

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AFRICAINE AHMED DRAIA ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES



Mémoire de Magister

Spécialité : Physique Energétique

Option : Modélisations et Simulation en Energétique

Présenté par : KHECHAB Bachir

Thème

Etude et modélisation d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA dans la région d'Adrar

Devant le jury :

Président	M^r HAMMOUDA Messaoud	Professeur à U. Adrar
Promoteur	M^r BENTOUBA Said	M.CA à U. Adrar
Examineur	M^r BENATIALLH Ali	Professeur à U. Adrar
Examineur	M^r TOUATI Boumediene	M.CA à U. Bechar

Année Universitaire 2014 / 2015

Dédicaces

Je dédie mon travail avant tout à mes chers Parents qui sont sacrifiés tout au long de ma vie, « Que Dieux me les protègent ».

À Ma chère femme qui m'a soutenu pendant toute la période

À Mes fils Abdeladjalil et Abdelhak

À Ma fille Dounia qui m'a aidé un peu pendant la rédaction

À Mes petits Fatma Zohra et Spécialement Nadir qui était toujours avec Moi durant la préparation du concours et pendant préparation de la thèse.

À Mes chers Frères

Abdelouahab ,Abdelali , Boumediene et Mohammed

À mes collègues de la promotion du Magister.

À tous les amis et tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce mémoire.

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mon remerciement et ma gratitude à mon encadreur Dr. BENTOUBA Said qui m'a aidé pour rendre ce travail effectif.

Mon remerciement également aussi à tous les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Pr.ALI BENATIALLAH

Pr.MESSAOUD HAMMOUDA

Dr.BOUMEDIENE TOUATI

Mon remerciement aussi à tous les enseignants qui m'ont enseigné durant cette période.

Mon remerciement aussi à Dr.ABDELHAMID KHECHAB de m'aider dans ce travail durant cette période.

Mon remerciement aussi à tous les enseignants qui ont donné le courage pour terminer ce travail.

Dr.BOUSMAHA BOUCHIBA

Mr.MAAMAR DAHBI

Mr.MOHAMMED HABAB

Dr.ISMAIL BOUSSERHANE

Enfin, je remercie aussi tous les personnes qui ont m'aidé de près ou de loin à la rédaction de ce travail Mr BOUCHOUICHA ,Mr :GHOUIZI et Mr.HOUARI DJABOURI et Mr.MOHAMMED MAHJOUBI.

ملخص

ان إنتاج الكهرباء من الوقود الأحفوري (الفحم والنفط أو الغاز) أو الانشطاري (اليورانيوم ...) تساهم إلى حد كبير في تدهور البيئة واستنزاف الموارد غير المتجددة. وبالتالي، واحدة من التدابير التي أعدت لتحقيق تطور أو تنمية مستدامة حقيقية هو زيادة حصة الموارد البديلة. فالبحث مستمر في مجال ما يسمى الطاقات المتجددة (الريحية ، الشمسية والحيوية)، التي لا تتضب وغير ملوثة، حيث أن هذه الأخيرة تمثل للجزائر احتياطي طاقي بديل جد مهم. فاليوم، من بين هذه الطاقات، أصبحت طاقة الرياح حل مستدام لإنتاج الطاقة، بالإضافة إلى غيرها من مصادر الطاقات المتجددة.

الهدف في هذه المذكرة هو دراسة ونمذجة نظام طاقة بالرياح على أساس المولد ثنائي التغذية غير المتزامن. سنجري تحليل وتقييم الأداء الديناميكي وجودة الطاقة مع نظام نمذجة بدلالة كمية الطاقة و مع بيانات طاقة الرياح بمنطقة أدرار و هذا عن طريق المحاكاة العددية باستخدام المعطيات من البيئة الصحراوية .

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، نظام طاقة بالرياح، المولد ثنائي التغذية غير المتزامن، نمذجة، حقل الرياح، تحويل طاقة الرياح

Résumé

La production d'électricité à partir des ressources fossiles (charbon, pétrole ou gaz) ou fissiles (uranium,...) participe très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ces ressources non renouvelables. C'est pourquoi, l'une des mesures est préparée pour un développement ou croissance réellement durable consiste à accroître la part de ressources alternatives. La recherche est en cours dans le domaine des énergies dites renouvelables (éolienne, solaire, bioénergie), inépuisables et non polluantes, telque elles pourraient constituer pour l'Algérie une réserve énergétique alternatives intéressante. De nos jours, parmi ces énergies, l'énergie éolienne est devenue une solution durable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables.

L'objectif dans ce mémoire est de faire une étude et modélisation d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Nous procéderons à l'analyse et l'évaluation des performances dynamiques et la qualité d'énergie avec modélisation du système en fonction de la charge proposée et les données du vent à Adrar de ce système par des simulations numériques en utilisant les paramètres du milieu saharien.

Mots clés : Energie renouvelable, système éolien , génératrice asynchrone à double alimentation, modélisation, gisement du vent et conversion d'énergie éolienne.

Abstract

The production of electricity from fossil fuels (coal, oil or gas) or fossils (uranium ...) largely involved in environmental degradation and the depletion of non-renewable resources. Therefore, one of the measures is prepared for a truly sustainable development or growth is to increase the share of alternative resources. The research is ongoing in the field of so-called renewable energy sources (wind, solar, bio-energy), inexhaustible and non-polluting, such as they could be for an interesting alternative Algeria energy reserve. Today, among these energies, wind energy has become a sustainable solution for energy production, in addition to other renewable energy sources.

The objective in this memoir is to study and modeling of a wind energy system based on an asynchronous generator (Doubly fed induction generator : DFIG) .We will proceed the analysis and evaluation of dynamic performance and quality with energy modeling system based on the proposed load and wind data at Adrar of this system by numerical simulations using the parameters of the Saharan environment.

Key words: Renewable energy, wind system, doubly fed induction generator , modeling, wind field and wind energy conversion.

Table de matières

Dédicace	i
Remerciements	2i
Résumé	3i
Table de matières	4i
Liste des figures	8i
Liste des tableaux	11i
Notations	12i
Liste des symboles	13i
Introduction générale	1
Chapitre I: Energies renouvelables	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Généralités	3
I.2.1. Statistiques production d'électricité totale mondiale	4
I.2.2. Statistiques production d'électricité mondiale d'origine renouvelable.....	5
I.2.3. Les énergies renouvelables en Algérie.....	6
I.3. Types des Énergies renouvelables	9
I.3.1. Énergie solaire	9
I.3.1.1. Énergie solaire à concentration thermodynamique	11
I.3.1.2. Énergie solaire photovoltaïque	11
I.3.1.3. Énergie solaire thermique	13
I.3.2. Énergie géothermie	14
I.3.3. Énergie hydraulique	18
I.3.4. Énergie de la biomasse.....	21
I.3.5. Énergie éolienne.....	24
I.4 Conclusion.....	27
Chapitre II: Énergie éolienne	
II.1. Introduction	28
II.2. Historiques et statistiques	29
II.2.1. Historiques.....	29
II.2.2. Statistiques.....	31
II.3. Gisement d'énergie éolienne.	32
II.3.1. En algérie.....	32
II.3.2. Classement du site	35
II.4. Évaluation des ressources éoliennes.....	36
II.4.1. Analyse des données de la vitesse moyenne du vent	36
II.4.1.a Evolution de la vitesse du vent site adrar	36
II.4.2. Distribution de la vitesse du vent	37
II.4.3. Extrapolation verticale des vitesses du vent	39

II.4.4. Densité de puissance éolienne	40
II.5. Critères de choix de sites éoliens.....	41
II.5.1. La nature du sol	41
II.5.2. L'accessibilité du site	41
II.5.2. Connexion au réseau électrique	41
II.6. Présentation du système éolien.....	42
II.6.1. Description d'une éolienne	42
II.6.2. Principe de fonctionnement	42
II.7. Différents types d'aérogénérateurs	43
II.7.1. Les éoliennes à axe horizontale	43
II.7.2. Les éoliennes à axe vertical.....	44
II.8. Principales composantes d'une éolienne	45
II.8.1. Le mat	45
II.8.2. Les pales	46
II.8.3. La fondation.....	46
II.8.4. La nacelle.....	46
II.9. Classement de différentes technologies d'éoliennes	46
II.9.1. Fonctionnement à vitesse fixe	46
II.9.2. Fonctionnement à vitesse variable.....	47
II.10. Endroit des parcs éoliens	48
II.11. Application des éoliennes dans les systèmes.....	49
II.11.a. Systèmes isolés	49
II.11.b. Systèmes hybrides	50
II.11.c. Systèmes liés au réseau.....	50
II.12. Avantages et Désavantages de l'énergie éolienne	50
II.12.a. Avantages de l'énergie éolienne	50
II.12.b. Inconvénients de l'énergie éolienne	51
II.13. Puissance d'une éolienne en fonction du vent.....	51
II.14. Coefficient de Puissance pour différents types d'éoliennes	52
II.15. Principe de fonctionnement d'une pale	53
II.15.a. Description d'une pale d'éolienne	53
II.15.b. Modes de régulation de vitesse.....	53
II.15.c. Systèmes à décrochage aérodynamique « stall »	54
II.15.d. Systèmes à décrochage aérodynamique « pitch ».....	55
II.16. Principe de la conversion d'énergie mécanique-électrique.....	55
II.16.a. Machine synchrone	56
II.16.b. Machine asynchrone	57
II.16.c. Modes de fonctionnement.....	60
II.17. Conclusion	62

