vitesse de rotation électrique
L_d	(H)	Inductance statorique sur l'axe d
L_q	(H)	Inductance statorique sur l'axe q

Liste des Symboles et Notations

p	(-)	Nombre de paires de pôles
R_{ch}	(Ω)	La résistance de la charge
L_{ch}	(H)	L'inductance de la charge
P	(W)	Puissance active
Q	(VAR)	Puissance réactive

Notations

MSAP	Machine Synchrone à Aimant Permanent
GSAP	Génératrice Synchrone à Aimant Permanent
RFPM	Radial Flux Permanent Machine
AFPM	Axial Flux Permanent Machine

Introduction générale

Introduction générale

De nos jours, la demande en énergie électrique dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les différentes centrales traditionnelles de production d'électricité (nucléaire, hydraulique, thermique) utilisent des sources fossiles et naturelles telles que : l'uranium, les hydrocarbures et l'eau. Les centrales thermiques sont responsables de rejets des gaz atmosphériques. L'énergie nucléaire présente un avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution, mais le risque d'accident nucléaire demeure. Le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

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

La génération de l'énergie éolienne représente une solution importante qui pourrait mitiger ces problèmes grâce essentiellement à ces impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde [1].

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

Parmi différents types de structures éoliennes, la génératrice synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité

du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique [2].

La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible et de faibles inductances. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes, un rendement meilleur et meilleure contrôlabilité, ce qui fait d'elle une sérieuse concurrente de la machine asynchrone [2].

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à l'étude d'une chaîne complète de conversion d'énergie éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents, Ce mémoire est donc organisé en trois chapitres de la façon suivante :

Le premier chapitre qui traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par quelques statistiques sur la production mondiale et la production des pays considérés comme de grands producteurs, sans oublier de parler du cas algérien. Puis nous allons parler des différents types d'éoliennes existant en abordant leurs différentes structures, leurs fonctionnements. Ce chapitre comporte aussi la modélisation du vent qui est la source principale d'énergie. Ce qui nous permettra d'identifier le profil du vent qui sera utilisé dans le reste du travail. Nous allons ensuite modéliser la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude ; suivi par des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous allons donner quelques généralités sur la machine synchrone et notamment la machine synchrone à aimants permanents. Nous allons ensuite donner des exemples sur des machines différentes du point de vue structurel. Puis nous allons passer aux équations mathématiques et aux calculs permettant de modéliser la machine de notre choix.

Le troisième chapitre, nous établissons un modèle de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne prise en compte la simulation du vent, du comportement aérodynamique de la turbine et du générateur électrique (GSAP), à l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink.

Enfin, nous clôturons ce travail par des références bibliographiques, une conclusion générale et des perspectives pour la continuité future de ce travail.

CHAPITRE I

Généralités sur le système à énergie éolienne

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermique, etc).

Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux.

L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre (elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans) [3].

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par les énergies renouvelables et spécifiquement l'énergie éolienne son historique, la production éolienne et principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons traité la modélisation d'une chaîne éolienne, ainsi que la manière pour stocké cette énergie et finalement leurs avantages et inconvénients.

I.2. Les sources d'énergie renouvelable

Comme leur nom l'indique, il s'agit de sources qui se renouvellent et ne s'épuiseront donc jamais à l'échelle du temps humain !



FIGURE I.1 : Les sources d'énergie renouvelable

Parmi les énergies renouvelables, on distingue:

1.2.1. Énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère [4].



FIGURE I.2 : Énergie solaire

1.2.2. Énergie hydraulique

L'énergie hydroélectrique, ou hydroélectricité, est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc) [5].

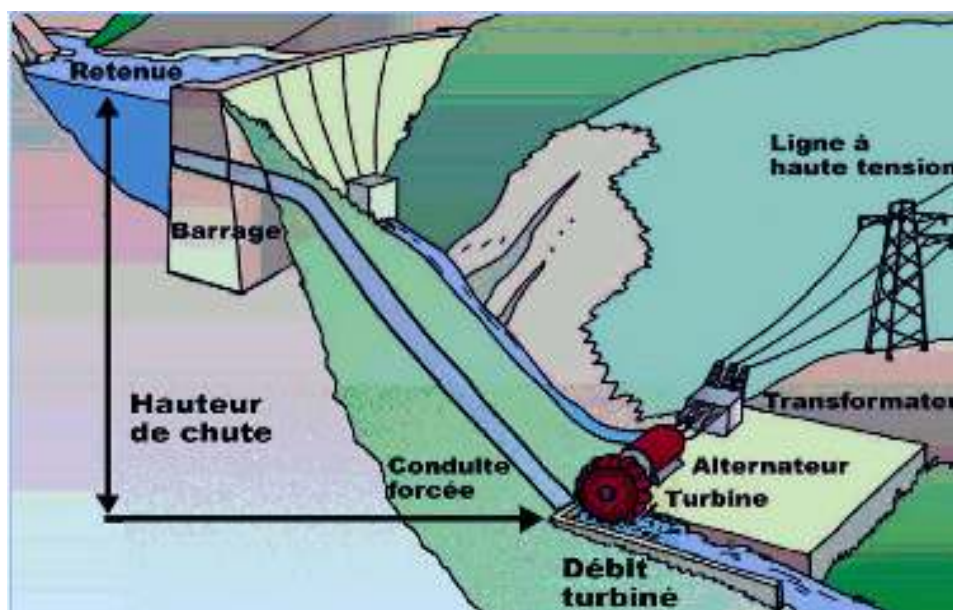


FIGURE I.3 : Schéma de principe de l'énergie hydraulique

1.2.3. Énergie géothermique

L'énergie géothermique utilise la vapeur d'eau ou l'eau chaude présente dans la croûte terrestre pour faire fonctionner des turbines ou pour chauffer des bâtiments ou de l'eau [6].

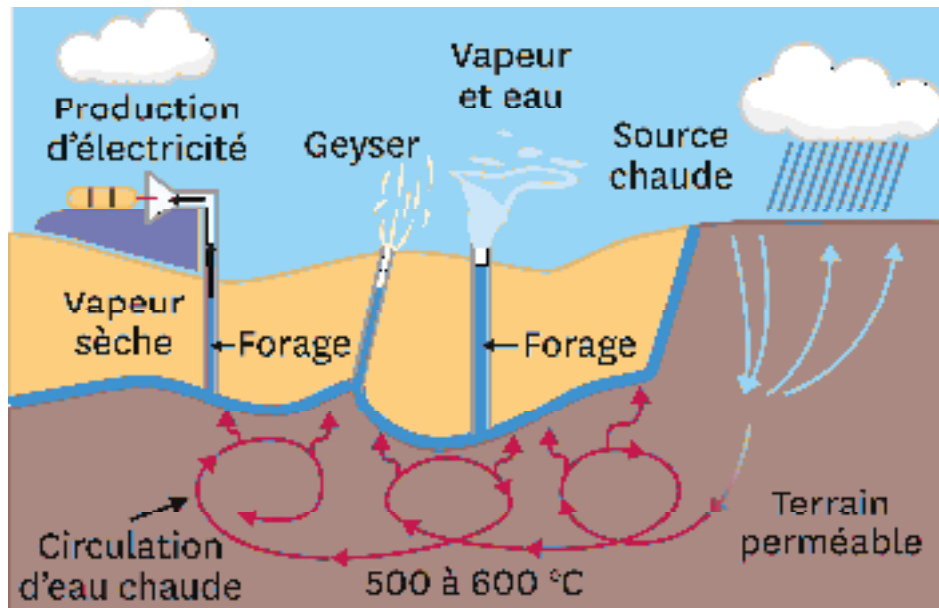
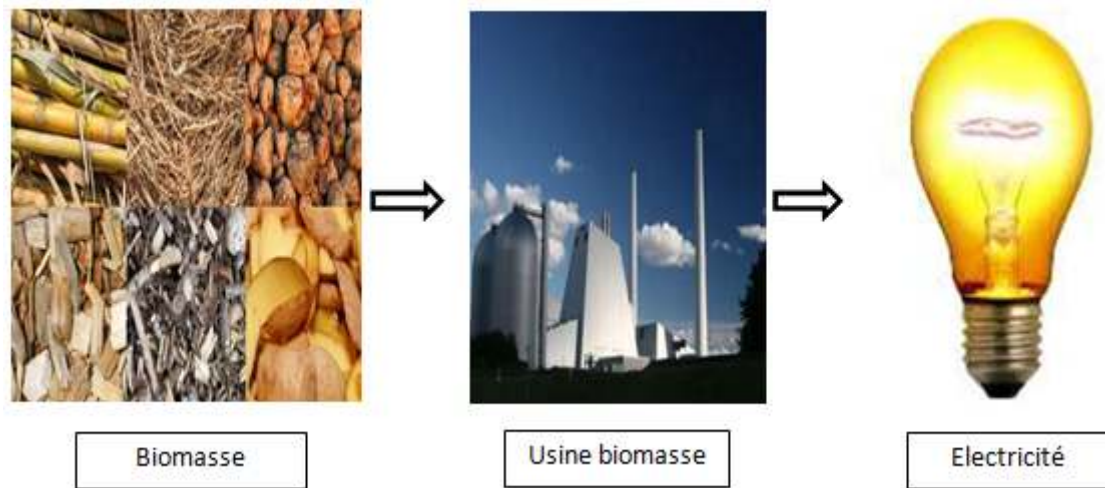


FIGURE I.4 :L'énergie géothermique.

1.2.4. Énergie biomasse

La biomasse représente l'ensemble de la matière organique, qu'elle soit d'origine végétale ou animale. Elle peut être issue de forêts, milieux marins et aquatiques, haies, parcs et jardins, industries générant des coproduits, des déchets organiques ou des effluents [7].

Une centrale biomasse produit de l'électricité grâce à la vapeur d'eau dégagée par la combustion de matières végétales ou animales, qui met en mouvement une turbine reliée à un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif. Un transformateur élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne et haute tension [8].

**FIGURE I.5** : La Biomasse

1.2.5. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne, qui est une partie de l'énergie renouvelable, est une énergie non polluante. Elle constitue un supplément intéressant à l'énergie de base fournie par les centrales thermiques et nucléaires. La consommation d'énergie a montré que la part des énergies renouvelables dans la production mondiale de l'énergie est de 18% seulement, dont 1,8% est produite à partir des éoliennes, mais ce secteur est en plein essor [9].

**FIGURE I.6** : L'énergie éolienne

I.3. Historique

- **VII^e siècle** : Utilisation en Perse (Iran actuel) de roues à énergie éoliennes rudimentaires composées d'une simple tour supportant des pales faites à partir de roseaux attachés en paquets servant à l'irrigation des terres cultivées et pour écraser du grain.
- **XIV^e siècle** : Des améliorations sont apportées progressivement aux moulins à vent européens afin d'augmenter la portance aérodynamique et la vitesse du rotor. Ces améliorations permettent d'obtenir une meilleure mouture et une irrigation plus efficace.
- **Fin des années 1700** : Les moulins à vent sont l'équivalent du moteur électrique de l'Europe préindustrielle. Ils fournissent environ **1 500** mégawatts (un niveau qui n'a été atteint par la suite que vers la fin des années **1980**).
- **1887-1888** : L'américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland, construit la première éolienne entièrement automatisée. Haute de **17** mètres et composée de **144** pales, elle avait une puissance de **12** kW.
- **1890** : La première éolienne dite « industrielle » permettant de générer de l'électricité est mise au point par le Danois Poul La Cour, permettant de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.
- **1930** : Développement de petites éoliennes dans les régions rurales des grandes plaines américaines. D'une puissance de **1 à 3** kW, elles permettaient d'éclairer les fermes et de recharger les batteries des radios à cristal.
- **1955** : En France à Nogent-le-Roi dans la Beauce, une éolienne expérimentale de **800** kVA fonctionne de **1955 à 1963**. Elle avait été conçue par le Bureau d'études scientifiques et techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF.
- **1960** : Ulrich Hutter met au point des plans élaborés de turbines à axe horizontal en Allemagne. Ces turbines sont dotées de pales en fibre de verre et possèdent un angle d'attaque ajustable afin d'en augmenter l'efficacité
- **1971** : Premier parc d'éoliennes en mer au large du Danemark d'une puissance totale de **5** MW

- **1980** : L'état de Californie décide que d'ici l'an **2000**, **10 %** de son alimentation énergétique proviendra de l'énergie éolienne et favorise l'installation de **17 000** éoliennes de **20kW** à **kW** entre **1981 et 1990**.
- **1984** : Projet Éole, la plus grande éolienne de type Darrieus au monde.
- **2004** : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les **39 000 MW**
- **2013** : Le Danemark produit **33,2%** de son électricité grâce aux éoliennes [**10**].
- **2018** : En **2018**, ces parcs (C-Power, Belwind, Northwind, Nobelwind et Rentel) ont produit **3.408** gigawattheures d'électricité, ce qui équivaut à la consommation d'électricité d'environ un million de familles .
- **2019** : La capacité de production totale atteindra alors **1.556 MW**, et la production d'électricité des parcs éoliens s'élèvera à **4.500** gigawatt heures.
- **2020** : les huit parcs éoliens auront une capacité totale de **2.262 MW**. Leur production annuelle devrait atteindre **8 TWh**, soit environ **10%** de la demande totale d'électricité en Belgique [**11**].



FIGURE I.7 : L'énergie éolienne entre le passé et le futur

I.4. Production mondiale d'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et la différence de pression de refroidissement sur les autres, les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

Elle connaît depuis environ **30** ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de **30%** par an. Au début des années **2009**, on estimait de **121** GW la puissance totale installée de l'ensemble des éoliens à travers le monde. Le pays possédant la plus grande puissance éolienne installée était les États-Unis (**25 388** MW) suivi de l'Allemagne (**23 903** MW) et de l'Espagne (**16 740** MW). En puissance éolienne installée par habitant, le Danemark arrive en tête (**600** W par habitant). Les États-Unis arrivaient en **12** position (**89** W/hab) malgré le classement en première position pour la production totale.

A la fin de l'année **2010**, **193** GW d'éoliens sont installés dans le monde. La chine y a investi **63** milliard de dollars et les USA **18** million de dollars. La croissance des investissements dans l'éolien a été de **34%**. Quant à la puissance, elle a augmenté de **22%** (soit **35.8** GW) [14].

En **2016**, la puissance totale d'énergie éolienne installée dans l'Europe des **28** s'élevait à **153** gigawatts, alors qu'en **2011** elle était de **94** GW.

Par ailleurs, l'Union européenne a installé **12,1** GW de puissance supplémentaire en **2016** et en **2020**, s'est fixée comme objectif d'atteindre **20%** d'énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie et **27%** pour **2030** [12].

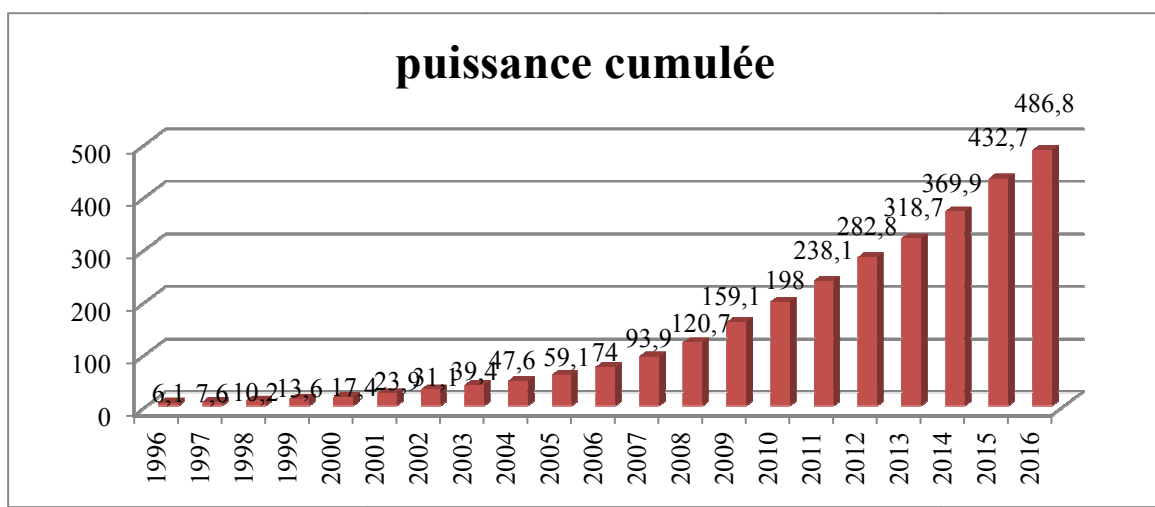


FIGURE I.8 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [13]

1.4.1. Production optimale d'un système éolienne

Une éolienne produit environ **1/5** de sa puissance nominale, c'est à dire qu'une éolienne de **5 MW** produira en réalité l'équivalent d'**1 MW** car elle ne produit pas en permanence.

La mise en exploitation d'une éolienne de **1 MW** permet d'éviter un rejet de **2 000** tonnes de CO₂ par an, en comptant les dépenses d'énergie liées à la construction. Une éolienne de **5 MW** produit **10** millions de kWh. Une éolienne produit en **2 à 3** mois l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication, transports compris.

On distingue deux sortes d'éoliennes :

- Les petites éoliennes ou éolien individuel, dédiées aux particuliers, qui ne sont pas très grandes et produisent peu **[15]** (quelques kW (**0,1 à 20 kW**)), elles sont installées au fond d'un jardin, ou sur le toit d'une maison, elle est équipée d'un rotor à deux ou trois pales, de **2 à 10** m de diamètre, qui tournent entre **10 et 25** tours par minute environ et fonctionne sur le même principe de base qu'un grand aérogénérateur **[15]**.
- Les éoliennes industrielles, qui produisent beaucoup d'énergie (**100 kW** jusqu'à **4 MW**, certaines éoliennes très récentes peuvent même aller jusqu'à **5MW**. En moyenne, elles développent une puissance de **1,5MW**.), qui mesurent parfois plus de **120 m** et qui coûtent très cher. Le diamètre de leur rotor peut atteindre **100 m**. On les trouve généralement par groupes : on parle alors de fermes éoliennes ou de parcs éolien **[12-16]**.