Chapitre III: Modélisation du système éolien

III.1. Introduction	64
III.2. Modélisation du système éolien	65
III.2.1. Généralité sur la modélisation	65
III.2.2. Le système éolien	65
III.2.3. Modélisation de la chaîne du système éolien	65
III.3. Modélisation de la conversion d'énergie éolienne	67
III.3.1. Modélisation de la partie électrique	75
III.4. Configurations	78
III.4.1. Configuration pour fonctionnement moteur	78
III.4.2. Configuration pour fonctionnement génératrice	79
III.5. Modélisation d'alimentation du rotor par le convertisseur	80
III.5.1. Modélisation du redresseur triphasé à diodes	81
III.5.2. Modélisation du filtre	82
III.5.3. Modélisation de l'onduleur	83
III.5.4. Modulation largeur d'impulsion MLI	86
III.6. Conclusion	88

Chapitre IV: Simulations et Résultats

IV.1. Introduction	89
IV.2. Objectif de la simulation	90
IV.3. Logiciel utilisé pour la simulation	90
IV.4. Schémas de simulation de la machine choisie	91
IV.5. Types d'éolienne choisie	92
IV.5.1. Fonctionnement de l'éolienne	92
IV.5.2. Les paramètres de la génératrice GADA utilisée	92
IV.6. Utilisation de convertisseur statique pour l'alimentation	93
IV.7. La chaîne de conversion alimentation	93
IV.8. Les différents paramètres visualisés pendant la simulation	94
IV.9. Résultats de la simulation	95
IV.9.1. Résultats de la Simulation partie mécanique	95
IV.9.1.a Le coefficient de puissance C_p	95
IV.9.1.b Le Couple de la turbine C_t	96
IV.9.1.c Le couple électromécanique C_e	96
IV.9.1.d La vitesse de la turbine Ω_t	97
IV.9.2.e La vitesse mécanique Ω_m	97
IV.9.2.f La vitesse rotor W_r	98
IV.9.2. Résultats de la Simulation partie électrique	99
IV.9.2.a La tension stator V_{sa}	99
IV.9.2.b Le courant du stator I_{sa}	99

IV.9.2.c La tension rotor V_{ar}	100
IV.9.2.d Le courant rotor I_{ar}	101
IV.9.2.e La puissance P_s	102
IV.9.3. Résultats de la Simulation partie convertisseur	103
IV.9.3.a Les tensions entrée redresseur V_{abc}	103
IV.9.3.b La tension redressée V_{red}	103
IV.9.3.c La tension filtrée V_{dc}	104
IV.9.3.d Les tensions redressée V_{red} et filtrée V_{dc}	105
IV.9.2.e La tension sortie onduleur V_{ond}	105
IV.10. Conclusion	106
Conclusion & perspectives	107
Annexes	109
Références bibliographiques	114

Liste des figures

Chapitre I

Figure I-1 Structure de la production d'électricité mondiale – 2012	4
Figure I-2 Structure de la production électrique d'origine renouvelable–2012	5
Figure I-3 Taux d'évolution ENR dans la production nationale en WH.....	6
Figure I-4 Centrale thermique solaire avec stockage	8
Figure I-5 Répartition de la production solaire par région.....	10
Figure I-6 Schéma d'une installation photovoltaïque connectée au réseau	12
Figure I-7 Capacité mondiale totale photovoltaïque solaire 1995-2011	12
Figure I-8 Répartition de la production géothermique par région	15
Figure I-9 Schéma de principe de fonctionnement géothermique	17
Figure I-10 Répartition de la production hydraulique par région	18
Figure I-11 Coupe transversale d'un barrage hydroélectrique.....	20
Figure I-12 Répartition de la production de la biomasse par région	21
Figure I-13 Schéma de principe d'une usine Biomasse.....	23
Figure I-14 Production d'éthanol et de biodiesel en 2000-2011	24
Figure I-15 Répartition de la production éolienne par région	25
Figure I-16 Schéma de principe de fonctionnement éolien.....	26

Chapitre II

Figure II-1 Eolienne d'Adrar	30
Figure II-2 Eolienne de 100kw de Grand Vent.....	30
Figure II-3 Puissance installée éolienne par 07 principaux pays	31
Figure II-4 Puissance installée éolienne par 15 pays suivants	32
Figure II-5 Carte des vents en Algérie	33
Figure II-6 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	34
Figure II-7 Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.....	34
Figure II-8 la vitesse mensuelle moyenne.....	36
Figure II-9 Histogramme et distribution de Weibull des vitesses du vent.....	39
Figure II-10 Conversion de l'énergie éolienne du vent	42
Figure II-11 Eoliennes à axe horizontal.....	44
Figure II-12 Les éoliennes à axe vertical	45
Figure II-13 Principales composantes d'une éolienne	45
Figure II-14 Eolienne connectée au réseau	47
Figure II-15 Eoliennes à vitesse variable.....	48
Figure II-16 Les parcs éoliens offshore (a) et onshore (b).....	49
Figure II-17 Puissance d'une éolienne en fonction du vent.....	51

Figure II-18	Coefficient de puissance pour types d'éoliennes.....	52
Figure II-19	Bilan des forces sur une Pale d'éolienne.....	53
Figure II-20	Modes du système de régulation.....	53
Figure II-21	Flux d'air sur un de pales profile (stall).....	54
Figure II-22	Variation de l'angle de calage d'une pale.....	55
Figure II-23	Eolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à rotor bobiné.....	56
Figure II-24	Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	58
Figure II-25	Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	59
Figure II-26	Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.....	60
Figure II-27	Fonctionnement de la Mada en Moteur hypo-synchrone.....	60
Figure II-28	Fonctionnement de la MADA en Moteur hyper-synchrone.....	61
Figure II-29	Fonctionnement de la MADA en Génératrice hypo-synchrone.....	61
Figure II-30	Fonctionnement de la DFAM en Génératrice hyper-synchrone.....	62

Chapitre III

Figure III-1	Système éolien basé sur une MADA.....	65
Figure III-2	Schéma de configuration de la turbine éolienne.....	66
Figure III-3	Modélisation du système de production éolienne sous simulink.....	67
Figure III-4	tube de courant autour d'une éolienne.....	67
Figure III-5	Modèle de la turbine éolienne $C_p(\gamma, \beta)$	69
Figure III-6	Modèle de la turbine éolienne $C_p(\gamma)$	69
Figure III-7	Coefficient de puissance.....	70
Figure III-8	$C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β	72
Figure III-9	Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne.....	75
Figure III-10	Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application moteur.....	79
Figure III-11	Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice.....	79
Figure III-12	Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.....	81
Figure III-13	Schémas du redresseur triphasé à diodes.....	81
Figure III-14	Schémas du filtre passe-bas.....	82
Figure III-15	Schéma de principe d'un onduleur triphasé alimentant le rotor d'une MADA.....	84
Figure III-16	Association redresseur-filtre-onduleur de tension.....	84
Figure III-17	Principe fonctionnement de la technique MLI trian-sinusoïd à une porteuse.....	87

Chapitre IV

Figure IV-1	Schéma bloc de Simulation.....	91
Figure IV-2	Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.....	93
Figure IV-3	Coefficient de puissance.....	95
Figure IV-4	Couple de la turbine C_t	96
Figure IV-5	Couple électromécanique C_e	96

Figure IV-6 Vitesse de la turbine Ω_t	97
Figure IV-7 Vitesse mécanique Ω_m	97
Figure IV-8 Vitesse du Rotor ω_r	98
Figure IV-9 Tension stator V_{as}	99
Figure IV-10 Courant stator i_{as}	99
Figure IV-11 Tension rotor V_{ar}	100
Figure IV-12 Courant rotor i_{ar}	101
Figure IV-13 Puissance de la charge P_s	102
Figure IV-14 Tensions entrée redresseur V_{abc}	103
Figure IV-15 Tension redressée V_{red}	103
Figure IV-16 Tension filtrée V_{dc}	104
Figure IV-17 Tension redressée V_{red} et Tension filtrée V_{dc}	105
Figure IV-18 Tension sortie onduleur V_{ond}	105

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 Production électrique mondiale par source	4
Tableau I-2 Production d'électricité mondiale d'origine renouvelable en 2012.....	5
Tableau I-3 Principaux pays producteurs d'électricité solaire.....	10
Tableau I-4 Principaux pays producteurs d'électricité géothermique – 2012.....	16
Tableau I-5 Principaux pays producteurs en hydroélectricité – 2012.....	19
Tableau I-6 Principaux pays producteurs électricité à partir de la biomasse.....	22
Tableau I-7 Principaux pays producteurs d'électricité éolienne.....	25

Chapitre II

Tableau II-1 Catégories de la vitesse de vent (Echelle Beaufort).....	35
Tableau II-2 Distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées.....	37
Tableau II-3 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement	40
Tableau II-4 Classification des turbines éoliennes	44

Chapitre IV

Tableau IV-1 Paramètres de l'éolienne choisie	92
--	----

Notations

EnR	.....	Energies renouvelables
CREDEG	.....	Centre de recherche et développement de l'électricité et du gaz
APRUE	.....	Agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie
CDER	.....	Centre de développement des énergies renouvelables
UDTS	.....	Unite de Developpement de la Technologie du Silicium
ADEME	.....	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
ONM	.....	l'office national de métrologie
MS	.....	Machine synchrone
MSAP	.....	Machine synchrone à aimant permanent
MAS	.....	Machine asynchrone
MADA	.....	Machine Asynchrone à double alimentation
Vestas	.....	Fabricant des éoliennes
GAMESA	.....	Fabricant des éoliennes
DFAM	.....	Doubly Fed Induction Machine
GADA	.....	Génératrice Asynchrone à double alimentation
MLI	.....	Modulation de Largeur d'Impulsion
IGBT	.....	Insulated Gate Bipolar Transistor
GTO	.....	GateTurn Off
MATLAB	.....	Logiciel destiné au calcul scientifique