1.4.2. Potentiel éolien en Algérie

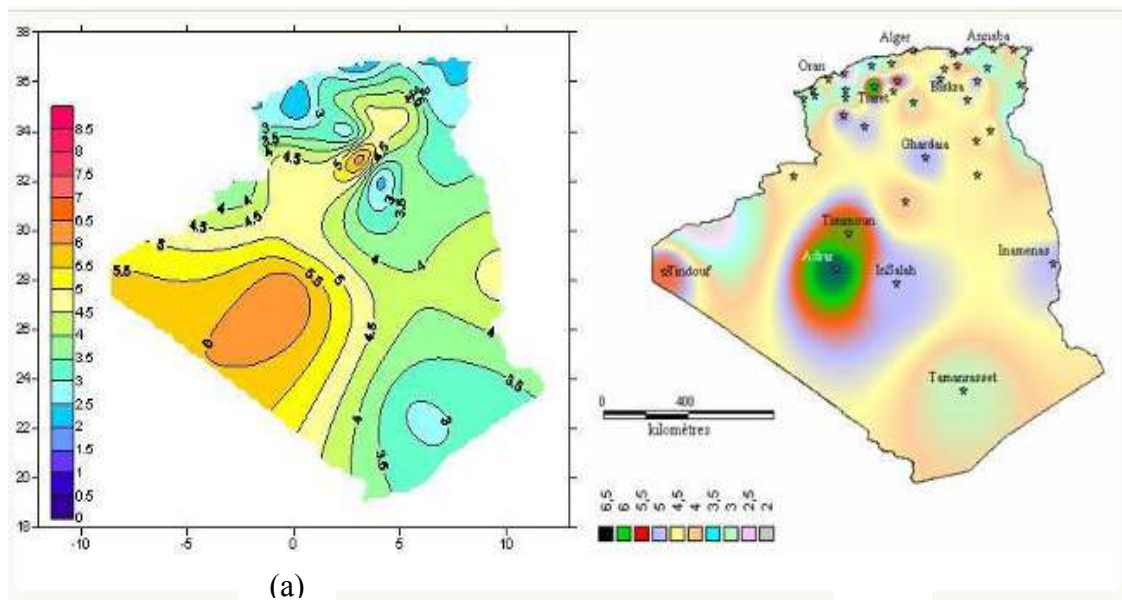
La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes : le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de **1200 Km** et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien **[17]**.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne, le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays **[18]**.

La carte montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar [18].

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver [18].



(a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali

(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk

FIGURE 1.9 : Carte du potentiel éolien en Algérie [19]

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé.

Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commencent à voir le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW.



FIGURE I.10 : La première ferme éolienne en Algérie [20]

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de **10MW** qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de **420 MW** à l'horizon **2024** constituée de **12** éoliennes d'une puissance unitaire de **0.85 MW** chacune (pour une capacité globale de **10** mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de **30** hectares dans la zone de Kabertène à **72 km** au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de **32** mois travaux pour un coût global de **2,8** milliards de dinars .

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de **22 GW**, d'énergie renouvelable à l'horizon **2030** dont **1,7 GW** en éolien.

Une étude du groupement industriel pour l'électricité des déserts et le promoteur du projet estime que l'Algérie dispose d'un potentiel énorme en énergie éolienne. La société d'électricité et de l'énergie renouvelable, annonce qu'environ **40 %** de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable à l'horizon **2030** [20].

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites.

D'après les données du Centre De Recherche en Energies Renouvelables, la figure **I.11** indique les vitesses des vents pour différents sites en Algérie [21].

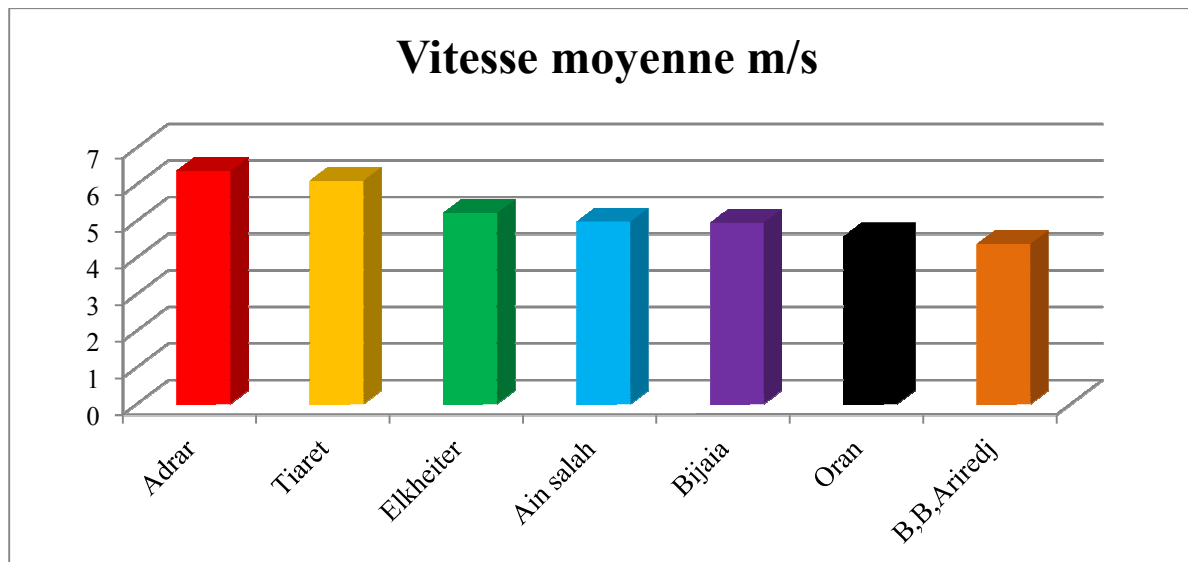


FIGURE I.11 : Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés

I.5. Aspects Economiques de l'Eolienne

On peut réaliser une analyse simple de la rentabilité économique de la production d'électricité avec une éolienne. La dimension uniquement analysée ici est la dimension économique vue par l'investisseur, la réalité est plus complexe que cela fort heureusement d'ailleurs. L'intérêt d'investir dans l'éolien ne se limite pas à une dimension purement économique.

On considère ici une durée d'utilisation de **20** ans avec des frais d'entretien annuels de **5 %** de l'investissement initial. L'investissement est pris à différentes valeurs : **1 000 €/kW** et **1 500 €/kW** qui sont représentatifs des grandes éoliennes ainsi que **2 000**, **3 000**, **4 000** et **5 000 €/kW** pour de plus petites éoliennes. Il est alors possible d'évaluer le coût du kWh produit si on connaît la production annuelle d'électricité rapportée en nombre d'heures équivalentes de fonctionnement à puissance nominale [22].

I.6. Impacts Environnementaux des éoliennes

Ce paragraphe passera en revue les aspects environnementaux liés au déploiement d'une simple turbine à vent ou d'une ferme éolienne. En effet, le développement de l'énergie éolienne a des incidences tant positives que négatives sur l'environnement.

Du côté positif, l'énergie éolienne est généralement considérée comme amicale à l'environnement, particulièrement quand les effets sur l'environnement des émissions à

grandes échelles des centrales électriques conventionnelles à grande échelle sont considérés. Par exemple, des évaluations des émissions (des oxydes de soufre et d'azote, des substances particulaires, et anhydride carbonique) des centrales à charbon et des centrales à gaz par rapport à ceux des systèmes éoliens (zéro dans tous les cas) sont montrées dans le tableau I.1 ci-dessous [23]

Tableau I.1 : Comparaison des émissions des centrales à charbon et à gaz avec les centrales éoliennes

Polluant	Charbon conventionnel Kg/MWh	Gaz conventionnel Kg/MWh	Vent
Oxydes de soufre	1.2	0.004	0
Oxydes d'azote	2.3	0.002	0
Particules	0.8	0.0	0
Anhydride carbonique	865	650	0

Les émissions produits par les systèmes éoliens sont essentiellement zéro, bien qu'il y ait des émissions indirectes liées à la production réelle des turbines à vent et à la construction des systèmes éoliens en générale. Des évaluations des émissions indirectes des systèmes éoliens(Allemagne) sont présentées dans l'exposé synoptique d'Ackerman et de Soder , où les valeurs d'émissions s'avèrent généralement petites (un ou deux ordres de grandeur moins que ceux des centrales conventionnelles) [23].

Sachant qu'il est difficile de mesurer le coût global à la société des divers polluants émis par les centrales conventionnelles, les avantages environnementaux de la puissance éolienne sont, généralement, calculés par les émissions évitées.

Les impacts négatifs potentiels de l'énergie éolienne :

- Impact visuel des turbines éoliennes.
- Bruit des turbines éoliennes.
- Effets d'interférences électromagnétiques des turbines [23].

I.7. Un système éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [24-25].

Et la figure ci-dessous montre la conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique :

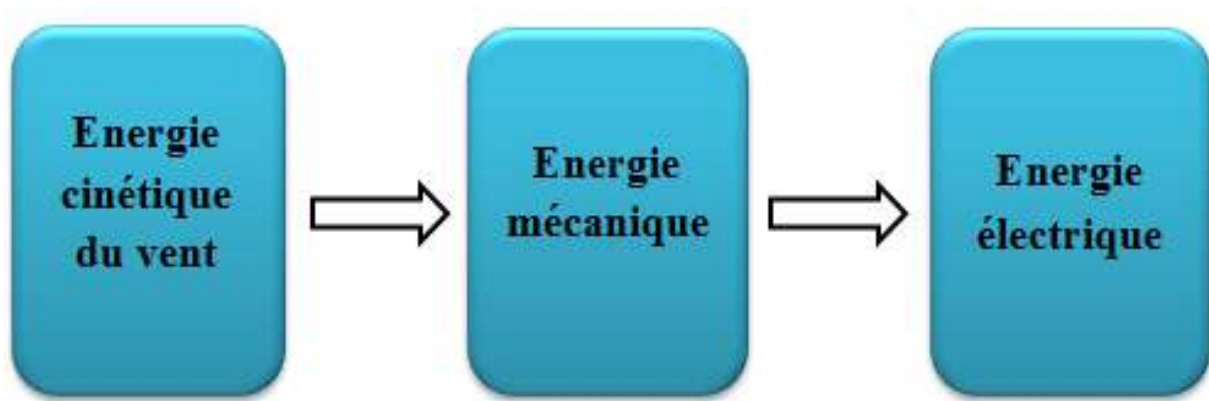


FIGURE I.12 : Conversion de l'énergie cinétique du vent à l'énergie électrique

I.8. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice [26].

Le fonctionnement général est illustré par la (figure I.13).

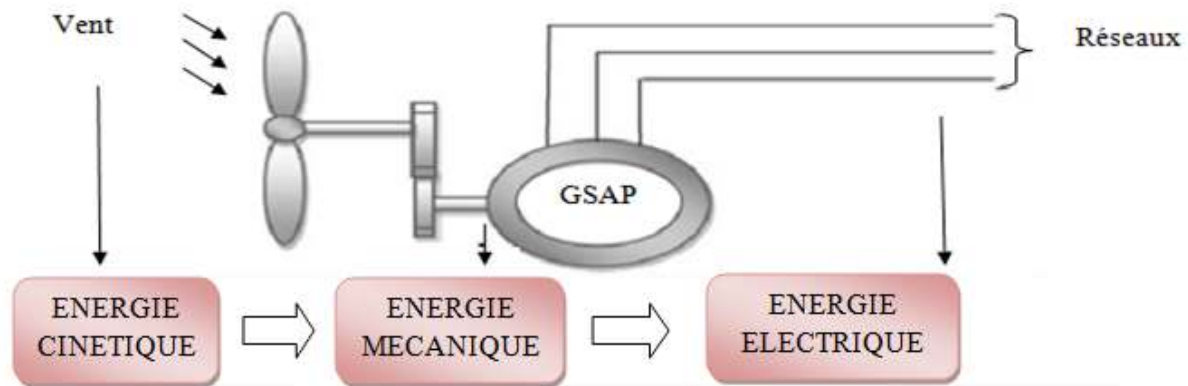


FIGURE I.13: Principe de la conversion d'énergie éolienne [27].

I.9 Eoliennes à vitesse fixe et variable

I.9.1 Eolienne à vitesse fixe

. Elles sont les premières à avoir été développées tournent à une vitesse relativement constante. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique est en fonction de la fréquence du réseau et du nombre de paires de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change [28].

❖ *Avantage* [28]:

- Simple, robuste, fiable.
- Faible coût de construction et maintenance.
- Pas besoin de système électronique de commande.

❖ *Inconvénients* [29]:

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transmise au réseau.

I.9.2 Eolienne à vitesse variable

Actuellement, les éoliennes de forte puissance fonctionnent sous vitesse variable. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. Leurs pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont

constituées. Ces systèmes à vitesse variable permettent à la fois de récupérer plus d'énergie, de réduire les coûts du système mécanique, de réduire le bruit et d'améliorer la qualité de l'énergie produite [30].

❖ *Les avantages* [31]

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Fort rendement de conversion d'énergie.

❖ *Les inconvénients* [28] :

- Coût et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs.
- Contrôle du système plus compliqué.

I.10. Les différents types d'éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [32].

I.10.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : **Savonius** et **Darrieus**.

I.10.1.1. Les éoliennes à axe vertical de type Savonius

Les éoliennes de type Savonius possèdent un rotor composé de deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Ces machines ont l'avantage d'être très peu encombrantes et esthétiques et elles peuvent facilement se placer sur le toit d'une maison.



FIGURE I.14 : L'éolienne à axe vertical de type Savonius

1.10.1.2. Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus (Georges Darrieus) peuvent développer une puissance plus grande que les éoliennes Savonius mais sont plus complexes. Elles sont peu répandues, l'inconvénient majeur étant qu'elles ne peuvent pas démarrer toutes seules.

Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépassent que très rarement 500kW en raison de leur grande sensibilité [33].



FIGURE I.15 : L'éolienne à axe vertical de type Darrieus

1.10.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à mono-pale, bipale, tripale ou multi-pales face ou sous le vent. D'une part elles sont caractérisées par leur capture

du vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol, ainsi il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage car le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle . D'autre part ces éoliennes ont un coût de construction très élevé, en effet l'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident [34].

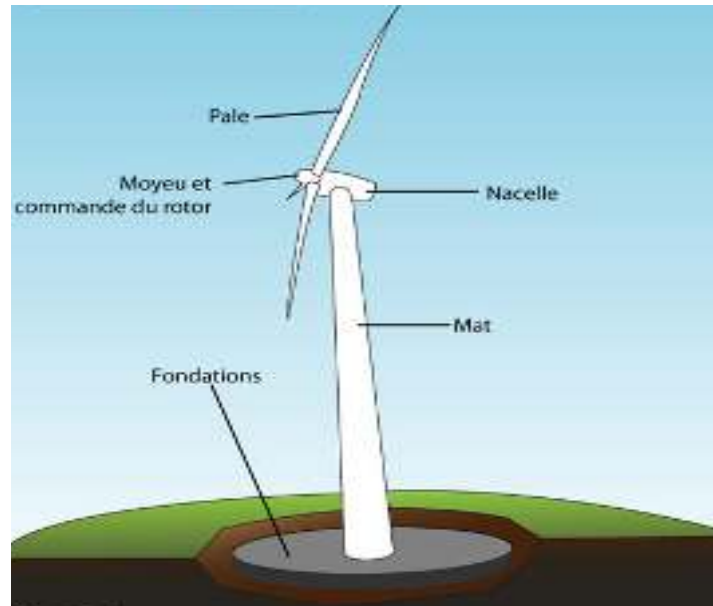


FIGURE I.16: Différentes parties d'une éolienne à axe horizontal (hélice)

Dans le reste de notre étude nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales.

En général, l'éolienne à axe horizontal est constituée de trois éléments principaux:

Le mât : c'est un tube d'acier ou de béton, elle doit être placée le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol [35].



1-Convertisseurs

3-Transformateur

2-Armoire de commande

4-Fondation de la tour

FIGURE I.17 : Tour éolienne et ses composants électroniques à l'intérieur

Les pales : Elles permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car ce nombre constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité [35].



FIGURE I.18 : Pales d'une éolienne

Le rotor : C'est la partie tournante dans une éolienne. Il transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Il est constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu [36-37].



FIGURE I.19 : Le rotor d'une éolienne

La nacelle : est la salle des machines de la turbine.



FIGURE I.20: La nacelle éolienne.

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique telle que :

- **Multiplicateur de vitesse :** il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- **L'arbre secondaire :** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- **La génératrice :** C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Un système de contrôle-commande :** comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale transmis à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.
- **Un système de refroidissement :** qui comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur.
- **Le dispositif d'orientation de la nacelle :** Il permet la rotation de la nacelle. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques [37-38].

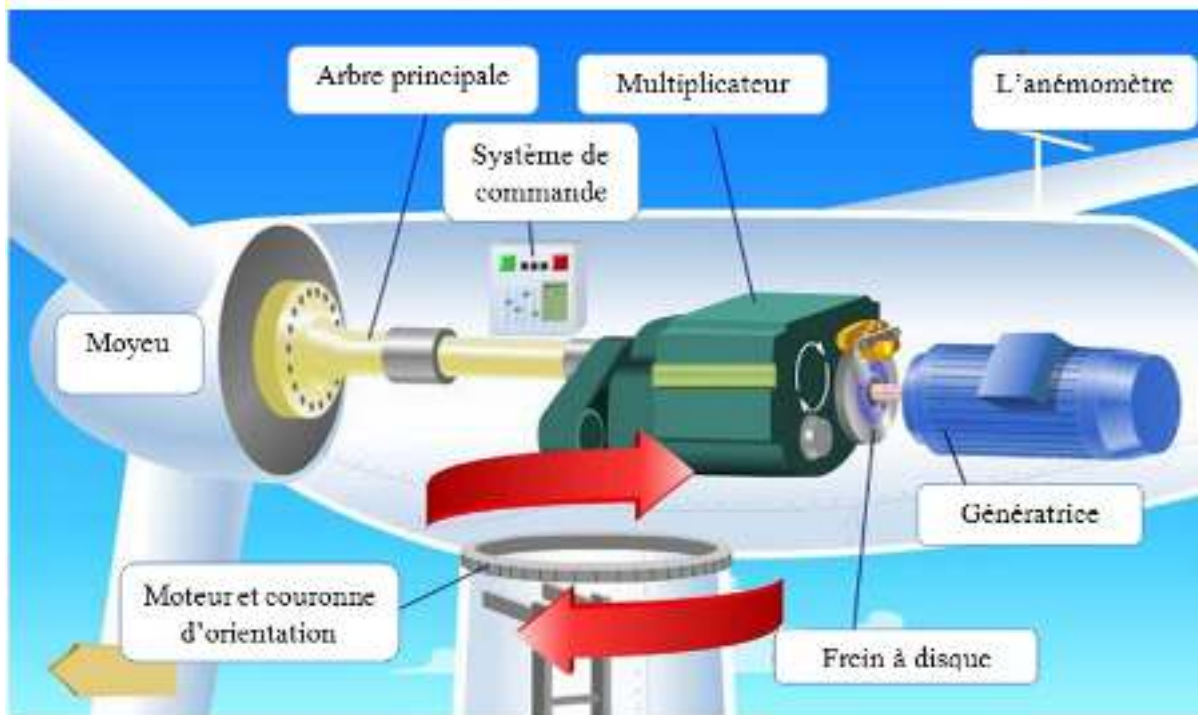


FIGURE I.21: Eléments d'une nacelle éolienne

Dans la partie suivante, nous allons présenter les modèles de dimensionnement associés ce système, en particulier pour la turbine éolienne.

I.11. Modélisation d'une chaîne éolienne

Dans le système de conversion d'énergie éolienne on trouve :

- ❖ Le vent
- ❖ Eolienne tripale « Type tripale »
 - | | |
|---|-----------------|
| { | Turbine |
| | Arbre mécanique |
- ❖ La génératrice « GSAP » (Génératrice Synchrone à Aimant Permanent).

I.11.1. Le vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de fourrier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation (I.1) [39].

$$V(t) = 8.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (I.1)$$

❖ Avec :

$$\omega_p = \frac{2\pi}{10}$$

I.11.2. Eolienne tripale

Nous considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice tel que :

- ❖ La turbine éolienne se compose de 3 pales.
- ❖ L'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur.

Et la figure ci-dessous représente différent partie de la turbine : [40]

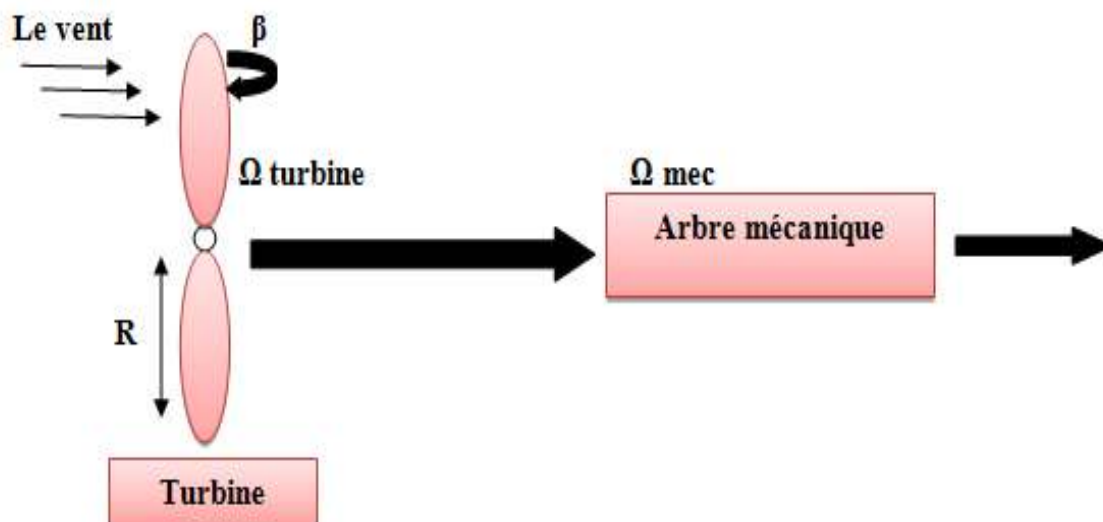


FIGURE I.22: La partie mécanique d'une éolienne tripale

1.11.2.1 Modèle de la Turbine :

La relation entre la vitesse du vent et la puissance cinétique du vent est exprimée par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{I.2})$$

$\rho=1.25$: Masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression [kg / m³].

v : La vitesse du vent [m/s].

R : Longueur d'une pale (Rayon de l'éolienne) [m] .

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance C_p) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_D = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{I.3})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure **I.23** représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β .

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent. Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre.

Si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.

Si λ est supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

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

$$\lambda = \frac{\Omega_t \times R}{v} \quad (\text{I.4})$$

λ : La vitesse spécifique de vent [rad / s]

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine éolienne [rad / s].

Le couple mécanique à la sortie de la turbine est défini par :

$$C_t = \frac{P_D}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_c (\lambda, \beta) \quad (I.5)$$

β : Angle de calage [deg].

C_c : représente le coefficient du couple en [N.m] peut être déterminée par la formule qui suit:

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2} \quad (I.6)$$

Avec:

C_t : est le couple de la turbine éolienne [N.m].

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées. Nous présentons ci-dessous une seule forme [40]:

$$C_p = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0.4 \cdot \beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda'}} \quad (I.7)$$

❖ Avec :

$$\frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (I.8)$$

La (figure I.23) illustre les courbes de C_p pour plusieurs valeurs de β [deg]

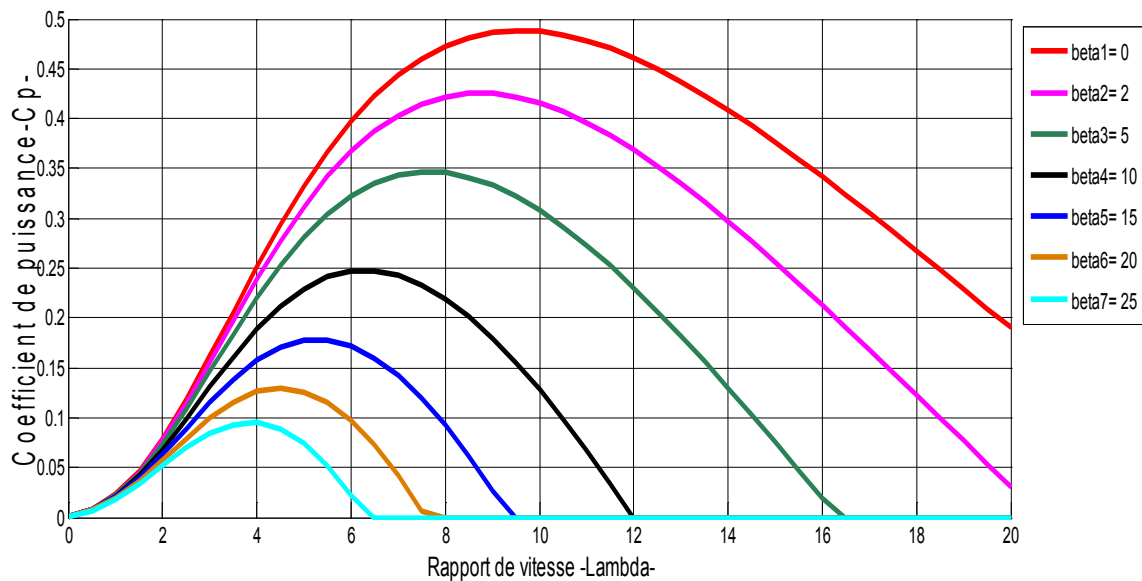


FIGURE I.23: Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ

I.11.2.2. Modèle de l'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [41] :

$$J \frac{d\Omega_t}{dt} = C_t - C_{em} - f_m \Omega_t \quad (I.9)$$

J : Inertie totale des parties tournantes (turbine + génératrice) [kg.m²].

f_m : Coefficient de frottement visqueux [N.m.s / rad].

C_t : Couple de la turbine éolienne [N.m].

C_{em} : Couple électromagnétique de la génératrice en [N.m].

Le couple de frottement est modélisé par un coefficient de frottements visqueux de la machine f_m est on néglige le coefficient de frottements visqueux de la turbine f_t tel que :

$$C_f = f_m \times \Omega_t \quad (\text{I.10})$$

Aussi le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de cette dernière :

$$J = J_t + J_m \quad (\text{I.11})$$

L'aspect intermittent et aléatoire de la fourniture d'électricité par les éoliennes pourrait être compensé par un système de stockage de l'électricité en période de surproduction à fin de pailler à l'absence de production lorsqu'il n'y a pas de vent.

I.12. Stockage de l'énergie éolienne

L'énergie produite par les éoliennes peut être stockée par la manière de :

- Stockage par batteries. [42].

I.12.1. Stockage par batteries

La solution du stockage de l'énergie électrique dans des batteries n'est envisagée que pour des sites isolés et des productions de faible importance. Ce type de stockage est limité par l'investissement représenté par des batteries de grande capacité et par la pollution engendrée par leur recyclage [42].



FIGURE I.24 : Stockage d'énergie éolienne par Batterie

I.13. Avantages et inconvénients

L'énergie éolienne a des avantages permettant son évolution, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir. D'autre part il faut éviter l'impact créé par ses inconvénients [43] :

I.13.1. Avantages

- L'énergie éolienne à permet d'éviter le réchauffement climatique, des pluies acides et la pollution de notre planète en général.
- Contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Le coût d'investissement nécessaire d'un parc éolien est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles [44-45].

I.13.2. Inconvénients

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, notamment le bruit aérodynamique (les pales) et celle -ci doit donc être limité.
- Les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux.
- La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- L'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs sur le réseau. [45-46].

I.14. Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans la première partie de ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la représentation et la production mondiale de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs principales composantes.

Dans la deuxième nous allons établir un modèle mathématique de la partie mécanique qui permettra de modéliser le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini. Nous allons dans cette partie, commencer par modéliser le vent, puis nous allons intéresser à la modélisation de la turbine choisie. Ainsi nous avons décrit le type de stockage de l'énergie éolienne, leurs avantages et inconvénients.

Dans le chapitre suivant, nous allons exploiter l'énergie éolienne dans la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en mode génératrice (GSAP).

CHAPITRE II

Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

II.1. Introduction

Les alternateurs triphasés sont la source primaire de toute l'énergie électrique. Entraînées par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes. Elles transforment l'énergie mécanique en énergie électrique avec des puissances allant jusqu'à 1500 MW [47].

Dans notre étude nous allons intéresser à une éolienne utilisant une génératrice synchrone à aimants permanents couplé directement à la turbine. Ce dernier reste le bon choix. [47-48].

L'avantage le plus important de ces machines dans le domaine éolien est l'absence de multiplicateur de vitesse pour des machines de grand nombre de paires de pôles, réduisant ainsi le volume de l'éolienne et la maintenance du système [49].

Deux parties essentielles constituant le deuxième chapitre :

- ❖ La première partie : présente quelques généralités sur la machine synchrone à aimants permanents.
- ❖ La deuxième partie : consacrée à la modélisation de la MSAP en utilisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices afin d'obtenir un modèle simple et fiable pour la simulation numérique.

II.2. Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

II.2.1. Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Les aimants d'excitation sont situés sur la partie tournante (rotor), ce dernier présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques, ainsi que la nécessité d'une source pour fournir le courant d'excitation [50].

Alors que la partie fixe (stator), se compose de trois enroulements parcourus par des courants alternatifs décalés de 120° dans l'espace et dans le temps, logés dans les encoches du circuit magnétique fixe [51].

Dans le domaine éolien, le fonctionnement du dispositif complet de la MSAP est couplé directement à la turbine sans multiplicateur de vitesse.

II.2.2. Différentes structures de machines à aimants permanent

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes [52]. Nous pouvons classer les MSAP selon le placement des aimants permanents sur le rotor. Leurs différentes structures incluent les machines à flux radial (RFPM) et à flux axial (AFPM). Une vue schématique des deux types de machines à aimants est donnée par la (figure II.1).

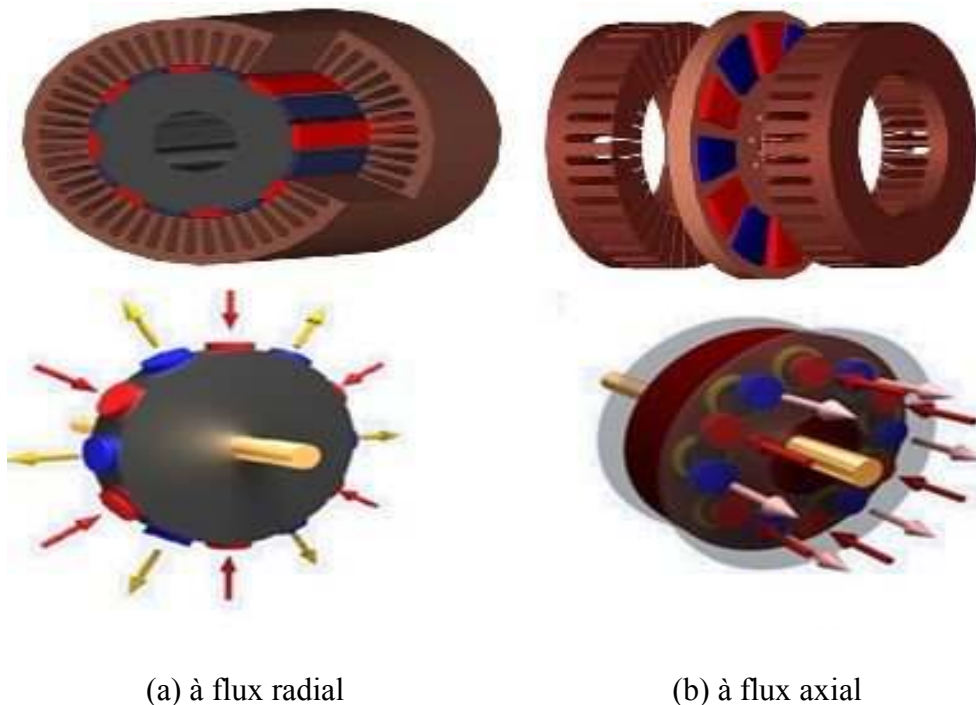


FIGURE II.1 : Vue schématique des machines

II.2.2.1. Structures à flux radial (RFPM)

La machine synchrone à flux radial (RFPM) est la machine à aimant la plus conventionnelle. Elle est employée couramment pour l'entraînement direct. Ces structures peuvent se présenter, soit avec un rotor placé à l'intérieur ou à l'extérieur (Figure II.2).

Les différents types de rotor de machines à flux radial sont munis d'aimants montés soit en surface, soit encastrés ou enterrés [53].

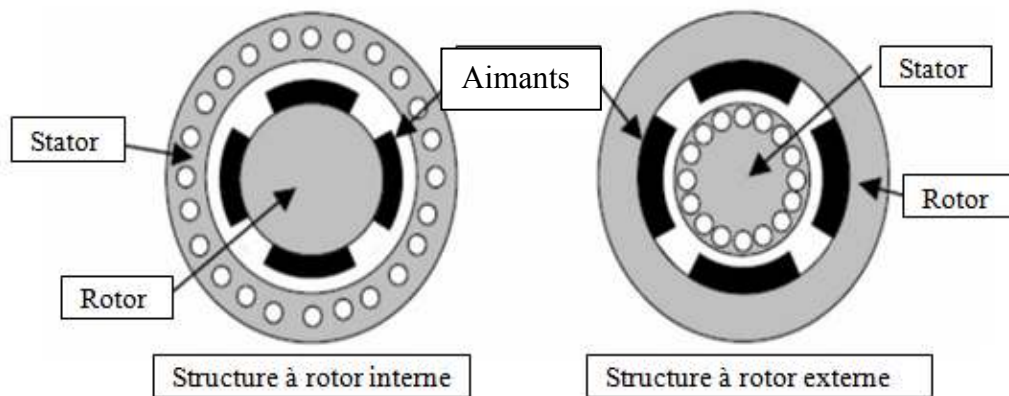


FIGURE II.2 : Exemple de structures à rotor interne et à rotor externe.

❖ *Structures à aimants déposés en surface (pôles lisses)*

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 (Figure II.3) [54].