Liste des symboles

$f(v)$	.....	La densité de probabilité
k	.....	Le facteur de forme
c	.....	Le facteur d'échelle
v	.....	La vitesse moyenne du vent
σ	.....	L'écart type
$P(v)$	.....	La puissance moyenne produite par un aérogénérateur
$V(h)$	.....	La vitesse vent en fonction de la hauteur moyeu d'éolienne
$V(h_{mes})$	.....	La vitesse vent en fonction de la hauteur mesurée d'éolienne
h	.....	La hauteur du moyeu éolienne
h_{mes}	.....	La hauteur mesurée d'éolienne
α	.....	La rugosité de la surface et de la stabilité atmosphérique
P	.....	La densité de puissance moyenne disponible
ρ	.....	La densité de l'air
V	.....	La vitesse du vent
R	.....	Le rayon du rotor
β	.....	L'angle de calage
Ω_t	.....	La vitesse de la turbine
C_t	.....	Le couple de la turbine
P_t	.....	La puissance de la turbine
G	.....	Le rapport de multiplication
C_m	.....	Le couple mécanique
Ω_m	.....	La vitesse mécanique
P_m	.....	La puissance mécanique
C_{em}	.....	Le couple électromécanique
$V1$	.....	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
$V2$	.....	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
V_m	.....	La vitesse moyenne entre $V1$ et $V2$
S	.....	La surface balayée par l'éolienne
$P_{éolienne}$	.....	La puissance extraite par l'éolienne
C_p	.....	Le coefficient de puissance
γ	.....	Le rapport de vitesse ou vitesse spécifique
J	.....	L'inertie totale des parties tournantes
f	.....	Le coefficient de frottements visqueux
C_T	.....	Le couple total de l'éolienne

Ω_s	La vitesse d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine
ω_s	La pulsation du réseau d'alimentation triphasé
P	Le nombre de paire de pôles du champ magnétique
θ	L'angle entre le repère statorique et le repère rotorique
U_{sd}, U_{sq}	La tension statorique exprimée dans le repère de Park sur les axes d et q
U_{rd}, U_{rq}	La tension rotorique exprimée dans le repère de Park sur les axes d et q
i_{dr}, i_{qr}	Le courant rotorique exprimé dans le repère de Park sur les axes d et q
i_{ds}, i_{qs}	Le courant statorique exprimé dans le repère de Park sur les axes d et q
r_s	La résistance de chaque enroulement du stator
r_r	La résistance de chaque enroulement du rotor
ω_{os}	La pulsation du stator
ω_{or}	La pulsation du rotor
ω_m	La différence entre les pulsations
Φ_{sd}, Φ_{sq}	Le flux statorique exprimé dans le repère de Park sur les axes d et q
Φ_{rd}, Φ_{rq}	Le flux rotorique exprimé dans le repère de Park sur les axes d et q
L_s	L'inductance propre de chaque enroulement du stator
L_r	L'inductance propre de chaque enroulement du rotor
M_{rs}, M_{sr}, M	L'inductance mutuelle entre les enroulements stator et rotor
$D1, D2, D3$	Trois diodes à cathode commune
$V_a(t), V_b(t)$ et $V(t)$	Trois sources triphasées
V_{max}	Tension max de la source
V_{red}	La tension redressée
L_f, C_f	Les paramètres du filtre
V_{dc}	La tension filtrée
$F(s)$	La fonction de transfert
f_c	La fréquence de coupure
f'	La fréquence de la tension redressée V_{red}
K_{11}, K_{12} et K_{13}	interrupteurs bi-commandable (à l'ouverture et à la fermeture)
K_{21}, K_{22} et K_{23}	interrupteurs bi-commandable (à l'ouverture et à la fermeture)
V_{ref}	La tension de référence
V_p	La tension porteuse
V_{ab}, V_{bc} et V_{ca}	Les trois tensions composées
V_{ao}, V_{bo} et V_{cao}	Les trois tensions entrée de l'onduleur en continu
V_{an}, V_{bn} et V_{cn}	Les trois tensions sortie onduleur
T	La matrice du transfert(modélisation de l'onduleur)
V_{mod}	L'indice d'amplitude
f_p	La fréquence de la porteuse
f_m	La fréquence de la modulante

Introduction générale

L'augmentation de la demande énergétique de plus en plus est le grand défi qu'affronte le monde de nos jours. L'accroissement rapide de l'activité industrielle dans les pays développés et l'investissement des entreprises dans les pays qui assurent un coût de production moins élevé a accru très rapidement la demande mondiale d'énergie. Cette augmentation se traduit, en réalité, par une augmentation des prix des hydrocarbures et diminution du stock mondial du pétrole et du gaz et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement.

Tous ces inconvénients ont poussé les chercheurs de réduire leur exploitation donc pallier à leurs problèmes, en faisant appel aux énergies dites " renouvelables" (éolienne et solaire).

Ces nouvelles formes d'énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre.

Parmi les nouvelles sources d'énergies, l'éolienne apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable.

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

Compte tenu de ces aspects, plusieurs efforts théoriques et expérimentales ont été effectués dans ces dernières années afin de mieux comprendre cette technologie (éolienne) d'une part et d'augmenter la puissance et le rendement de conversion d'autre part.

L'objectif de notre travail est dans ce cadre, ou nous intéressons à l'étude et la modélisation d'un système éolien basé sur une génératrice à double alimentation au site d'ADRAR.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres.

Le premier chapitre présente un rappel sur les énergies renouvelables et les statistiques sur la structure de la production d'électricité mondiale et la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable, ainsi que les types d'énergies renouvelables y compris la répartition et l'évolution de la production de chaque énergie renouvelable par région.

Dans Le deuxième chapitre, on présentera des généralités sur le système éolien : gisement éolien en Algérie, description du système, applications, classification, suivi par des généralités sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation du système éolien, où on décrit en détail les équations de base qui permettra de simuler le modèle théorique. Dans ce modèle, la génératrice est alimentée par deux sources triphasées sinusoïdales parfaites; l'une au niveau du stator et l'autre au niveau du rotor.

Nous présentons dans le quatrième chapitre les résultats de simulations ainsi que leurs interprétations.

Nous clôturons notre manuscrit par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

I-1 Introduction

La réserve mondiale du pétrole diminue de plus en plus et dans les années qui suivent il n'y aura pas assez du pétrole pour couvrir la demande. Le climat de la terre évolue vers le négatif et les sources naturelles d'eau se diminuent [01].

L'utilisation des sources conventionnelles est alors limitée ou n'est pas encouragée pour des raisons liées à l'environnement. Pour toutes ces raisons le monde se dirige vers les sources renouvelables, le soleil, le vent, les courants sous-marins et d'autres pour produire de l'électricité. Actuellement l'électricité renouvelable ne fait qu'une petite partie de l'énergie produite mais cette partie va augmenter de plus en plus, la source principale de ce type d'énergie est le soleil.

Ce chapitre permet de présenter d'abord le contexte d'une idée générale sur les énergies renouvelables et les différents types, ensuite on voit quelques statistiques sur la production d'électricité mondiale et après on intéresse aux statistiques mondiales de chaque énergie renouvelable. Enfin on termine par une petite conclusion. Vu l'importance des énergies renouvelables on s'intéressera dans le second chapitre à la description et généralité sur le système éolien.

I-2- Généralités

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse et géothermie) sont des sources d'énergie qui se renouvellent assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. D'une façon générale, elles sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités.

On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, biomasse et la géothermie génèrent certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles [02].

I-2-1 Statistiques production d'électricité totale mondiale

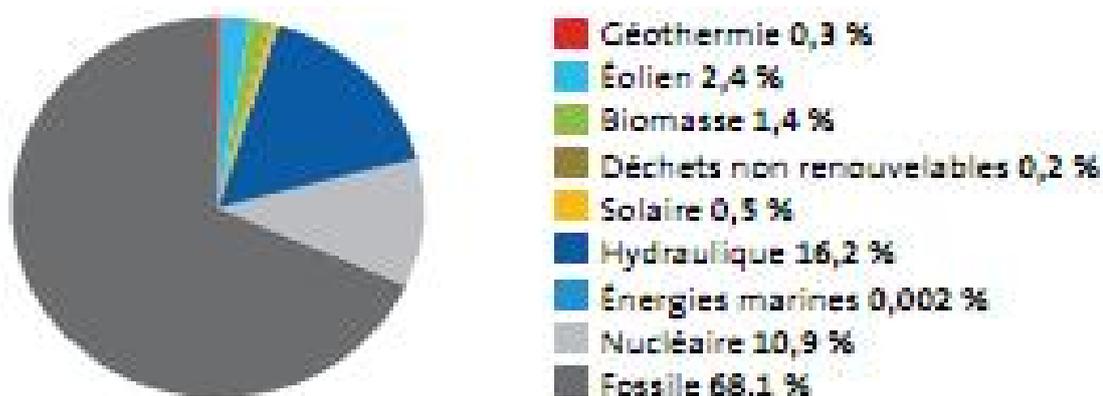


Figure I-1 Structure de la production d'électricité mondiale – 2012 [03]

Tableau I-1 Production électrique mondiale par source [03]