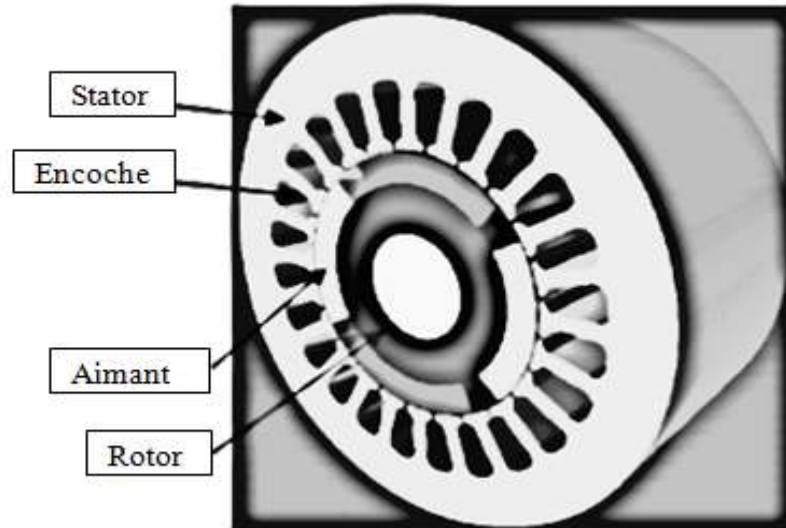


FIGURE II.3 : Structure à aimant en surface

❖ Structures à aimant encastrés (pôles saillants)

Pour ce type de positionnement comme indiqué dans la (figure II.4), les aimants sont insérés à la surface du rotor avec un remplissage des ouvertures entre les aimants par du fer. Ceci va créer une saillance [53].

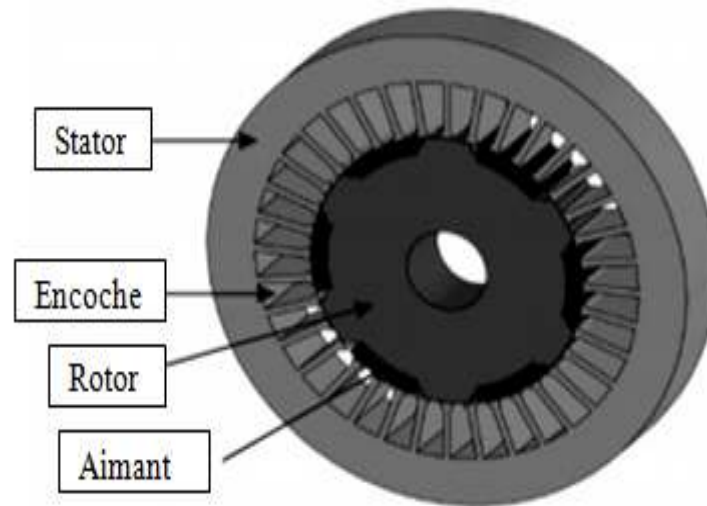


FIGURE II.4 : Structure à aimants encastrés

❖ Structures à aimants enterrés

La structure des inducteurs de ce type de machine est à géométrie complexe. Les aimants sont enterrés à l'intérieur du rotor. La robustesse mécanique de ce type de rotor permet d'atteindre de très grandes vitesses pour des puissances importantes. Deux configurations du rotor peuvent être distinguées (Figure II.5), l'une est à concentration de flux et l'autre à structure classique.

L'avantage de ces deux configurations réside dans la possibilité de concentrer le flux produit par ces aimants, permettant ainsi d'assurer des niveaux d'inductions élevées dans l'entrefer. De plus, les aimants enterrés sont bien protégés contre la démagnétisation [53].

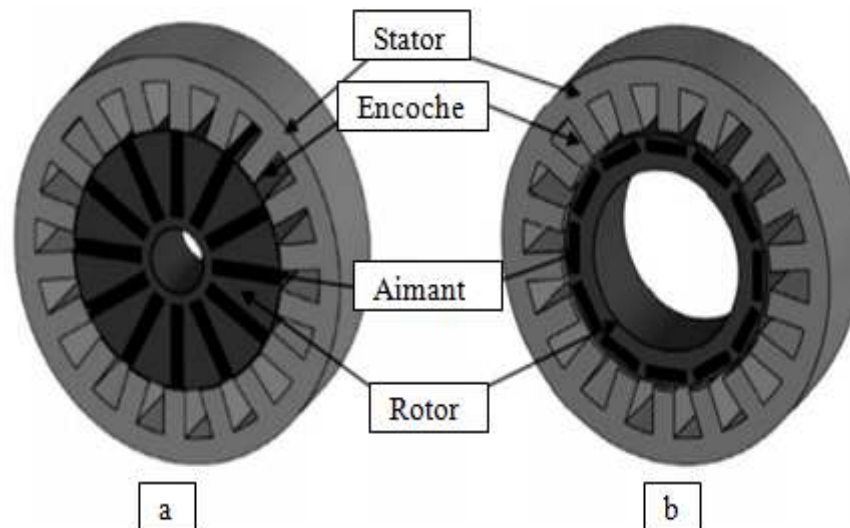


FIGURE II.5: Structure à aimants enterrés : (a) avec concentration de flux, (b) structure classique.

II.2.2.2. Structures à flux axial (AFPM)

Discoïdales ou AFPM représentent une autre solution possible pour les entraînements directs à basse vitesse. Elles comportent un ou plusieurs disques fixes ou mobiles, supportant les aimants permanents. Leur principal avantage est l'optimisation de la surface utile de génération du couple, qui se traduit par une puissance volumique importante. Cependant, leur assemblage est très compliqué, à cause des contraintes mécaniques liées aux poussées axiales, ces machines se caractérisent par un plus grand diamètre et une longueur axiale relativement plus courte.

Différentes configurations à flux axial existent: [55-56]

- Structure simple avec un seul rotor associé à un seul stator (Figure II.6).
- Un seul stator inséré entre deux rotors (Figure II.7).
- Un seul rotor inséré entre deux stators (Figure II.8).

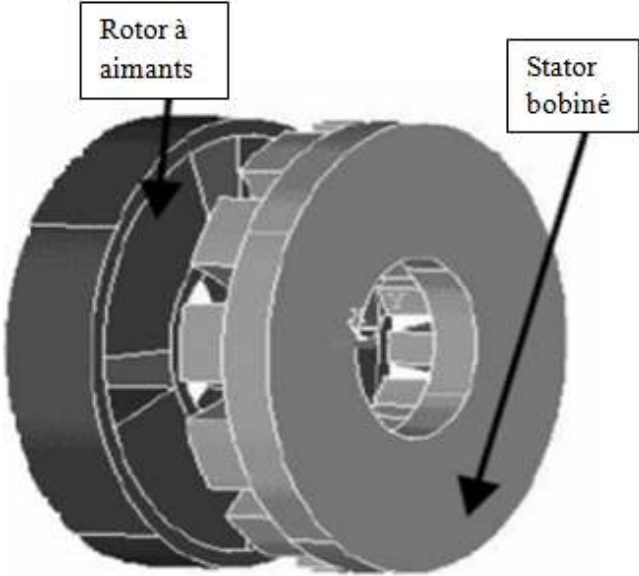


FIGURE II.6 : Structure à flux axial simple avec un rotor et un stator.

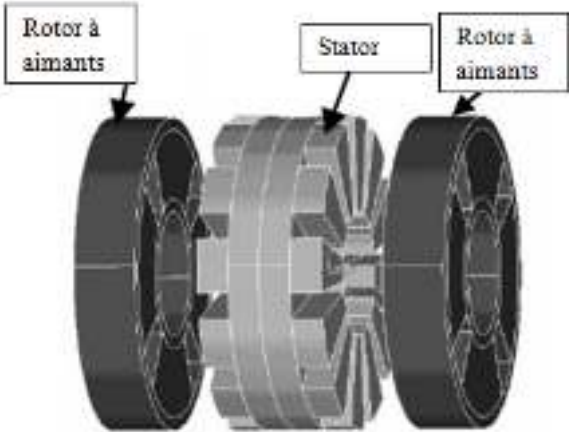


FIGURE II.7 : Structure à flux axial avec double rotor et un stator

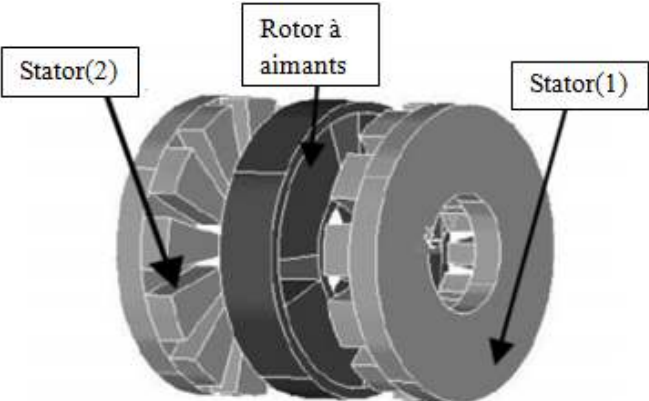


FIGURE II.8 : Structure à aimantation axiale avec double stator et un rotor

II.2.3. Les domaines d'application de MSAP

Maintenant on présente des exemples d'application des MSAP utilisées dans différentes plages de puissance :

❖ **Applications aux petites puissances** ($P < 600\text{W}$)

Micro Ventilateur.

Disque Dur.

❖ **Applications aux moyennes puissances** ($500\text{W} < P < 100\text{KW}$)

Voiture électrique (Toyota Prius).

Robot industrie.

❖ **Applications aux fortes puissances**

Traction ferroviaire.

Propulsion navale.

II.2.4. Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines, parmi ces avantages :

- ❖ Absence de pertes joules au niveau du rotor.
- ❖ Couple volumique et puissance massique élevés
- ❖ Construction simple et moins de frais d'entretien (absence de collecteurs et balais).
- ❖ Densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assurant une très bonne performance dynamique et un très bon rendement.
- ❖ En fonctionnement générateur, la machine à aimants permanent ne nécessite aucune alimentation électrique [52-53-57].

II.2.5. Inconvénients de la MSAP

Comme inconvénients de la MSAP on cite :

- ❖ Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule.
- ❖ Ondulations de couple.
- ❖ Le cout important des aimants [57].

II.3. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

II.3.1. Les hypothèses simplificatrices

Afin d'obtenir une formulation plus simple et de réduire la complexité du modèle de la machine, on va construire un modèle dynamique de la MSAP, pour obtenir ce dernier, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivante [58]:

- ❖ Les enroulements statoriques sont le plus souvent connectés en étoile à neutre isolé.
- ❖ La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases.
- ❖ Les FEM créés par les enroulements du stator ont une allure sinusoïdale.
- ❖ Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- ❖ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

II.3.2. Equations de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel (a,b,c)

La structure électrique d'une MSAP triphasée est constituée au stator d'un enroulement triphasé représenté par les trois axes (a,b,c) décalés, l'un par rapport à l'autre, d'un angle de 120° électrique, ainsi que l'illustre la (figure II.9), et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

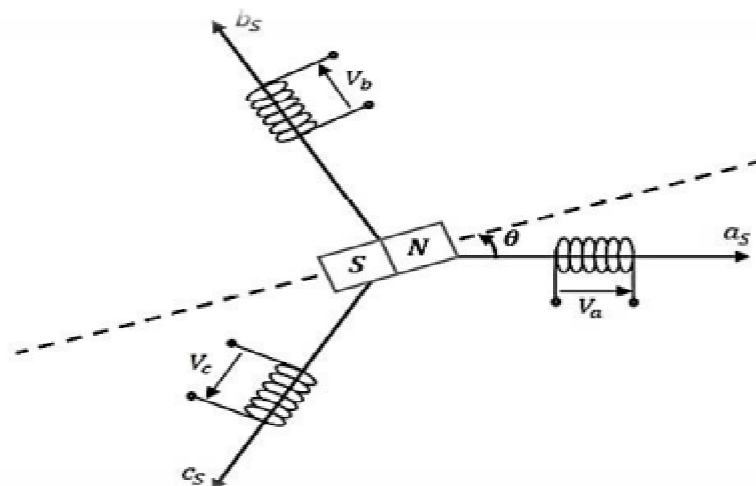


FIGURE II.9: Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)

Les flux créés par les aimants permanents sont de forme sinusoïdale le long de l'entrefer. Les expressions des flux mutuels inducteur-phase sont données par [54] :

$$\begin{cases} \varphi_a = \varphi_f \cos(P\theta) \\ \varphi_b = \varphi_f \cos(P\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \varphi_c = \varphi_f \cos(P\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Vecteur des flux statorique [Wb].

θ : L'angle de repère de Park [rad].

φ_f : Valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques.

Les équations de tensions dans le repère (a, b, c) s'expriment en fonction des courants et des flux par :

$$\begin{cases} V_a = R_s \cdot I_a + \frac{d}{dt} \varphi_a \\ V_b = R_s \cdot I_b + \frac{d}{dt} \varphi_b \\ V_c = R_s \cdot I_c + \frac{d}{dt} \varphi_c \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

V_a, V_b, V_c : Vecteur tension des phases statorique [V].

I_a, I_b, I_c : Vecteur courant des phases statorique [A].

R_s : Résistance d'une phase d'enroulement statorique [Ω].

II.3.3. Equations de la machine synchrone à aimants permanents dans le référentiel de Park (d, q)

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $\frac{2\pi}{3}$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\frac{\pi}{2}$ et situées sur le rotor (Figure II.10).

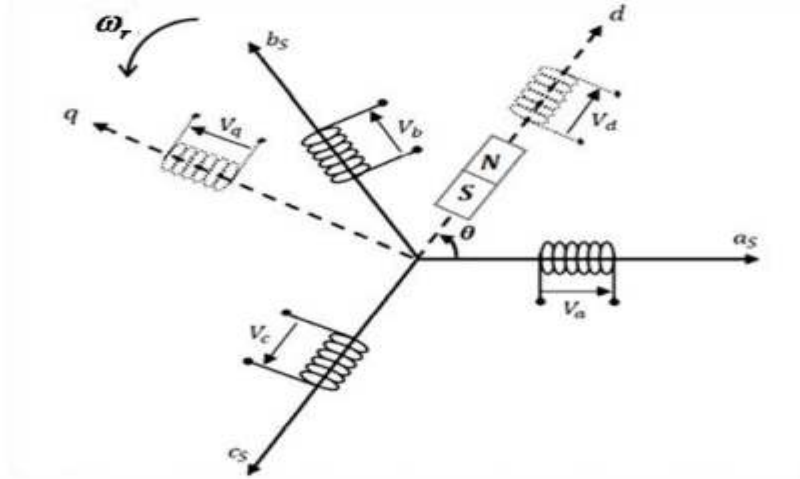


FIGURE II.10 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park

Pour cela il faut utiliser les transformations de Park suivantes [59] :

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

Et inversement, pour passer des équations dans le plan de Park aux équations dans le plan (a, b, c) on utilise la transformation de Park inverse qui est donnée par :

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

Le changement de variable effectué aux équations des tensions, courants et flux, on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_{dq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{bmatrix} V_{dq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

$$[\varphi_{dq}] = P(\theta)[\varphi_{abc}] \quad (\text{II.7})$$

Les systèmes d'équations différentielles de la MSAP suivant le référentiel de Park généralisé sont [59] :

➤ *Equations électriques :*

$$V_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \varphi_d - \omega \varphi_q \quad (\text{II.8})$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \varphi_q + \omega \varphi_d \quad (\text{II.9})$$

V_d, V_q : Les composantes de la tension au stator dans le repère de Park [V].

i_d, i_q : Les composantes du courant au stator dans le repère de Park [A].

φ_d, φ_q : Les composantes du flux au stator dans le repère de Park [Wb].

ω : La vitesse de rotation électrique [rad / s].

➤ *Equation de flux magnétique :*

$$\varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \quad (\text{II.10})$$

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (\text{II.11})$$

L_d : L'inductance statorique à l'axe d [H].

L_q : L'inductance statorique à l'axe q [H].

En remplaçant les équations (II.10) et (II.11) dans (II.8) et (II.9), les équations de la machine synchrone dans le repère de Park sont :

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega L_q i_q \quad (\text{II.12})$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega L_d i_d + \omega \varphi_f \quad (\text{II.13})$$

II.3.4. Expressions du couple électromagnétique

Pour compléter le modèle électromécanique de la MSAP, on doit ajouter l'expression du couple électromagnétique ainsi que l'équation mécanique [59]:

L'expression du couple électromagnétique est exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \left[(L_d - L_q) i_d i_q + i_q \varphi_f \right] \quad (\text{II.14})$$

P : Nombre de paires de pôles.

Notre génératrice synchrone est à pole lisse, c'est-à-dire $L_d = L_q$ alors l'expression de couple devient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p i_q \varphi_f \quad (\text{II.15})$$

II.3.5. Circuit équivalent de la MSAP

Les circuits électriques équivalents de la MSAP A partir des équations (II.12) et (II.13) peuvent être représentés comme suit [60] :

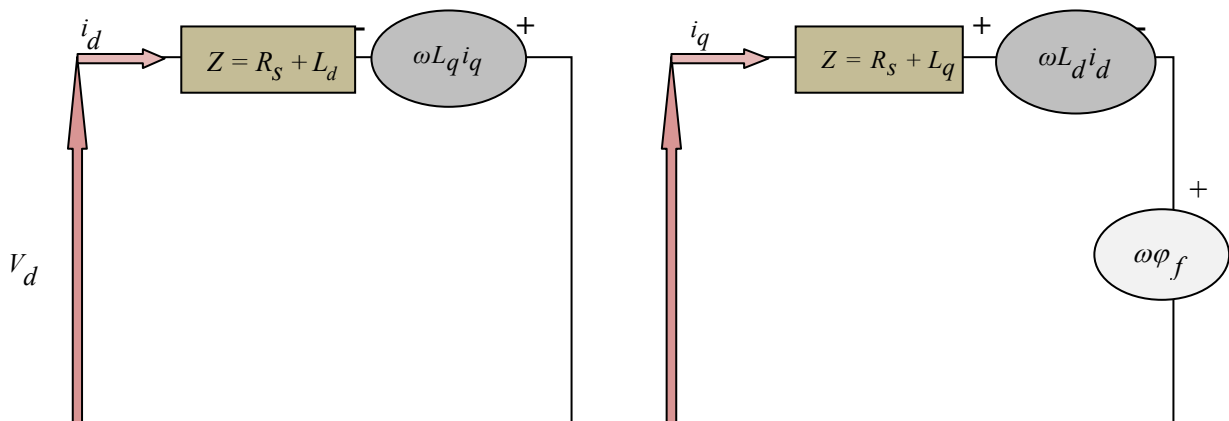


FIGURE II.11: Circuit équivalent de la MSAP

II.4. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en convention génératrice

Pour la convention génératrice de la machine synchrone à aimants permanents, les sens des courants i_d et i_q dans les repères de Park sont inversés. Ainsi, le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents obtenu s'écrit sous la forme [61]:

$$V_d = -R_s i_d - L_d \frac{d}{dt} i_d + \omega L_q i_q \quad (\text{II.16})$$

$$V_q = -R_s i_q - L_q \frac{d}{dt} i_q - \omega L_d i_d + \omega \varphi_f \quad (\text{II.17})$$

II.4.1. Modélisation à vide de la GSAP

Pour la génératrice à vide les courants statoriques sont nulles [60] :

$$\begin{cases} i_d = 0 \\ i_q = 0 \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Les expressions des tensions et du couple deviennent :

$$\begin{cases} V_d = 0 \\ V_q = \omega \varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

II.4.2. Modélisation en charge de la GSAP

Dans notre cas d'étude, on modélise la génératrice en charge, pour cela on suppose que la génératrice alimente une charge électrique (R_{ch}, L_{ch}) pour avoir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur la génératrice [59], on applique d'une part, les tensions V_d et V_q données par :

$$V_d = R_{ch} i_d + L_{ch} \frac{d}{dt} i_d - \omega L_{ch} i_q \quad (\text{II.20})$$

$$V_q = R_{ch} i_q + L_{ch} \frac{d}{dt} i_q + \omega L_{ch} i_d \quad (\text{II.21})$$

En remplaçant les expressions de V_d et V_q dans les équations (II.16) et (II.17), on aura le système suivant :

$$0 = -(R_s + R_{ch})i_d - (L_d + L_{ch})\frac{d}{dt}i_d + \omega(L_q + L_{ch})i_q \quad (\text{II.22})$$

$$0 = -(R_s + R_{ch})i_q - (L_q + L_{ch})\frac{d}{dt}i_q + \omega(L_d + L_{ch})i_d + \omega\varphi_f \quad (\text{II.23})$$

En introduisant le modèle d'état dans les équations ci-dessus, elles deviennent :

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} \left[-(R_s + R_{ch})i_d + \omega(L_q + L_{ch})i_q \right] \quad (\text{II.24})$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q + L_{ch}} \left[-(R_s + R_{ch})i_q + \omega(L_d + L_{ch})i_d + \omega\varphi_f \right] \quad (\text{II.25})$$

La synthèse des contrôleurs de puissance active et réactive peut être faite analytiquement en utilisant le modèle de Park dans les coordonnées d-q montré précédemment dans les équations de (II.12) et (II.13) [62]:

Les puissances actives et réactives transitées par le réseau sont données dans le modèle de Park par les relations suivantes:

$$\begin{cases} P = v_d \cdot i_d + v_q \cdot i_q \\ Q = v_q \cdot i_d - v_d \cdot i_q \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

II.4. Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre deux parties essentielles du système de conversion d'énergie éolienne, dans la première on a bien introduit la machine à aimants permanents tel que son principe de fonctionnement, ses différents types et ses structures.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine synchrone à aimants permanents en mode génératrice GSAP. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi.

Le chapitre suivant donc sera consacré à la simulation de la GSAP ainsi la chaîne de conversion éolienne à l'aide du logiciel Matlab-Simulink.

Chapitre III

Simulation d'une chaîne de conversion éolienne

III.1.Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab/Simulink.

Dans ce chapitre, Nous établissons un modèle de simulation de l'ensemble de la chaîne éolienne prise en compte la simulation du vent, de comportement aérodynamique de turbine et du générateur électrique (GSAP).

Sous l'environnement Matlab/simulink , on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc et présenter les résultats de simulations .

III.2.Simulation de la chaîne de conversion éolienne

Le schéma bloc de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne est représenté dans la figure III.1 :

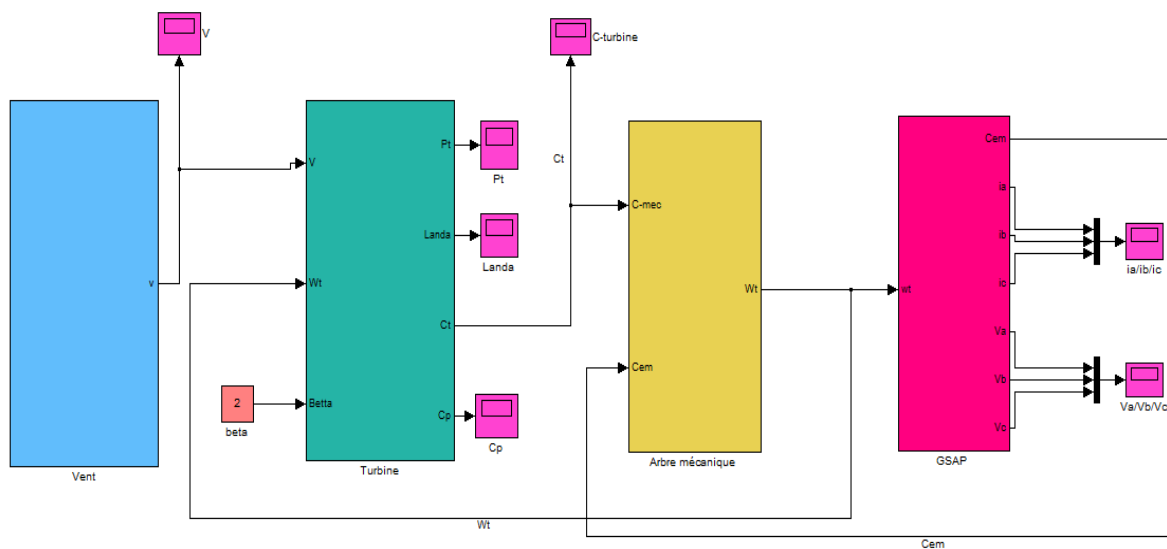
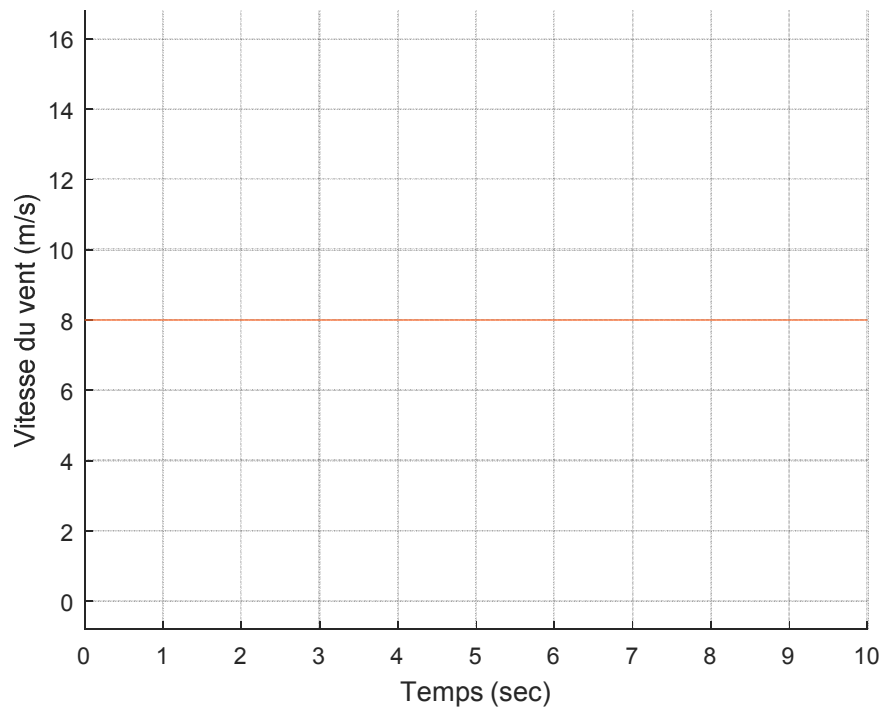


FIGURE III.1 : Bloc de simulation de l'association Turbine GSAP avec la charge.

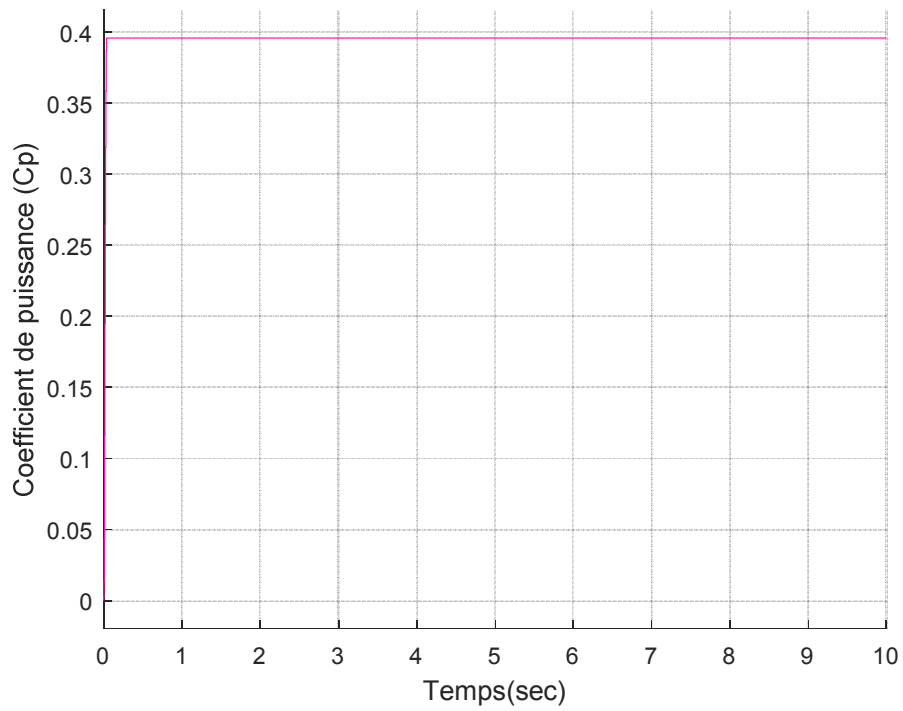
III.3.Résultats de simulation

Pour la simulation numérique, Le fonctionnement du dispositif complet de la GSAP couplée directement à la turbine sans multiplicateur de vitesse, a été simulé sous l'environnement MATLAB/Simulink. Les résultats présentés ci-dessous ne sont que des tests théoriques pour valider le modèle de la machine.

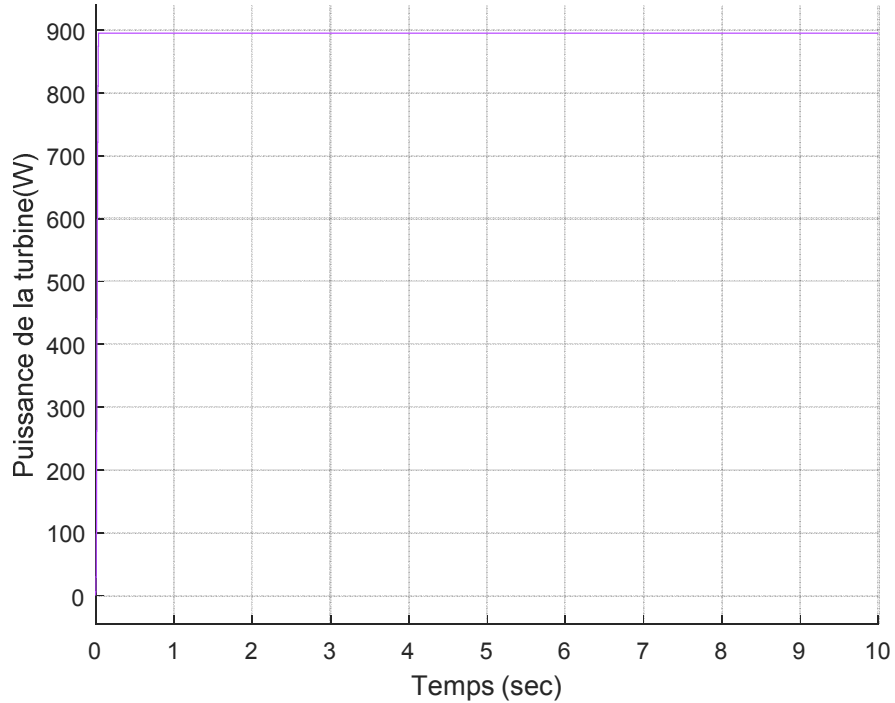
III.3.1.Résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne à vitesse fixe



(a) : Vitesse du vent

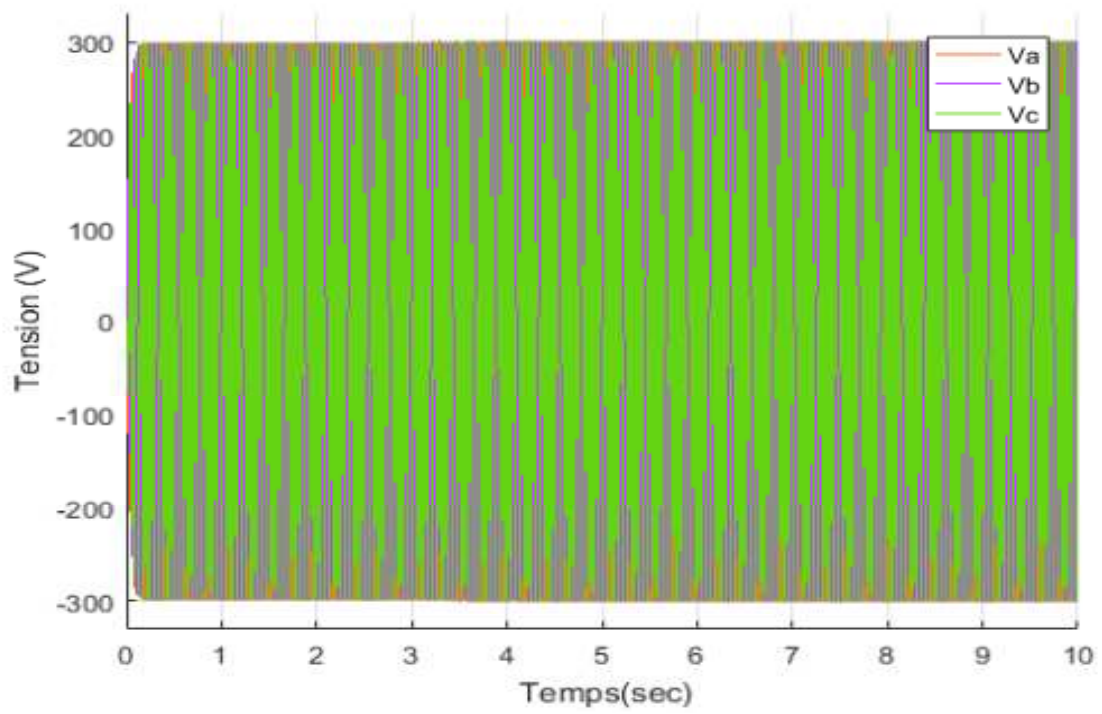


(b) : Coefficient de puissance C_p

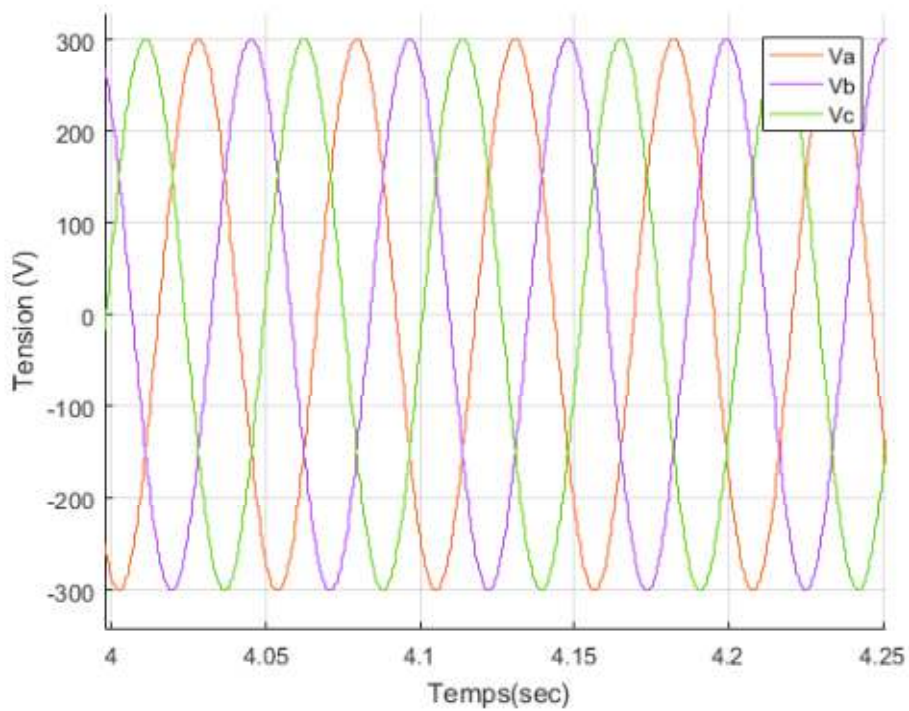


(c) : Puissance turbine

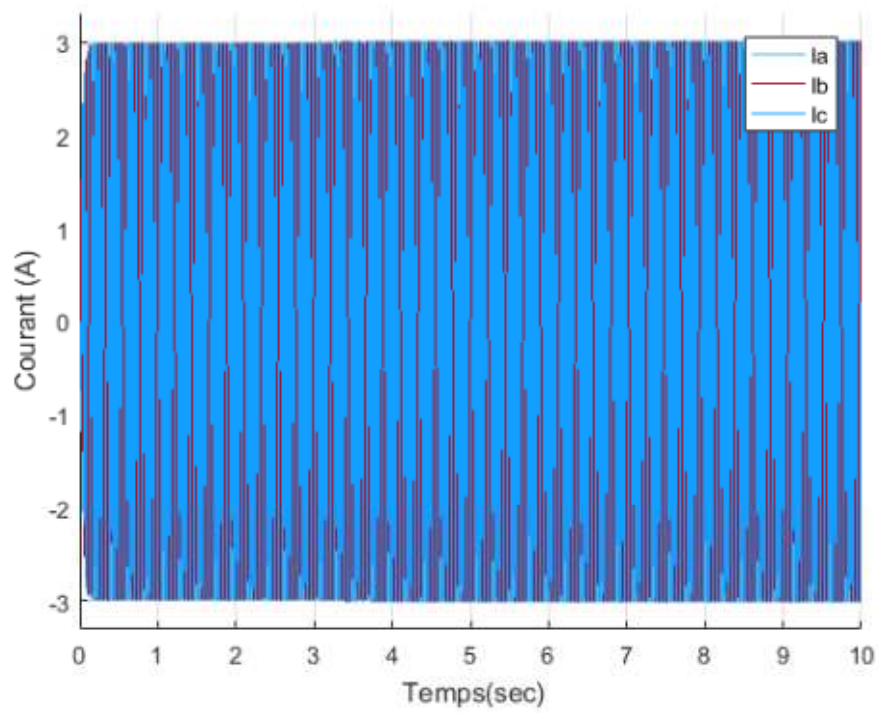
FIGURE III.2 : Simulation de la partie mécanique à vitesse fixe