TWh	2002	2009	2010	2011	2012
Géothermie	52,2	67,4	68,5	69,3	70,4
Eolien	52,5	276,4	351,2	451,5	534,3
Biomasse	147,1	246,8	288,9	307,6	326,2
Solaire	1,7	21,0	33,5	63,1	104,5
Hydraulique	2705,9	3329,0	3514,3	3530,8	3663,4
Energies marines	0,568	0,527	0,558	0,561	0,540
Total renouvelables	2960,1	3941,2	4256,9	4423,0	4699,2
Nucléaire	2660,8	2696,1	2756,3	2580,9	2463,5
Fossile	10512,4	13500,7	14422,7	15113,0	15394,3
Déchets non renouvelables	40,5	40,1	52,0	55,7	56,0
Total conventionnel	13213,7	16236,9	17231,0	17749,6	17913,8
Total production	16173,8	20178,1	21487,9	22172,5	22613,0
Part renouvelable	18,3%	19,5%	19,8%	19,9%	20,8%

I-2-2 Statistiques production d'électricité mondiale d'origine renouvelable

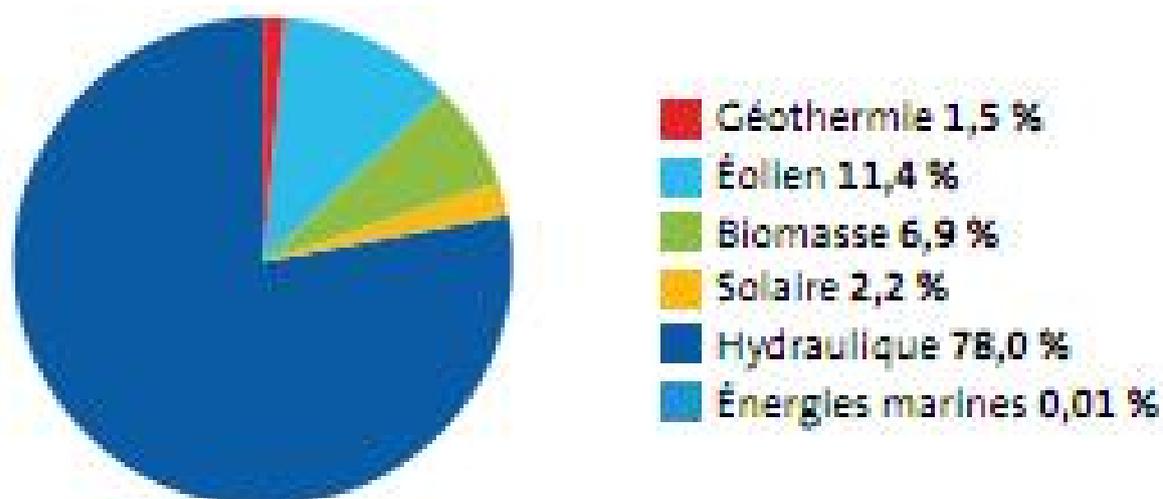


Figure I-2 Structure de la production électrique d'origine renouvelable–2012 [03]

Tableau I-2 Production d'électricité mondiale d'origine renouvelable en 2012[03]

Source	TWh en 2012	% en 2012
Hydraulique	3663,4	78 %
Eolien	534,3	11,4 %
Biomasse	326,2	6,9 %
Solaire	104,5	2,2 %
Géothermie	70,4	1,5 %
Energies marines	0,540	0,01 %
Total renouvelables	4699,2	100,0 %

I-2-3 Les énergies renouvelables en Algérie [04]

➤ Généralités

L'Algérie a lancé un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain.

➤ Programme des énergies renouvelables

Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs [04].

Le programme inclut la réalisation, d'ici 2020, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Le programme EnR algérien a été prévu dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

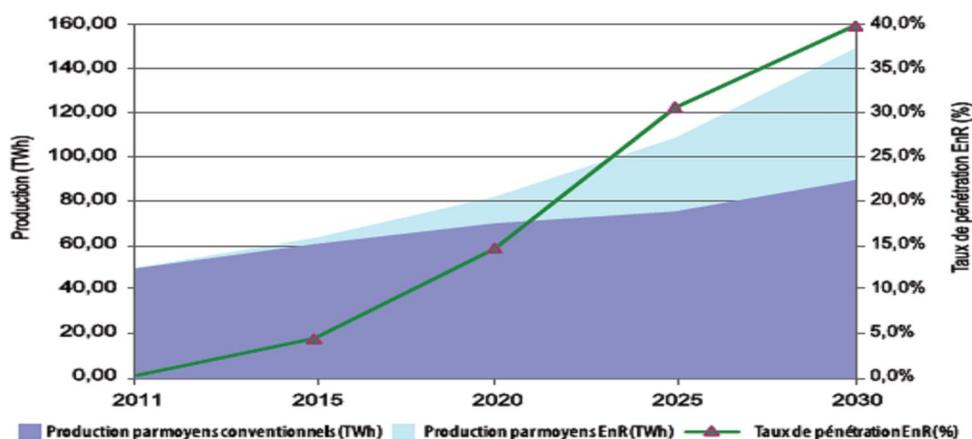


Figure I-3 Taux d'évolution ENR dans la production nationale en TWh [04]

➤ **Programme développement des capacités**

Cet objectif ambitieux devrait être atteint grâce à la réalisation d'une usine de fabrication de modules photovoltaïques d'une capacité équivalente à 120 MWc/an par le Groupe Sonelgaz à travers sa filiale Rouiba-Eclairage et dont la mise en service est prévue fin 2013.

▪ **Le Solaire thermique**

Sur la période 2014-2020, il est prévu un taux d'intégration de 50% à travers la mise en œuvre de trois projets majeurs qui seront menés en parallèle à des actions de renforcement des capacités d'engineering:

1. Construction d'une usine de fabrication de miroirs;
2. Construction d'usines de fabrication d'équipements de fluide caloporteur et de stockage d'énergie;
3. Construction d'une usine pour la fabrication des équipements du bloc de puissance;
4. Développement de l'activité engineering et capacités de conception, procurement et réalisation.

Sur la période 2021-2030, le taux d'intégration devrait être supérieur à 80% grâce à la concrétisation des projets suivants :

1. Extension de la capacité de fabrication des miroirs;
2. Extension de la capacité de fabrication d'équipements de fluides caloporteurs et de stockage d'énergie;
3. Extension de la capacité de fabrication des équipements du bloc de puissance;
4. Conception, procurement et réalisation de centrales par des moyens propres

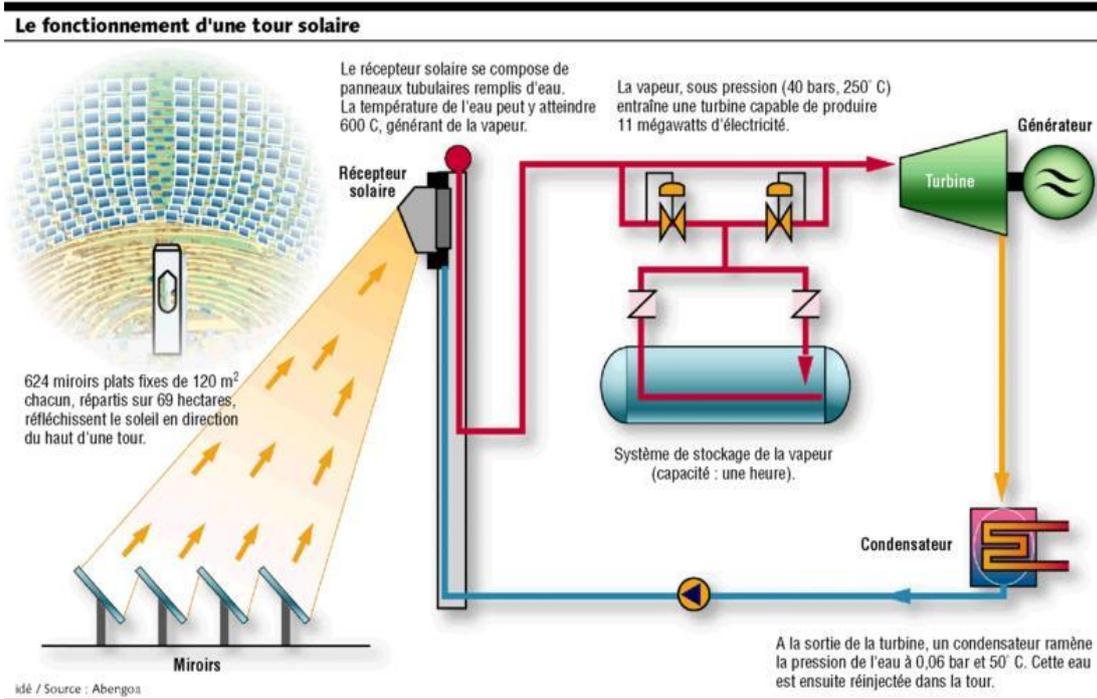


Figure I-4 Centrale thermique tour solaire [58]

▪ L'éolienne

Depuis 2013, il est prévu de lancer les études pour la mise en place de l'industrie éolienne. Sur la période 2014-2020, l'objectif est de parvenir à un taux d'intégration de 50%. Cette période sera marquée par les actions suivantes:

1. Construction d'une usine de fabrication de mâts et de rotors d'éoliennes;
2. Création d'un réseau de sous-traitance nationale de la fabrication des équipements de la nacelle;
3. Montée en compétence de l'activité engineering et capacités de conception,

➤ Recherche et développement

L'Algérie encourage également la coopération avec les centres de recherche en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables.

1. Les universités,
2. Les centres de recherche,
3. Les entreprises et les différents acteurs du programme EnR collaborent pour sa mise en oeuvre et interviennent sur les différentes étapes de la chaîne d'innovation. Ils valorisent ainsi davantage les atouts dont dispose le pays.