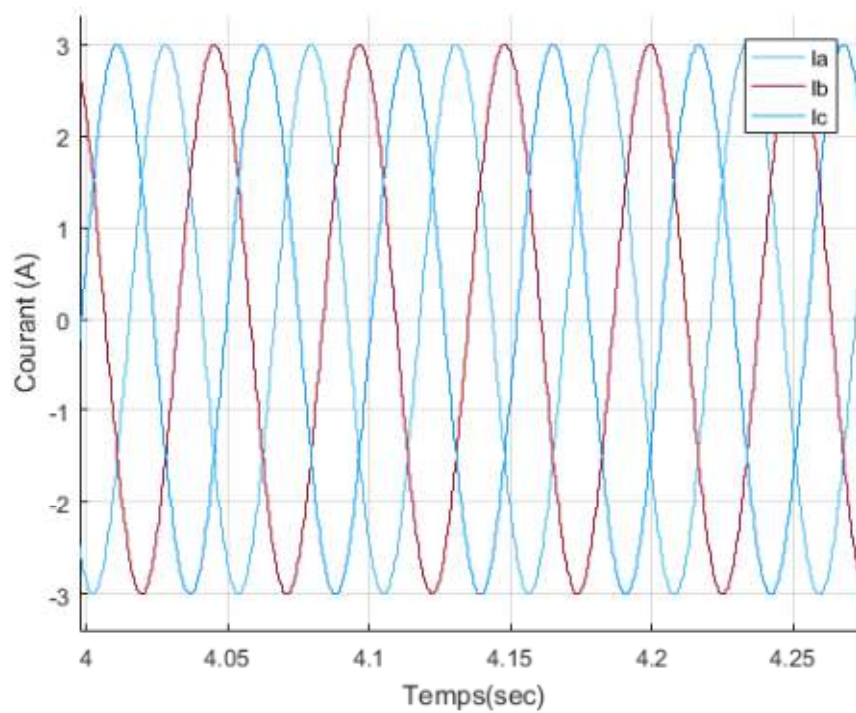
(d) : Tensions statoriques V abc



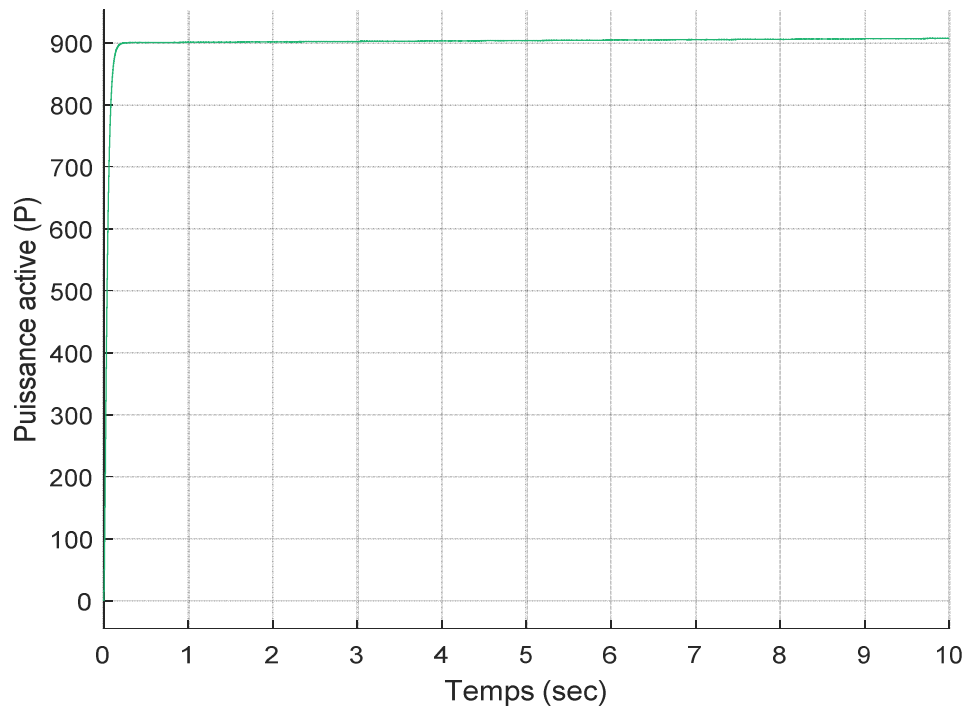
(e) : Zoom des tensions statoriques V abc



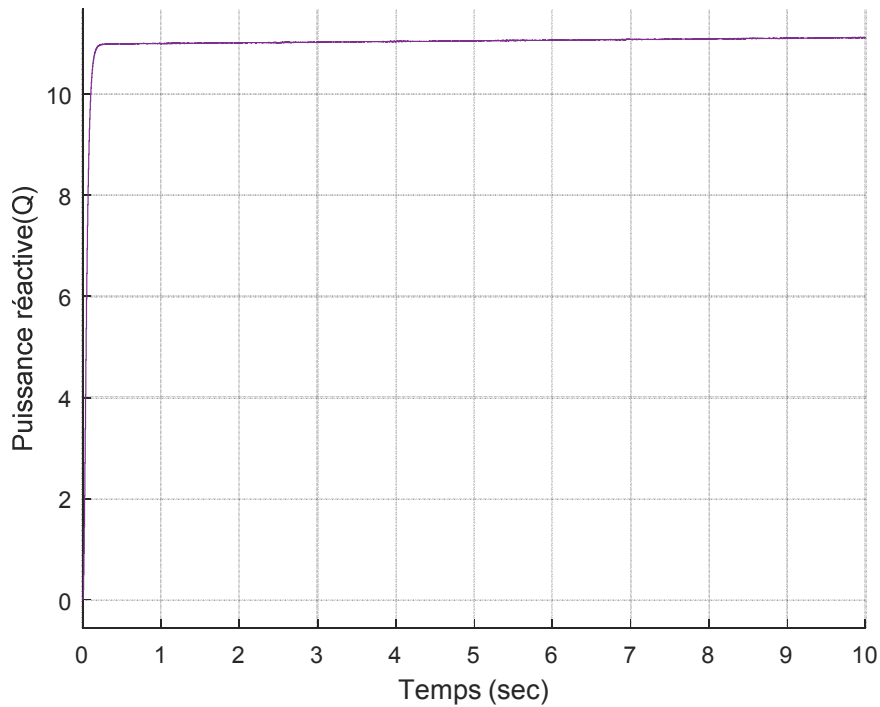
(f) : Courants statoriques I abc



(g) : Zoom des courants statoriques I abc



(h) : La puissance active (P)



(i) : La puissance réactive (Q)

FIGURE III.3 : Simulation de la partie électrique à vitesse fixe.

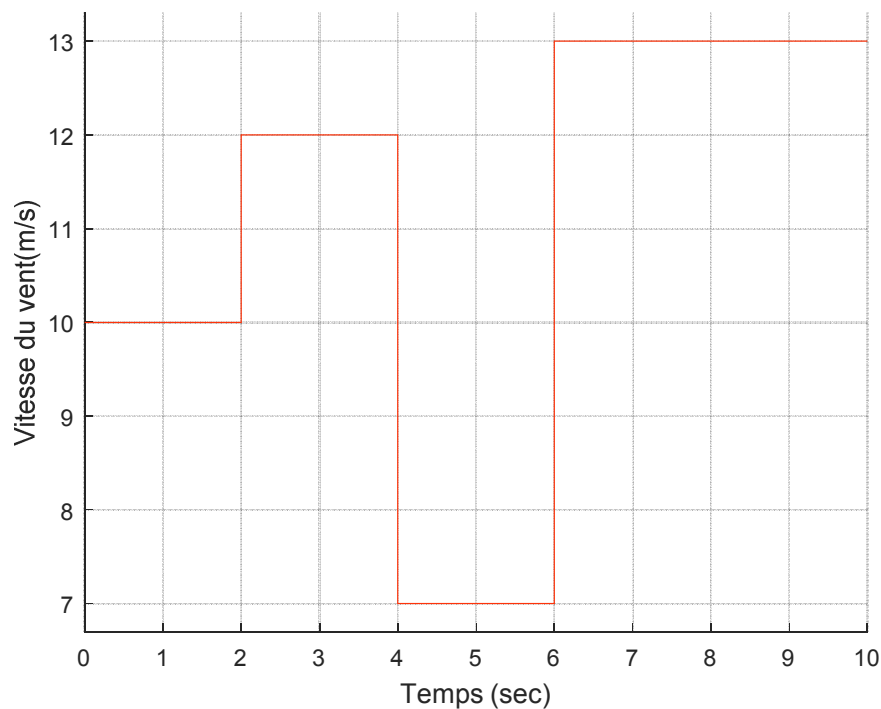
❖ Interprétation

Les figure (III.2 et III.3) montrent les résultats de simulation obtenus sous l'environnement Matlab/Simulink du comportement mécanique et électrique de la chaîne de conversion éolienne pendant le fonctionnement à vitesse fixe égal à 8 m/s (figure III.2.a).

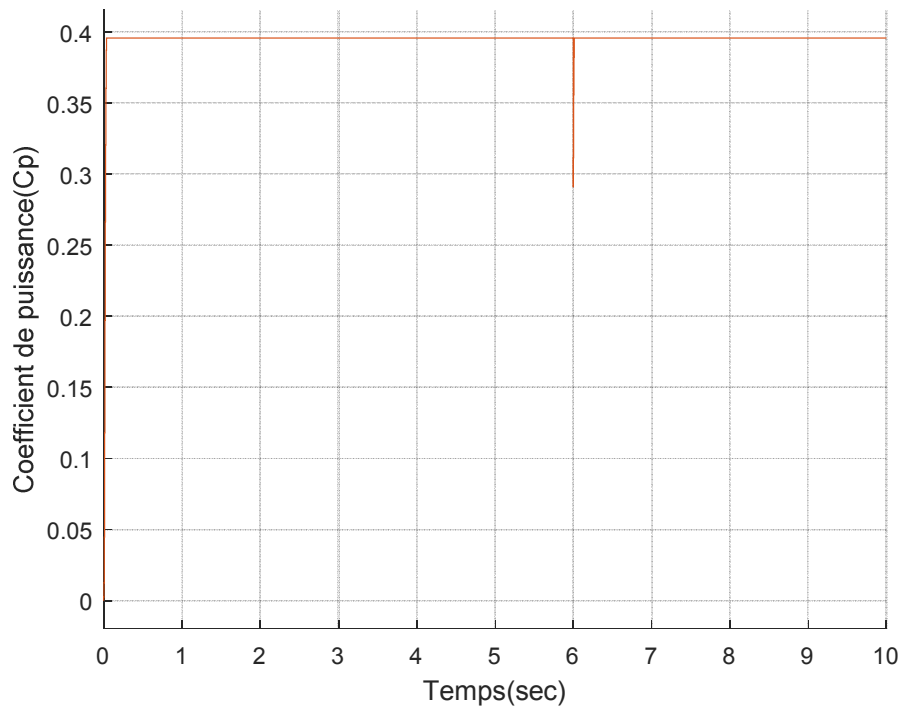
Le coefficient de puissance C_p est constant dans le régime permanent ou il a pris une valeur de 0.39 (figure III.2.b).sur la figure (III.2.c) on constate que la puissance mécanique fournie se stabilise autour de 900 W .

La tension et le courant généré par la machine sont purement sinusoïdales et varie selon la vitesse du vent avec des valeurs crêtes respectivement 300V et 3A et une fréquence de 50 Hz (figure III.3.d.e et figure III.3.f.g) .

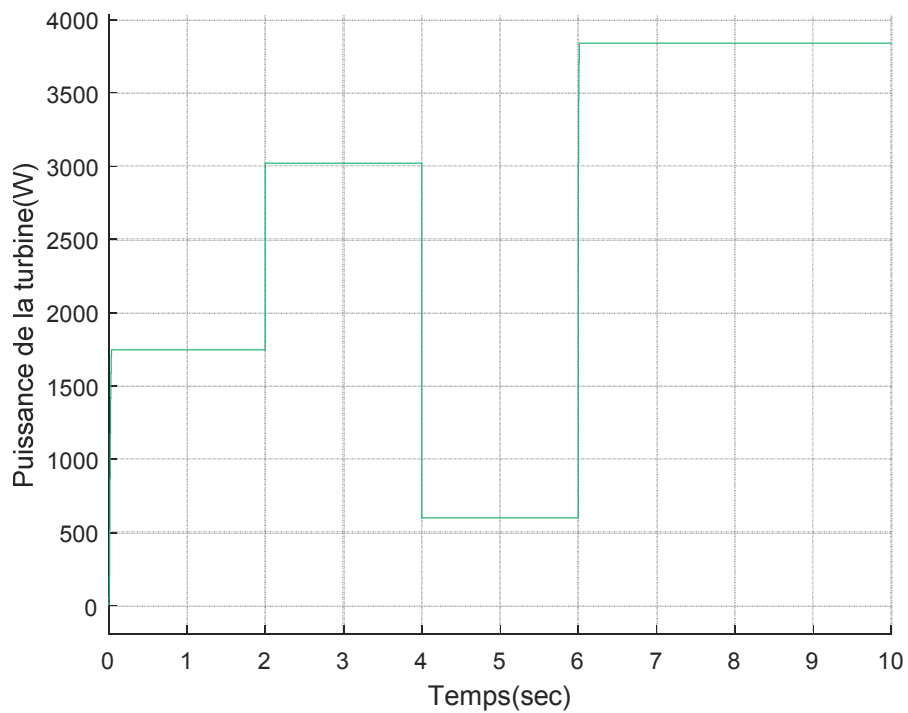
Dans la figure(III.3.h et figure III.3.i), on observe que les puissances active et réactive débitée par GSAP augmentent progressivement et se stabilisent autour de 898W et 11.2VAR respectivement après une valeur transitoire de 0.2 s.