4. Les centres de recherche affiliés aux entreprises comme le CREDEG, filiale du Groupe Sonelgaz,
5. Le secteur de l'énergie et des mines compte une agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) et une société spécialisée dans le développement des énergies nouvelles et renouvelables (NEAL).

Ces organismes coopèrent avec des centres de recherche attachés au ministère de la recherche scientifique parmi lesquels figurent le CDER et l'UDTS.

I-3 Types des Énergies renouvelables

I-3-1 Énergie solaire

La production d'électricité solaire repose sur deux technologies bien distinctes. La technologie des modules photovoltaïques utilise une des propriétés des semi-conducteurs (généralement le silicium) qui, au contact de la lumière, génèrent un courant électrique.

La seconde technologie est celle des centrales hélio thermodynamiques (ou centrales solaires thermiques). Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de miroirs sur un point focal afin d'obtenir des températures très élevées (de 400 à 1 000 °C) qui permettent la production de vapeur d'eau et donc d'électricité [03].

Cette filière a produit en 2012 (104,5 TWh exactement), dont 100,4 TWh proviennent de la technologie photovoltaïque et 4,1 TWh des centrales solaires thermiques. La part de l'électricité solaire dans la production d'électricité mondiale est de 0,5 % et de 2,2 % dans la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable.

➤ Répartition de la production solaire par région – 2012

La production d'électricité solaire (toutes technologies) est aujourd'hui essentiellement concentrée dans la région Europe de l'Ouest (65,3 %). Les autres grandes régions de production de cette forme d'énergie sont l'Amérique du Nord (14,6 %) et l'Asie de l'Est et du Sud-Est (13,4 %). La filière prend aussi de l'importance en Europe centrale (3,3 % de la production mondiale), Océanie (1.4%), Communauté des états indépendants (0.3%), Moyen orient (0.3%), Asie du sud (1.0%), Afrique du nord (0.2%), Afrique subsaharienne (0.1%) ,Amérique du sud (0.1%), Amérique centrale et caraïbes (0.03%)

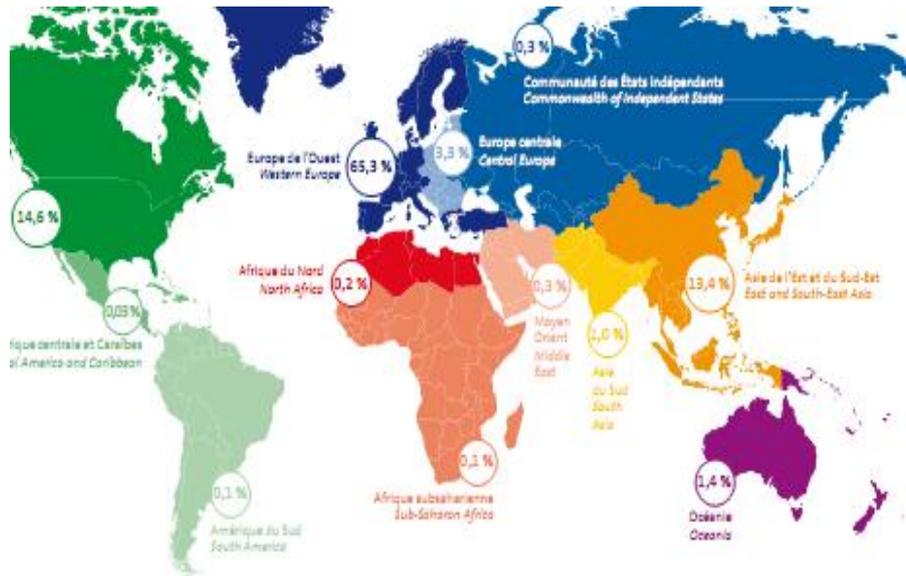


Figure I-5 Répartition de la production solaire par région [03]

➤ **Les principaux pays de production d’électricité solaire- 2012**

L’essentiel de la production solaire est concentré dans les cinq premiers pays producteurs (Allemagne (26.8%), Italie (18%), Etats-Unis (14.3%), Espagne (11.4%) et Japon (6.9%)).

Tableau I-3 Principaux pays producteurs d’électricité solaire

Pays	Production 2012(TWh)	Part Prod Modiale
Allemagne	28,0	26,8 %
Italie	18,9	18,0 %
Etat-Unis	15,0	14,3 %
Espagne	11,9	11,4 %
Japon	7,2	6,9 %
Chine	5,2	5,0 %
France	4,1	3,9 %
Répub tchèque	2,2	2,1 %
Belgique	1,7	1,6 %
Australie	1,5	1,4 %
Reste du monde	9,0	8,6 %
Monde	104,5	100,0 %

I-3-1-1 Énergie solaire à concentration thermodynamique

Qui consiste tout simplement à produire de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité. Telque les centrales peuvent fonctionner avec une autre source d'énergie (généralement du gaz naturel). On parle alors de centrales hybrides. Elles peuvent également être équipées de systèmes de stockage, permettant de poursuivre la production d'électricité après la tombée du jour ou, en l'absence temporaire de luminosité, durant la journée.

➤ Le principe de fonctionnement

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C.

La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit [05].

I-3-1-2 Énergie solaire photovoltaïque

Qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon.

Le solaire photovoltaïque peut être utilisé à la fois pour des applications reliées au réseau, c'est le cas des centrales solaires terrestres de grande puissance (jusqu'à plusieurs dizaines de mégawatts)

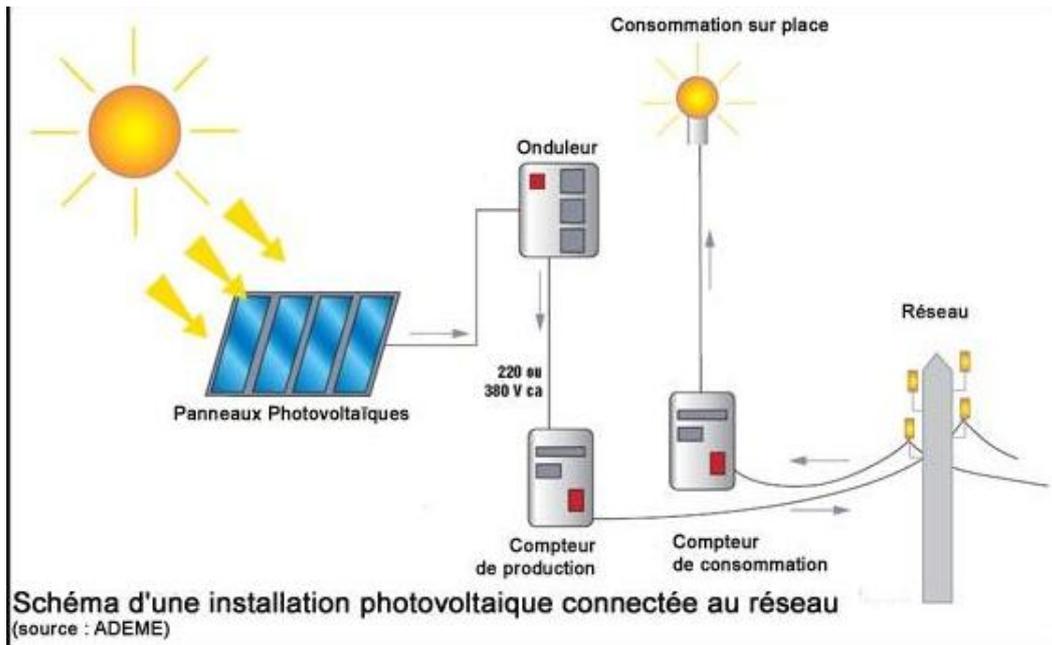


Figure I-6 Schéma d’une installation photovoltaïque connectée au réseau [59]

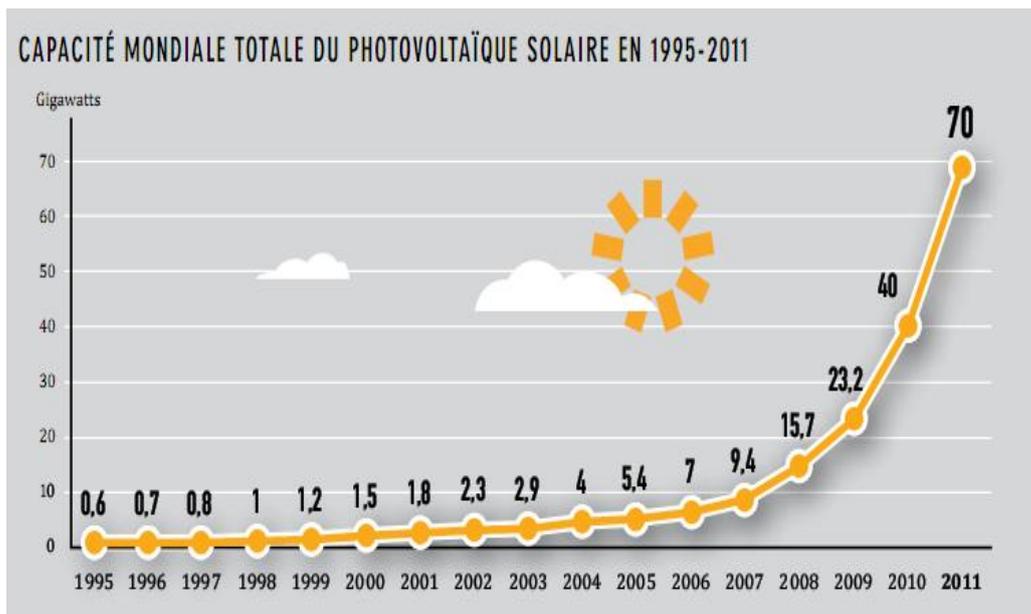


Figure I-7 Capacité mondiale totale photovoltaïque solaire 1995-2011 [06]

➤ **Le principe de fonctionnement**

La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi-conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) capable de convertir le rayonnement solaire en électricité. Les électrons sont alors mis en mouvement, produisant ainsi un courant électrique [05].

I-3-1-3 Énergie solaire thermique

Est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

➤ Le principe de fonctionnement

Le solaire thermique consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur, et à la récupérer principalement par chauffage de l'eau. Cette source d'énergie renouvelable commence à se développer sous nos latitudes dans les maisons individuelles. Son utilisation se fait principalement pour produire l'eau chaude sanitaire, mais elle peut être utilisée comme complément pour le chauffage de la maison.

Différents types de capteurs solaires thermiques existent. Le plus simple consiste à peindre en noir un ballon métallique contenant un fluide caloporteur, de l'eau par exemple.

La couche noire absorbe l'énergie solaire et la transmet à l'eau. L'extraction de la chaleur se fait grâce à la circulation du fluide caloporteur dans un conduit recevant l'énergie calorifique [05].

➤ Les Avantages de l'énergie solaire [07]

- a. L'énergie solaire est inépuisable et non polluante
- b. L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre
- c. L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage. L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes
- d. Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles
- e. Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.
- f. Le rendement énergétique est positif : il faut en moyenne entre 3 et 4 ans pour que le panneau produise l'énergie nécessaire à sa fabrication et un panneau solaire produit en moyenne entre 9 à 14 fois l'énergie qu'il a consommé pour sa fabrication.

➤ **Les Inconvénients de l'énergie solaire [07]**

- a. Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé
- b. L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- c. La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil
- d. Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes
- e. Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an. De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
- f. Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.

I-3-2 Énergie géothermie

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais il existe également la géothermie volcanique. En général, l'énergie géothermique est exploitée en pompant en utilisant des puits de forage de l'eau chaude provenant d'une zone du sous-sol poreuse imprégnée d'eau très chaude. La chaleur produite sert dans la plupart de cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments. Au cas de températures au-dessus de 150°C la production d'électricité est possible [08].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement :

- la haute (>180°C).
- moyenne (>100°C).
- basse (>30°C).
- très basse énergie (<30°C).

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques et elle représente comme une source d'énergie constante de forte puissance. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps.

Elle s'apparente d'avantage à une ressource minière, par la réalisation de ses forages profonds, par les lourds investissements qui la caractérisent et par son exploitation qui consiste à extraire les calories du noyau terrestre et par le fait qu'elle est épuisable. Et par contre la géothermie est limitée au nombre de site [09].

Cette filière a atteint en 2012 (70,4 TWh exactement), la part de l'électricité géothermique dans la production d'électricité mondiale est de 0,3 % et de 1,5 % dans la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable.

➤ Répartition de la production géothermique par région – 2012

La production d'électricité géothermique est aujourd'hui essentiellement concentrée dans les régions l'Asie de l'Est et du Sud-Est (29,7 %), l'Amérique du Nord (27,9 %), Europe de l'ouest (16,9 %), Amérique centrale et caraïbes (13,4 %) , Océanie (9,3 %), Afrique subsaharienne (2.1%) et Communauté des états indépendants (0.8%).



Figure I-8 Répartition de la production géothermique par région [03]

➤ Les principaux pays de production d'électricité géothermique

L'essentiel de la production géothermique est concentré dans les sept premiers pays producteurs (Etats-Unis(27.9%),Philippines(14.6%),Indonésie (11.2%), Nouvelle-Zélande (8.8%), Mexique (8.3%),Italie (7.9%),Islande (7.4%).

Tableau I-4 Principaux pays producteurs d'électricité géothermique – 2012

Pays	Production 2012(TWh)	Part Prod Modiale
Etat-Unis	19,6	27,9 %
Philippines	10,2	14,6 %
Indonésie	7,9	11,2 %
Nouvelle Zélande	6,2	8,8 %
Mexique	5,8	8,3 %
Italie	5,6	7,9 %
Islande	5,2	7,4 %
Japon	2,5	3,6 %
Salvador	1,5	2,2 %
Kenya	1,5	2,1 %
Reste du monde	4,2	6,0 %
Monde	70,4	100,0 %

➤ **Le principe de fonctionnement**

La géothermie désigne le processus permettant de capter en profondeur la chaleur terrestre, et l'exploiter via un système de canalisations afin de l'exploiter en surface sous forme d'électricité ou de chaleur. Ce Procédé est basé sur un système de tuyauterie creusé dans le sol, à l'intérieur duquel circule en permanence un échange de courants chauds et froids. Les Niveaux énergétiques correspondants sont adaptables afin de pouvoir alimenter des équipements variés.

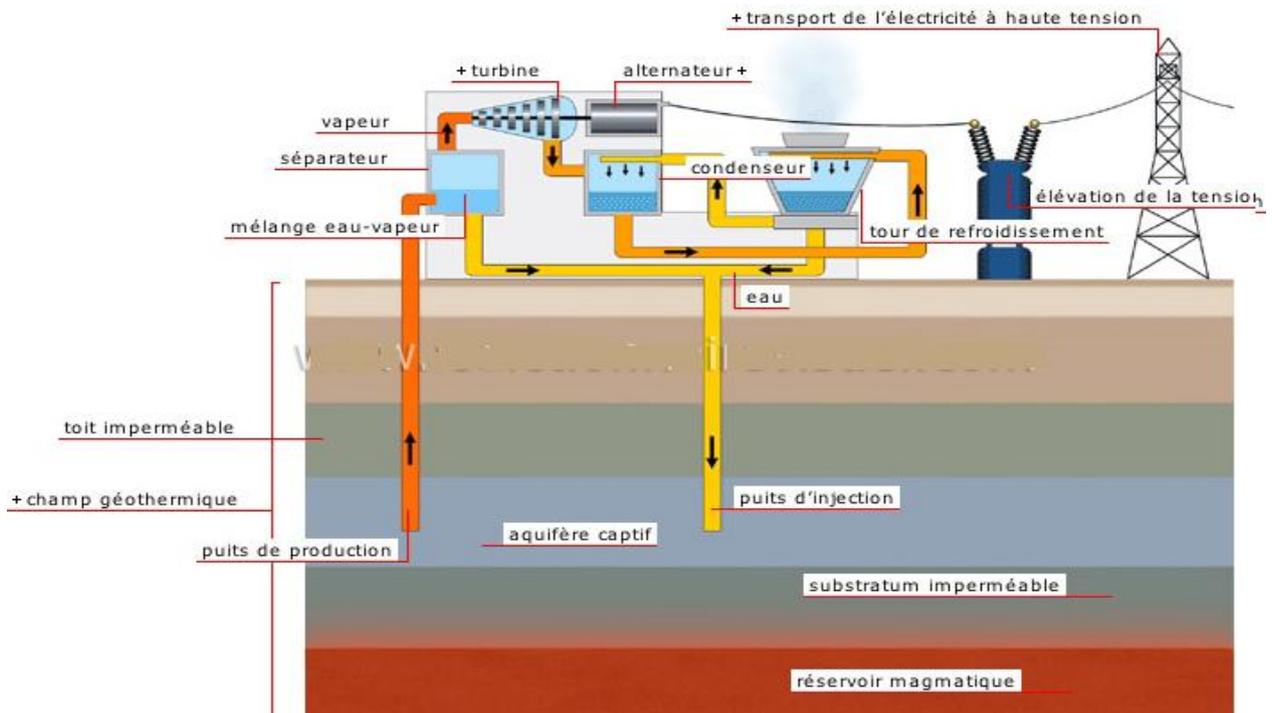


Figure I-9 Schéma de principe de fonctionnement géothermique [60]

➤ **Les Avantages de l'énergie géothermique [10]**

- a. La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- b. C'est une source d'énergie quasi-continue.
- c. Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne).

➤ **Les Inconvénients de l'énergie géothermique [11]**

- a. Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- b. Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.
- c. Risque de réchauffement du site de forage et Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- d. Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental.

I-3-3 Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une énergie renouvelable très faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Cette source d'énergie renouvelable exploite les mouvements de l'eau actionnés par le Soleil et la gravité à travers le cycle de l'eau, les marées et les courants marins. Qu'elles utilisent les chutes d'eau naturelles (cascades) ou artificielles (barrages hydroélectriques), le débit des cours d'eau ou les courants marins (marée, circulation thermo haline, etc.), les centrales hydrauliques produisent de l'énergie mécanique convertie la plupart du temps en électricité (hydroélectricité [12]).

L'énergie hydraulique est en fait une énergie cinétique lié au déplacement de l'eau comme dans les courants marins, les cours d'eau, les marées, les vagues ou l'utilisation d'une énergie potentielle comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages [13].

Cette filière a atteint en 2012 (3663,4 TWh exactement), la part de l'électricité hydraulique dans la production d'électricité mondiale est de 16,2 % et de 78,0 % dans la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable.

➤ Répartition de la production hydraulique par région – 2012

La production d'électricité géothermique est aujourd'hui essentiellement concentrée dans les régions l'Asie de l'Est et du Sud-Est (27,8 %), l'Amérique du Sud (19,1 %), l'Amérique du Nord (18,5 %), Europe de l'ouest (15,7 %), Communauté des états indépendants (6,7 %), Asie du sud (4,3 %), Afrique subsaharienne (2,7%) , Europe centrale (1,7 %), Amérique centrale et caraïbes (1,5 %), Moyen orient (0.6%), Afrique du Nord (0.4) ,Océanie (1,0 %).