III.3.2.Résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne à vitesse variable

(a) : Vitesse du vent

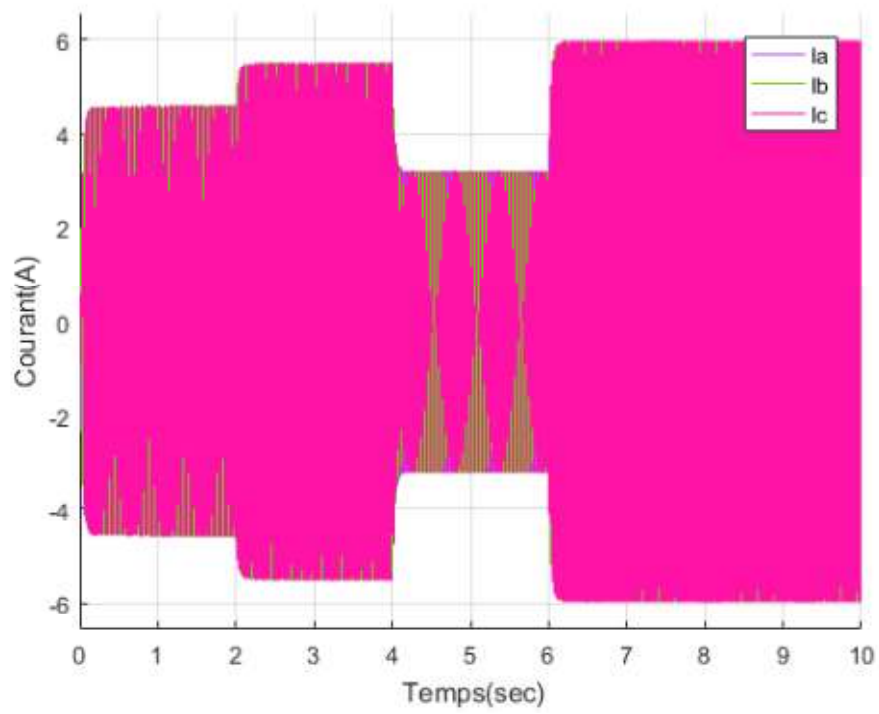


(b) : Coefficient de puissance C_p

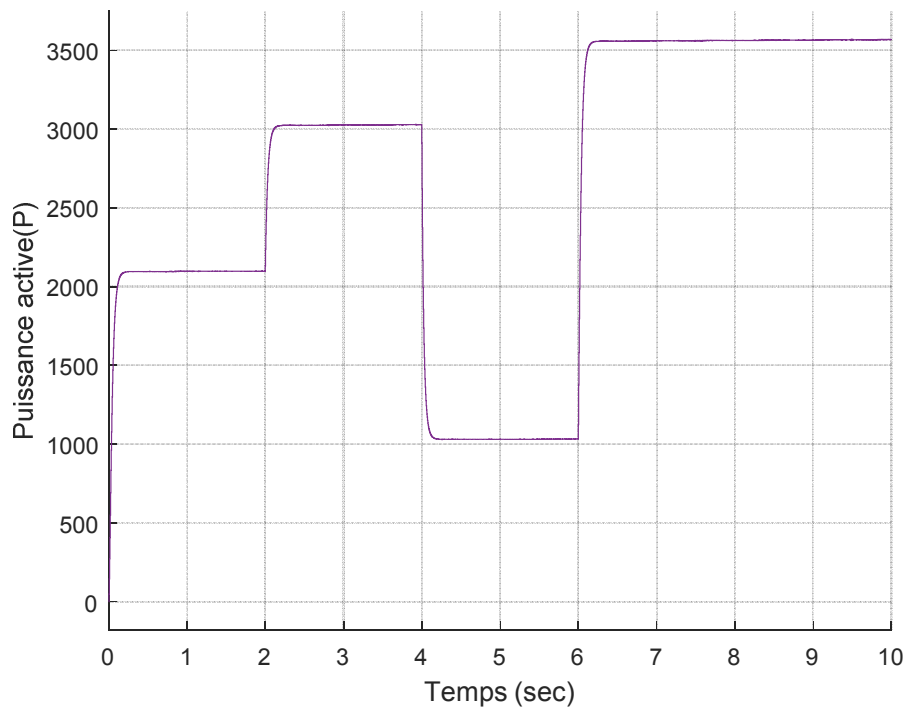


(c) : Puissance turbine

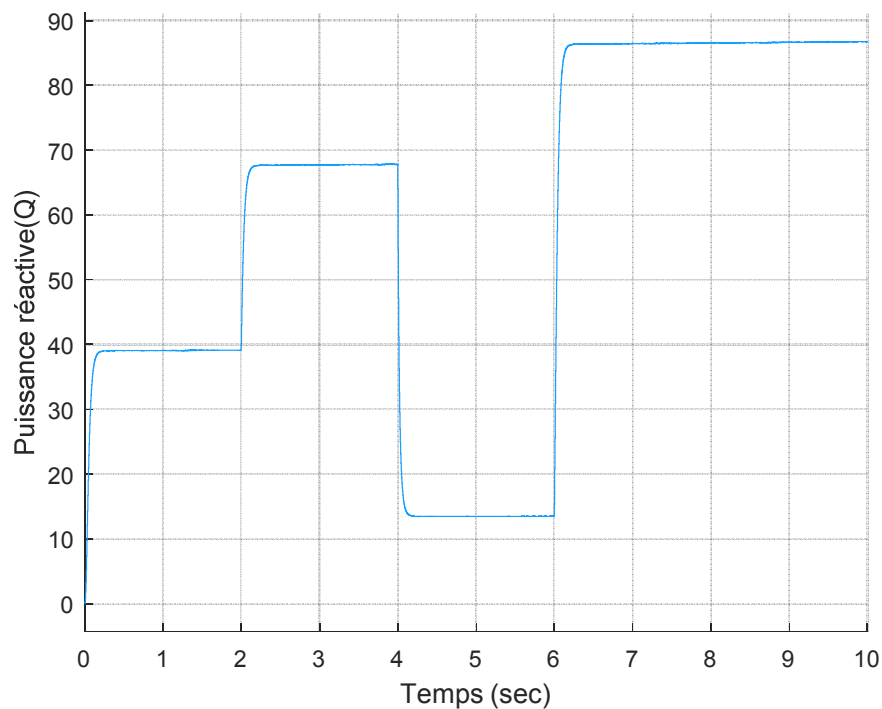
FIGURE III.4: Simulation de la partie mécanique vitesse variable



(d) : Courants statoriques I abc



(e) : La puissance active (P)



(f) : La puissance réactive (Q)

FIGURE III.5 : Simulation de la partie électrique à vitesse variable

❖ *Interprétation*

La figure (III.4) montre les résultats de simulation obtenus sous l'environnement Matlab/Simulink du comportement mécanique de la chaîne de conversion éolienne pendant le fonctionnement à vitesse variable.

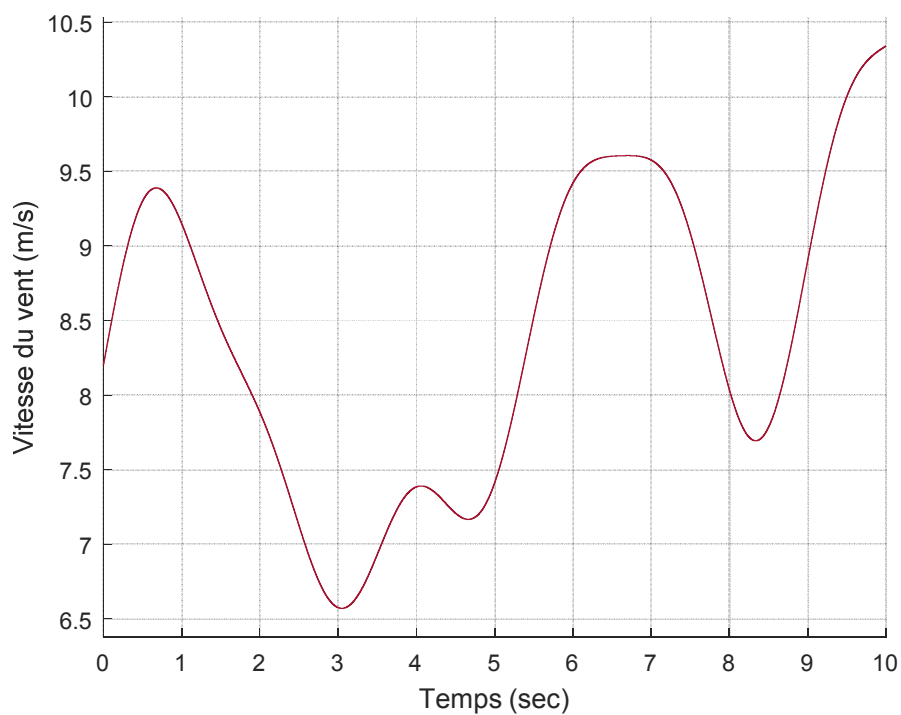
La figure (III.4.a) montre l'échelon de vitesse de vent d'où on a pris quatre valeurs constantes et différentes (10m/s de 0 à 2 s, 12 m/s de 2 à 4 s, 7m/s de 4 à 6 s et 13m/s de 6 jusqu'à 10 s).

On constate sur la figure (III.4.b) que le coefficient de puissance C_p est constant avec une valeur 0.39 dans le régime permanent après une période transitoire d'environ 6 s. Nous présentons dans la (figure III.4.c) la puissance mécanique fournie est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, donc il est clair que cette puissance varie selon la vitesse du vent avec une valeur maximale de 3800 W.

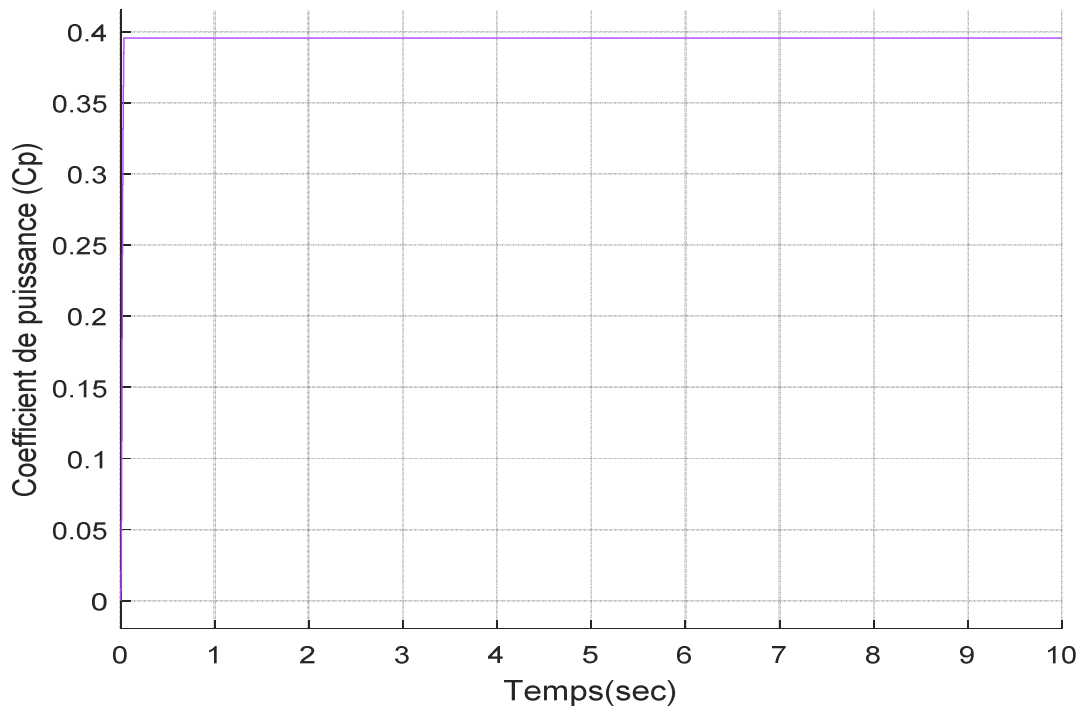
La figure (III.5) montre les résultats de simulation du comportement électrique (GSAP), donc on observe que les courants statoriques générés par la GSAP sont parfaitement sinusoïdaux et varient selon la vitesse du vent avec une valeur crête de 6 A (figure III.5.d).

En ce qui concerne les puissances active et réactive (les figures III.5.e et III.5.f) fournies par la GSAP, varient selon la vitesse du vent avec des valeurs maximales de 3600 W et 88 VAR,

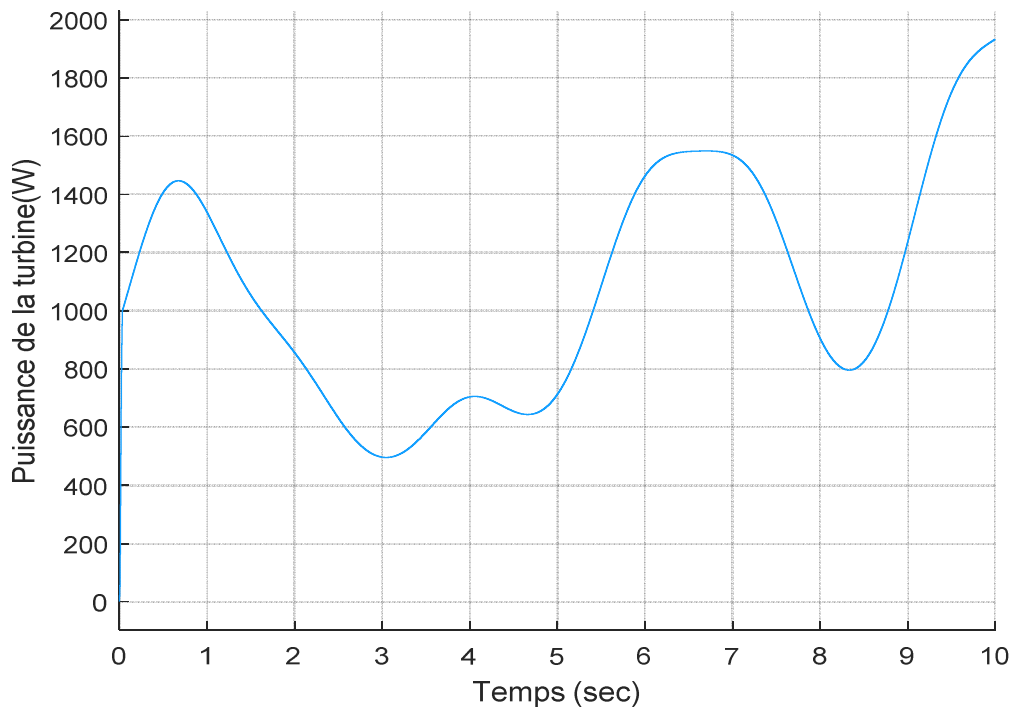
III.3.3. Résultats de simulation de la chaîne de conversion éolienne à vitesse aléatoire



(a) : La vitesse du vent

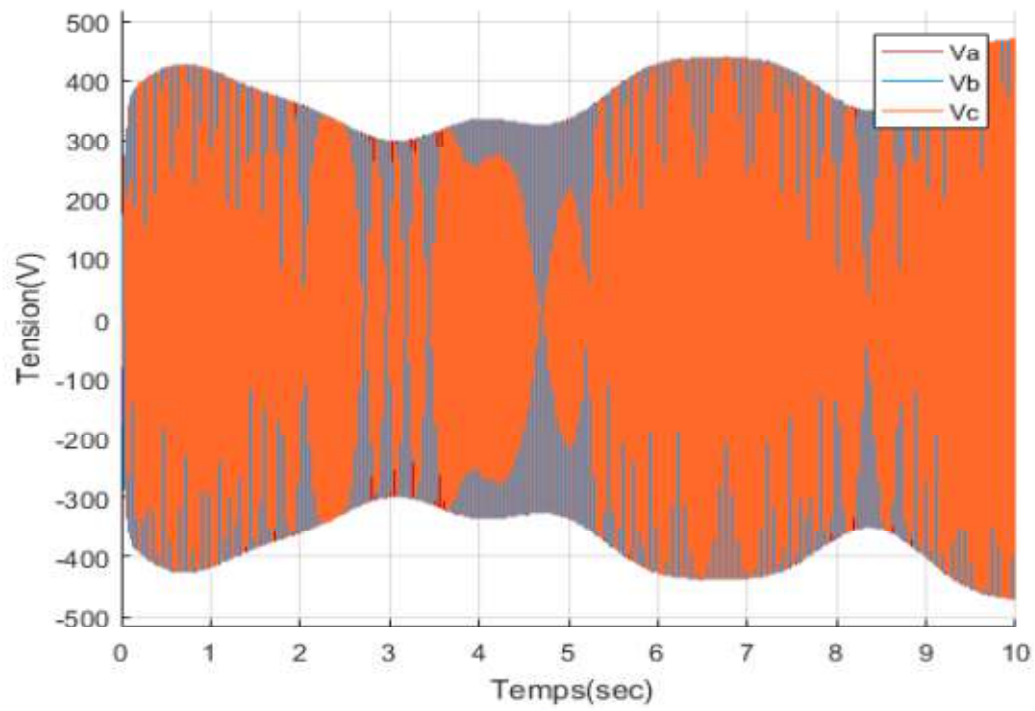


(b) : Coefficient de puissance(Cp)

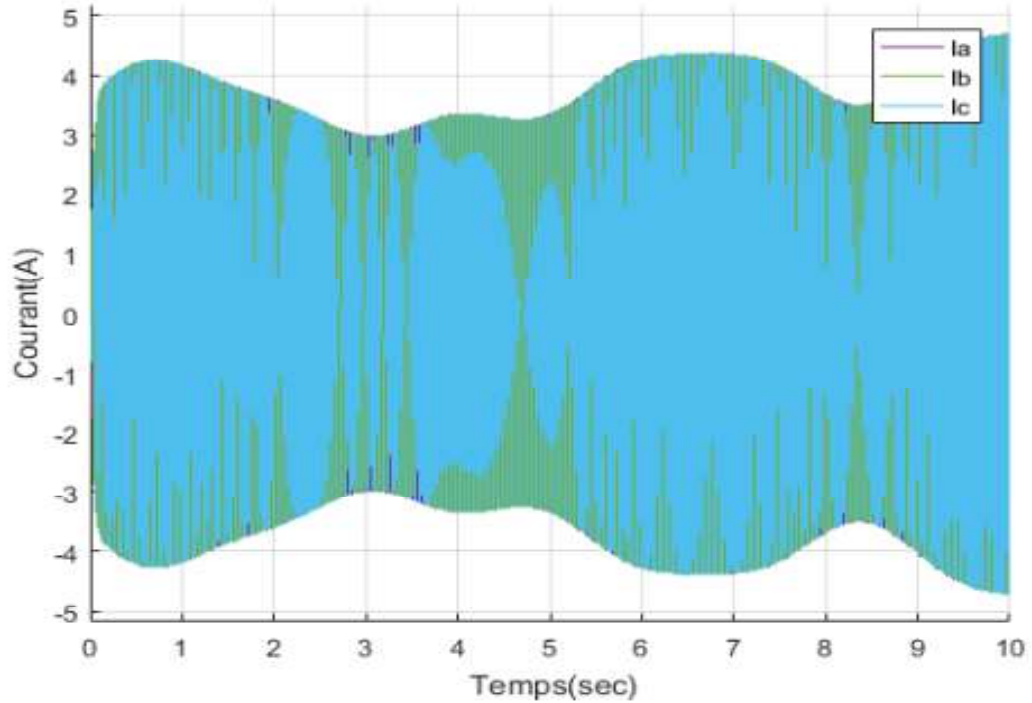


(c) : La puissance de la turbine

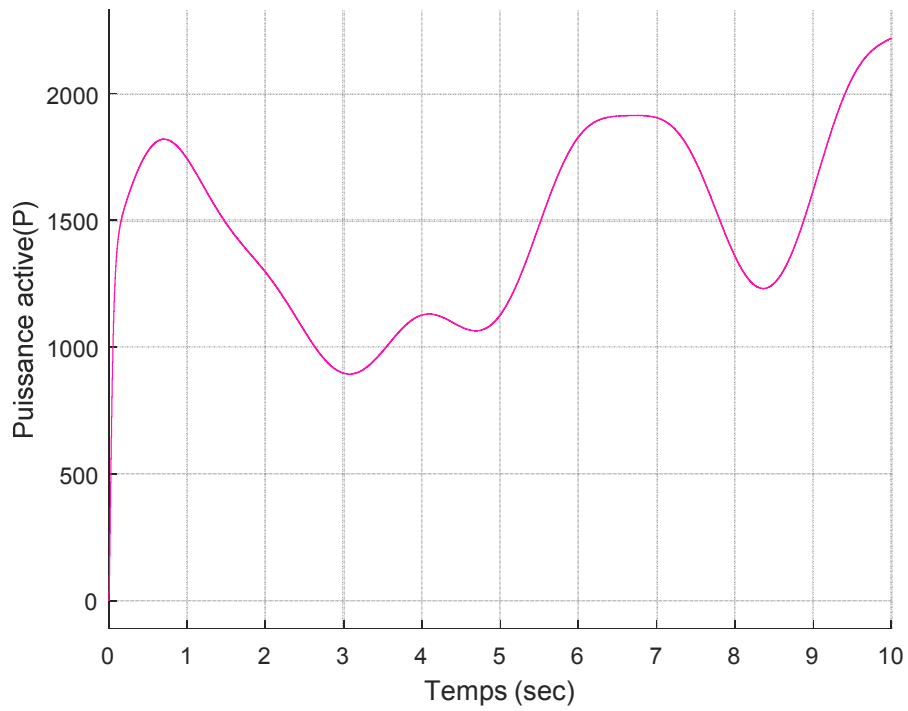
FIGURE III.6 : Simulation de la partie mécanique à vitesse aléatoire



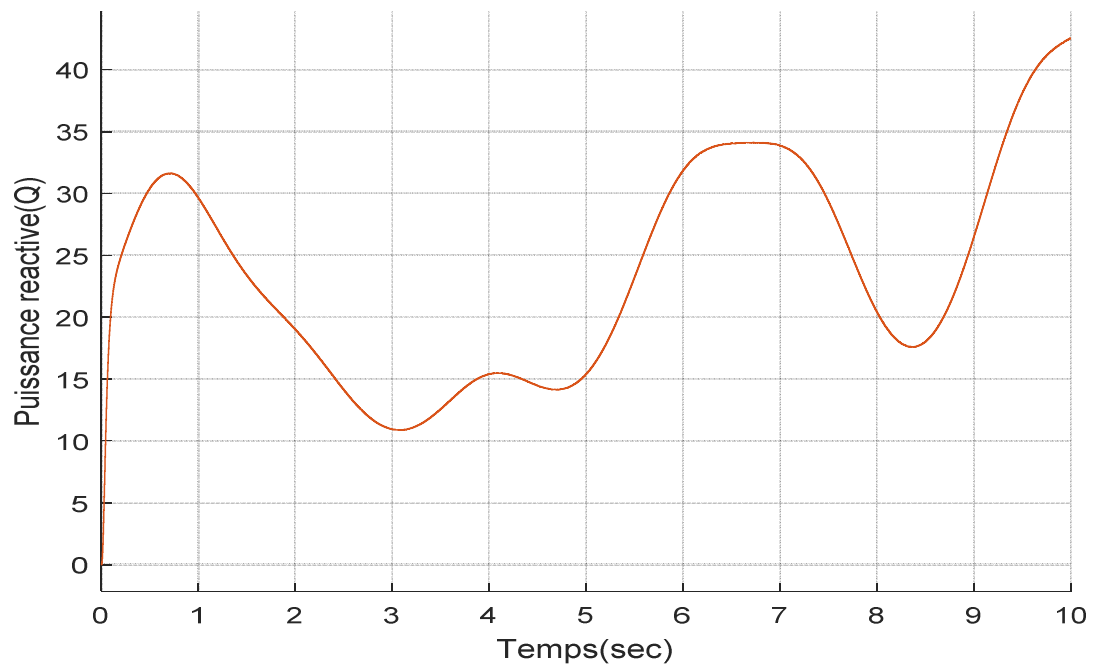
(d) : Tensions statoriques V abc



(e) : Courants statoriques I abc



(f) : La puissance active (P)



(g) : La puissance réactive (Q)

FIGURE III.7 : Simulation de la partie électrique à vitesse aléatoire

❖ Interprétation

On donne l'importance dans cette partie au cas de fonctionnement à vitesse du vent aléatoire (figure III.6.a), car c'est le cas le plus général qui reflète le fonctionnement réel de la turbine éolienne. On remarque que le coefficient de puissance C_p le coefficient de puissance est constant au régime permanent avec une valeur environ 0.39 (figure III.6.b). Une petite variation de la vitesse du vent introduit une grande variation de la puissance extraite car elle est proportionnelle au cube de la vitesse du vent (figure III.6.c) avec une valeur crête de 1950 W .

Concernant le fonctionnement à vitesse aléatoire de la GSAP (figure III.7) , dans la figure (III.7.d et III.7.e), on observe que la tension et le courant statorique généré par la GSAP sont des tensions et des courants sinusoïdaux avec des valeurs variables suivant la variation de la vitesse du vent. Ainsi les puissances débitées par la machine active et réactive (Figure III.7.f et figure III.7.g) possèdent la même allure que la puissance mécanique de la turbine, d'où elles ont pris des valeurs crêtes respectivement 2600 W, 43 VAR.

III.4. conclusion

L'essentiel de notre contribution est abordé dans le présent chapitre, à savoir la simulation de la chaîne de conversion. Les différents modèles étudiés sont conformes à la réalité. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons présenté la simulation de la génératrice GSAP pour voir le fonctionnement et la robustes de la machine

A partir des résultats de simulation de ce chapitre, on distingue que les tensions et les courants sont des grandeurs variables en fonction de la variation du vent.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'épuisement des énergies fossiles ainsi que la consommation intensive de l'électricité et aussi le problème majeur de préserver l'environnement, ont poussé plusieurs pays de s'orienter vers les ressources renouvelables et initier des programmes mondiaux afin de produire de l'énergie électrique, ce qui a conduit à un développement considérable dans le marché des énergies renouvelables.

Le travail présenté dans ce mémoire traite la modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice synchrone à aimants permanents fonctionnant en mode isolé.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne en rendant compte de l'état actuel de l'exploitation mondiale de ce créneau énergétique. Puis nous avons parlé des différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal leur principe de fonctionnement et leurs avantages et inconvénients. Nous avons également traité le fonctionnement des éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe.

Aussi dans ce chapitre, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie et modélisé la première partie de la chaîne éolienne, à savoir la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude.

Le deuxième chapitre concerne la modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents, fonctionnant à vitesse variable et fixe, à vide et en charge. Les machines synchrones à aimants permanents apportent une solution intéressante pour l'utilisation des énergies renouvelables, Ces machines présentent plusieurs avantages par rapport aux machines classiques notamment une durée de vie importante, un rendement élevé, une maintenance réduite, une fiabilité élevée et une bonne robustesse.

La structure de la GSAP à intégrer dans la chaîne de conversion éolienne et ses différents éléments ont été modélisés. L'étude de la génératrice synchrone à aimants permanents a été effectuée en détails et le modèle analytique a été établi sur la base des phénomènes électriques, magnétiques et mécaniques régissant son fonctionnement.

Conclusion générale et perspectives

Le troisième chapitre de ce mémoire a été consacré à la simulation de la chaîne de conversion. Un modèle de simulation a été mis au point pour prédire le comportement du système en entier. Nous avons étudié la chaîne de conversion éolienne, décrit les différents constituants de la chaîne de conversion et présenter les résultats de simulations qui sont développées sous environnement MATLAB/Simulink.

Perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire, amène à soulever les perspectives de recherche suivante :

- ❖ Etude des systèmes de production hybride tels que les systèmes (éolienne - photovoltaïque), (éolienne-diesel), (éolienne photovoltaïque–diesel), etc.
- ❖ Application des commandes pour l'énergie éolienne, par exemple, les modèles de simulation des aérogénérateurs à vitesse variable.
- ❖ Etudier les techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT).
- ❖ Etudier la gestion des systèmes, c.à.d. réaliser les optimisations sur des critères de minimisation du coût.

Annexes

Annexes

Annexe A

Paramètres de la chaîne de conversion éolienne

Paramètres de la turbine éolienne	La vitesse du vent	$V = 8$
	Masse volumique de l'air	$\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$
	Rayon de la turbine	$R = 8$
	La vitesse spécifique de vent	$\lambda = 8.1$
	Angle de calage	$\beta = 2$
Paramètres de la GSAP	Résistance statorique	$R_s = 8.1 \text{e-}3$
	Inductance directe	$L_d = 1.2 \text{e-}3 \text{ mH}$
	Inductance transversale	$L_q = 1.2 \text{e-}3 \text{ mH}$
	Moment d'inertie total	$J = 102.8 \text{ Kg.m}^2$
	Coefficient du frottement	$f_m = 0.0024 \text{ N.m.s-}1$
	Nombre de paires de pôles	$p = 125$
	Flux magnétique	$\varphi_f = 2.458 \text{ Wb}$
	Puissance nominale	$P = 1.0432 \text{ MW}$
	Tension nominale	$U = 649 \text{ V}$
	Courant nominal	$I = 928 \text{ A}$
	Résistance de charge	$R_{ch} = 50 \Omega$
	Inductance de charge	$L_{ch} = 0.002 \text{ H}$

Références bibliographiques

Références bibliographique

- [1] : **Benkhaled Bilal**, «Etude et Modélisation d'une Chaîne de Production Eolienne». Mémoire de fin d'études, master en génie électrique. Université de M'SILA 2012/2013
- [2] : **B. Boukhezzar**, « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable ». Thèse de Doctorat en Sciences, Université Paris XI ORSAY, 2006.
- [3] : **Khelfat Lotfi**, «Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée». Mémoire de master en électrotechnique, Université Badji Mokhtar –Annaba, juin 2017.
- [4] : www.liderconcept.ch/fr/?navi=2.energies_solaires/_2...
- [5] : **Mirecki Adem** «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance» .Thèse de doctorat en génie électrique, l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [6]: dinosoria.com/geothermie.htm.
- [7]: victoirekephale.wordpress.com/2014/06/06.
- [8]: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-fonctionnement-d-une-centrale-biomasse>
- [9]: www.bulipi-eee.tuiasi.ro/archive/2011/fasc.5/p14_f5_2011.pdf
- [10]: https://eolienne.f4jr.org/histoire_energie_eolienne
- [11]: <https://www.rtl.be/info/belgique/societe/l-annee-2018-qualifiee-d-historique-pour-l-eolien-en-mer-du-nord-1089472.aspx>
- [12] : **Mr. Kadid Ilyes Lotfi**, «Modélisation et simulation des différents aérogénérateurs éolien ». Master en électrotechnique. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, Juin 2018
- [13] : **Mr. Kadid Ilyes Lotfi**, «Modélisation et simulation des différents aérogénérateurs éolien ». Master en électrotechnique. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, Juin 2018
- [14] : **Mirecki Adem** «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance» .Thèse de doctorat en génie électrique, l'institut national
- [15]: <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-l-energie/produire-de-l-electricite/le-petit-eolien>
- [16]: <http://www.info-eolien.com/eoliennes-industrielles.html> polytechnique de Toulouse, 2005.
- [17] : **R. Hammouche**, «Atlas Vent de l'Algérie», Publication Interne de l'ONM, Office National de Météorologie, Alger, 1990]

Références bibliographique

- [18] :https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_003_07.pdf
- [19] : **Khelfat Lotfi**, «Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée». Mémoire de master en électrotechnique , Université Badji Mokhtar –Annaba, juin 2017.
- [20] :www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-l-algerie-ina... « L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 ».
- [21] :**Nachida Kasbadji Merzouk** , « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » .Thèse de doctorat. L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen 2006
- [22]:<https://energieplus-lesite.be/concevoir/eolien/considerer-l-aspect-economique-de-l-installation-d-une-eolienne/>
- [23]:**F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers**, « Wind Energy Explained : Theory ,Design and Application » . University of Massachusetts, Amherst, USA 2002.
- [24] :**F. Poitier**, « étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE, 2003.
- [25] :**N. Laverdure**, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.
- [26] :http://pmb.univ-saida.dz/butecopac/doc_num.php?explnum_id=276
- [27] :**Mesai Ahmed Hamza** «Commande de la machine asynchrone à double alimentation-apport des techniques de l'intelligence artificielle» .Mémoire de Fin d'Etudes en Génie Electrique, Université Djilali liabes, sidi bel-abbès ,2017.
- [28] :**Ziami Adnane** ; « optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimant permanents » ; conservatoire national des arts et métiers centre du Maroc ; 03/06/2014.
- [29] :**Mayouf Messaoud** ; « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents » .Université Hadj Lakhdar de Batna ; 20/04/2014
- [30]:**F. Poitiers, M. Machmoum, and R. Le Doeuff**, « Simulation of wind energy conversion system Based on a doubly-fed induction generator», In 10th European Conference on Power Electronics And Applications, Toulouse, France, September 2003.
- [31] : **Bellarbi Samir** ; « Estimation technico-économique de la production d'électricité par voie éolienne, intégrée aux réseaux interconnectés de transport électrique » .Thèse de doctorat en physique .Université Abou BekrBlkaid de Tlemcen.

Références bibliographique

- [32] :**Latreche Mohammed Tahar**, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» .Mémoire Magister en Électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif, 24 /06 /2012
- [33] :<http://www.info-eolien.com/eoliennes-vertical.html> [34] **Metatla Samir** ,«Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » .Mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009
- [35] :**Cherfia Naim** ,«Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens» .Mémoire Magister en Électrotechnique. Université Mentouri-Constantine, 2010.
- [36] :**Guy Cunty**, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », © Edissud, Aixen-Provence, 2001, www.edisud.com
- [37] :<http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index.htm>
- [38] :**P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [39] :**P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [40] :**Djeririr Youcef**, «Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle» .Thèse de Doctorat en électrotechnique. Université Djilali liabes, sidi bel-abbès, Novembre 2015
- [41] :**Mesai Ahmed Hamza**, «Commande de la machine asynchrone à double alimentation- apport des techniques de l'intelligence artificielle» .Mémoire de Fin d'Etudes en Génie Electrique. Université Djilali liabes, sidi bel-abbès ,2017.
- [42] :<https://www.hellowatt.fr/electricite-verte/stockage-energie-eolienne>
- [43] :**Latreche Mohammed Tahar**, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» .Mémoire Magister en Électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif, 24 /06 /2012
- [44] :**Arthouros Zervos, Sven Teske**, «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006» Septembre 2006
- [45] :**Haritza Camblong**, «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable» .Thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.
- [46] :**Toual Belkacem**, « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable».Mmémoire de magister. Université de Batna, 2010
- [47] :**Nicolas Laverdure**, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de Doctorat, l'INPG, Génie Electrique, 2005

Références bibliographique

- [48] :**A. Boyette**, « Contrôle – commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne ». Thèse de Doctorat en Génie Electrique. Université Henri Poincaré, Nancy I, 2006
- [49]:**A. Abdini, A. Nasiri**, « PMSG Wind Turbine Performances Analysis During Short Circuits»,IEEE Canada Electrical Conference, pp.165, Juin 2007
- [50]:**M.S.Mahgoun**. «Application De La Commande Aux Systèmes Linéaires Perturbés».Mémoire de Magister. Université ferhat abbas-Setif (UFAS), 2012
- [51]:**H.Aid, W.Aina**, «Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents». Mémoire de Master. Université abou bekr belkaid, Tlemcen, 2013
- [52] :**Benaicha Sabrina**, «Étude Théorique et Expérimentale d'une Génératrice Synchrone utilisée dans une Chaîne Eolienne à Axe Verticale». Magister en Electrotechnique . Université de Batna, le 25 Décembre 2014.
- [53] :**Bardadi Bendaha Mansour** ; « Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel» .Mémoire de magistère en électronique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran ; 04/02 /2015.
- [54]:**Hamecha Samira**, «Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » .Mémoire de Magister .
- [55]:**Boukais Boussad**, «contribution à la modélisation des systèmes couples machines convertisseurs : application aux machines à aimant permanents (BDCM-PMSM)». Thèse de doctorat à université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, Février 2012
- [56]:**B. Singh B.P. Singh, S. Dwivedi**, «A State of Art on Different Configurations of Permanent Magnet Brushless Machines» IE(I) Journal–EL, pp. 63-73, vol87, June 2006.
- [57] :**Lebsir Abdelkadir**, « Performances Comparées de Machines Synchrones à Aimants Permanents et à Réductance Variable Associées à une Chaîne de Conversion d'Energie Renouvelable ». Thèse de Doctorat en Electrotechnique. Université des Frères Mentouri Constantine, 29/05/2016
- [58] :**Yacine Daili** , « Contribution à la Commande d'une Petite éolienne Destinée à l'Electrification des Sites Isolés » . Thèse de Doctorat en Sciences . Université Ferhat Abbes de Sétif 1.
- [59]: **Meghlaoui Issam** , « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance à axe horizontal » .Mémoire de Magister .Université Bdji Mokhtar de Annaba ; 2009.

Références bibliographique

[60] : **Mayouf Messaoud** , « Etude comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents » .Université Hadj Lakhdar de Batna ; 20/04/2014

[61] : **A.Benchikh ,S.Moulai** , « Commande par DTC de la machine synchrone à aimants permanents application pour un système éolien » . Mémoire de Master. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès , Juin 2017

[62] : **F.Barret**, «Régimes transitoirs des machines tournantes électriques ».Editions Eyrolles, 1987.