Figure I-10 Répartition de la production hydraulique par région

➤ **Les principaux pays de production en hydroélectricité**

L'essentiel de la production hydraulique est concentré dans les quatre premiers pays producteurs Chine (22.5%), Brésil (11.4%), Canada (10.4%), Etats-Unis (8.1%).

Tableau I-5 Principaux pays producteurs en hydroélectricité – 2012

Pays	Production 2012(TWh)	Part Prod Modiale
Chine	823,3	22,5 %
Brésil	416,8	11,4 %
Canada	380,1	10,4 %
Etat-Unis	298,1	8,1 %
Russie	164,8	4,5 %
Norvège	142,9	3,9 %
Inde	114,8	3,1 %
Japon	85,7	2,3 %
Venezuela	82,4	2,2 %
Suède	78,6	2,1 %
Reste du monde	1075,9	29,4 %
Monde	3663,4	100,0 %

➤ **Le principe de fonctionnement**

Le barrage s'oppose à l'écoulement naturel de l'eau, sauf en cas de forts débits, qu'il laisse alors passer. De grandes quantités d'eau s'accumulent et forment un lac de retenue. Lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir les vannes pour amorcer le cycle de production de l'électricité. L'eau s'engouffre alors dans une conduite forcée ou dans une galerie creusée dans la roche suivant l'installation, et se dirige vers la centrale hydraulique située en contre bas.

À la sortie de la conduite, l'écoulement de l'eau fait tourner la turbine qui entraîne un générateur électrique. L'électricité produite peut soit être utilisée directement, soit stockée dans des accumulateurs. Enfin, l'eau est restituée à la rivière.

La production constante d'électricité exige un débit qui ne soit pas variable comme celui des fleuves et qui soit disponible au moment voulu. La création des barrages a résolu ces deux problèmes.

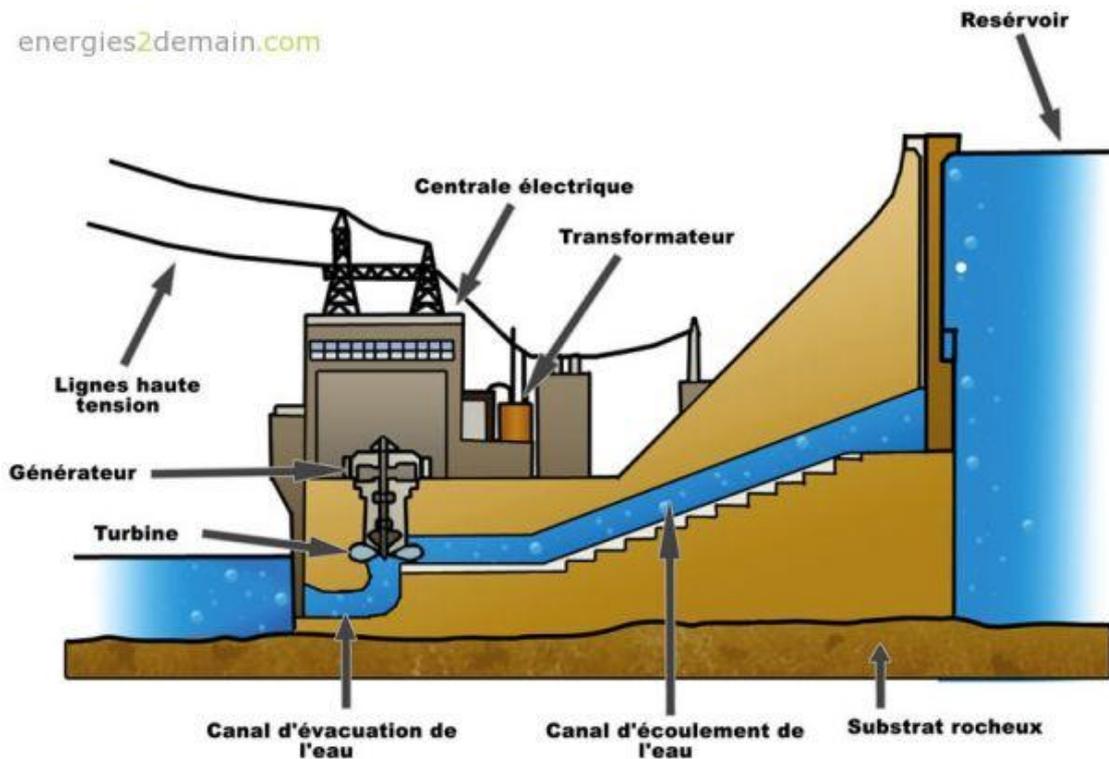


Figure I-11 Coupe transversale d'un barrage hydroélectrique [61]

➤ **Les Avantages de l'énergie hydraulique**

- a. C'est une énergie propre (renouvelable)
- b. sans émission de fumées non polluante.
- c. La gestion des cours d'eau permet le contrôle des crues :
 - en période de sécheresse, on lâche de l'eau ;
 - en période d'inondation, on retient le surplus d'eau.

➤ **Les Inconvénients de l'énergie hydraulique**

- a. Coût des aménagements
- b. Risques de rupture du barrage
- c. Perturbation de l'environnement
- d. Exigences géologiques et géographiques :
 - réservoir : zone large et dégagée
 - barrage : zone étroite

I-3-4 Énergie de la biomasse

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

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante ; comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre [02].

Cette filière a atteint en 2012 (326,2 TWh exactement), la part de l'électricité à partir de la biomasse dans la production d'électricité mondiale est de 1,4 % et de 6,9 % dans la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable.

➤ Répartition de la production d'électricité à partir de la biomasse par région-2012

La production d'électricité à partir de la biomasse est aujourd'hui essentiellement concentrée dans les régions Europe de l'ouest (38,5 %), Amérique du Nord (22,7 %), Amérique du Sud (16,3 %), Asie de l'Est et du Sud-Est (13,2 %), Europe centrale (5,4 %), Amérique centrale et caraïbes (1,8 %), Océanie (0,9 %), Asie du sud (0,7 %), Afrique subsaharienne (0,4%), Communauté des états indépendants (0,1 %).



Figure I-12 Répartition de la production de la biomasse par région

➤ **Les principaux pays de production d'électricité à partir de la biomasse-2012**

L'essentiel de la production d'électricité à partir de la biomasse est concentré dans les quatre premiers pays producteurs sont Etats-Unis (19.4%), Brésil (12.9%), Allemagne (12.7%), Japon (9.8%).

Tableau I-6 Principaux pays producteurs électricité à partir de la biomasse

Pays	Production 2012(TWh)	Part Prod Modiale
Etat-Unis	63,3	19,4 %
Brésil	42,0	12,9 %
Allemagne	41,4	12,7 %
Japon	31,8	9,8 %
Royaume-Uni	15,2	4,7 %
Finlande	10,8	3,3 %
Suède	10,7	3,3 %
Italie	10,2	3,1 %
Pologne	10,0	3,1 %
Pays-Bas	7,2	2,2 %
Reste du monde	83,5	25,6 %
Monde	326,2	100,0 %

➤ **Le principe de fonctionnement**

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. En brûlant, la biomasse dégage de la chaleur qui va chauffer de l'eau dans une chaudière. L'eau se transforme en vapeur, envoyée sous pression vers des turbines [14].

Une partie de la vapeur est aussi récupérée pour être utilisée pour le chauffage. C'est ce que l'on appelle la cogénération. La vapeur fait tourner une turbine qui fait à son tour fonctionner un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la turbine, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

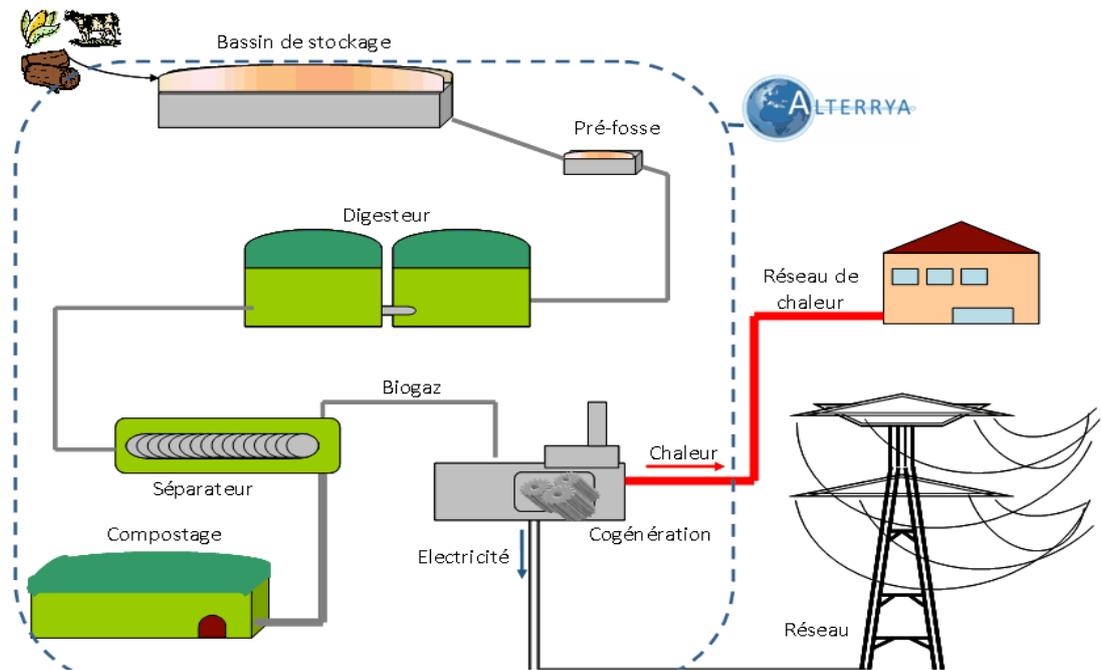


Figure I-13 schéma de principe d'une usine Biomasse [62]

➤ **Les Avantages de l'énergie biomasse**

- La biomasse participe au traitement et à la destruction des déchets organiques.
- A l'heure où le prix des carburants ne cesse d'augmenter, cette énergie serait une bonne alternative au pétrole
- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.
- Elle permet de réduire la quantité de déchets envoyés aux sites d'enfouissement.
- La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie Par exemple, le bois peut être traité et converti en gaz .

➤ **Les Inconvénients de l'énergie biomasse**

Pour produire de la biomasse il faut des terres agricoles.

- La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée.
- De plus la combustion du bois rejette des éléments néfastes dans l'atmosphère.
- L'impact visuel.

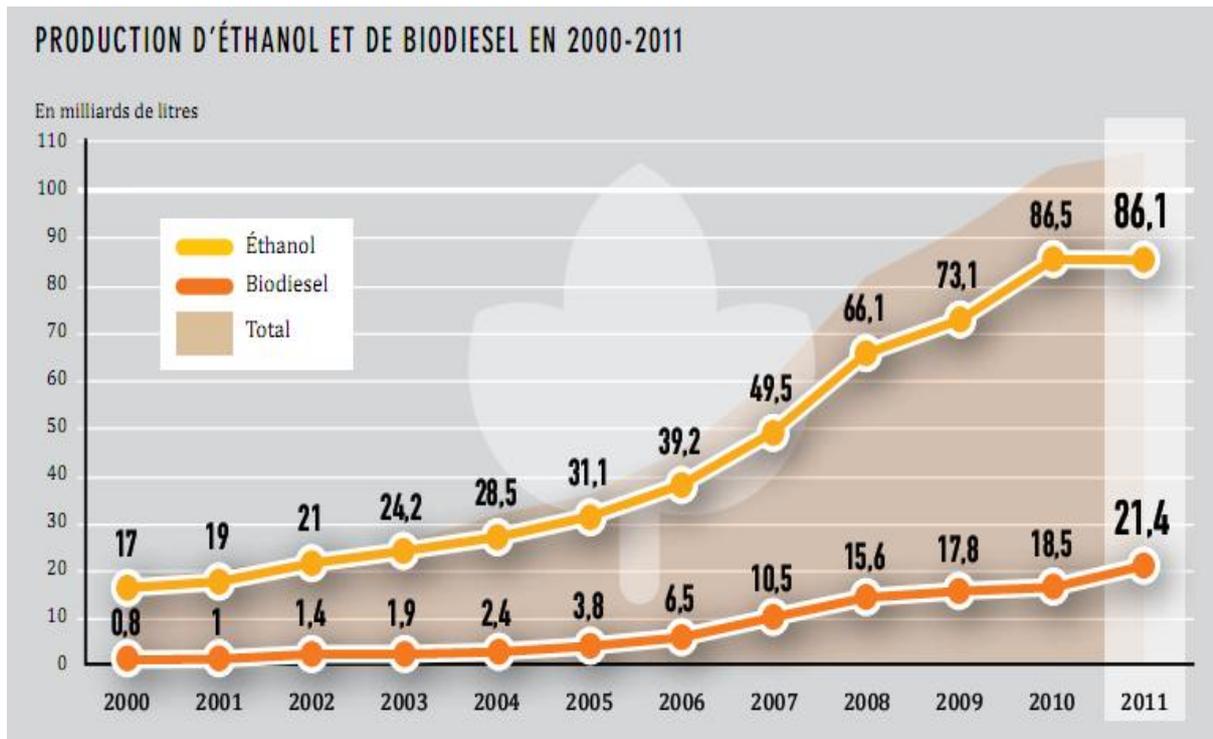


Figure I-14 Production d'éthanol et de biodiesel en 2000-2011 [06]

I-3- 5 Énergie éolienne

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique.

Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

Cette filière a atteint en 2012 (534,3 TWh exactement), la part de l'électricité éolienne dans la production d'électricité mondiale est de 2,4 % et de 11,4 % dans la production d'électricité mondiale d'origine renouvelable.

➤ Répartition de la production d'électricité éolienne par région-2012

La production d'électricité éolienne est aujourd'hui essentiellement concentrée dans les régions Europe de l'ouest (36,8 %), Amérique du Nord (28,6 %), Asie de l'Est et du Sud-Est (23,3 %), Asie du sud (5,6 %), Europe centrale (2,1 %), Océanie (1,5 %), Amérique du Sud (0,8 %), , Amérique centrale et caraïbes (0,7 %), Afrique du Nord (0.4%), Communauté des états indépendants (0,1 %), Afrique subsaharienne (0.04%) , Moyen orient (0.04%).



Figure I-15 Répartition de la production éolienne par région

➤ **Les principaux pays de production d’électricité éolienne-2012**

L’essentiel de la production d’électricité éolienne est concentré dans les quatre premiers pays producteurs sont Etats-Unis (26.4%), Chine (22.1%), Espagne (9.2%), Allemagne (8.6%).

Tableau I-7 Principaux pays producteurs d’électricité éolienne

Pays	Production 2012(TWh)	Part Prod Modiale
Etat-Unis	140,9	26,4 %
Chine	118,1	22,1 %
Espagne	49,1	9,2 %
Allemagne	46,0	8,6 %
Inde	30,0	5,6 %
Royaume-Uni	19,6	3,7 %
France	14,9	2,8 %
Italie	13,4	2,5 %
Canada	11,8	2,2 %
Danemark	10,3	1,9 %
Reste du monde	80,2	15,0 %
Monde	534,3	100,0 %

➤ Le principe de fonctionnement

Une éolienne est un générateur d'électricité fonctionnant grâce à la vitesse du vent. Elle se compose d'un rotor (hélice) qui se met en mouvement grâce à la force du vent; c'est la première conversion qu'effectue l'éolienne : transformer l'énergie cinétique du vent en énergie de rotation. Cette rotation est ensuite convertie en électricité par une génératrice. L'efficacité maximum de l'éolienne est obtenue lorsque l'hélice est face au vent, donc perpendiculaire. Pour appréhender correctement le fonctionnement d'une éolienne, il faut tout d'abord introduire le comportement d'une pale dans un flux d'air [15].

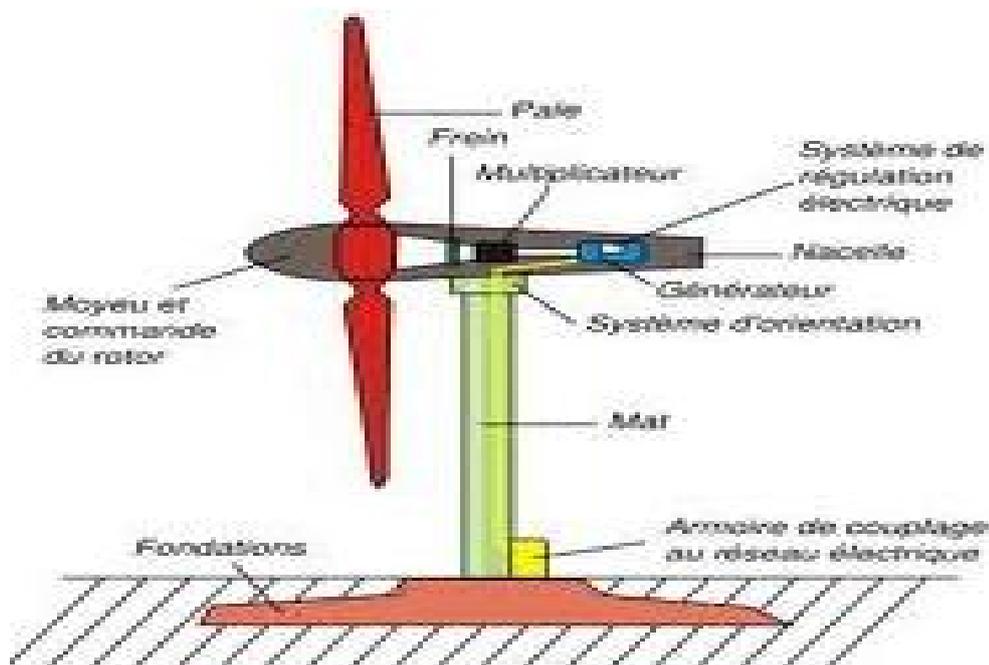


Figure I-16 Schéma de principe de fonctionnement éolien [63]

➤ Les Avantages de l'énergie éolienne [16]

- Non polluante (son exploitation n'engendre ni déchet, ni rejet).
- Inépuisable (énergie du vent)
- Elle peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés)
- Elle peut être complémentaire des filières traditionnelles.

➤ Les Inconvénients de l'énergie éolienne [16]

- Aspect aléatoire (variations des vitesses de vent)
- Le rendement dépend totalement du vent
- Présence du bruit des pales
- L'impact visuel

I-4 Conclusion

En se basant sur les statistiques de la production d'électricité mondiale et d'origine renouvelable cités au début du chapitre, c'est que le monde se dirige vers les sources renouvelables et l'avenir est très important à moyen et long terme. Suite à la recherche d'un développement durable, la maîtrise et le développement des énergies renouvelables sont devenus l'un des plus importants sujets à débattre.

Suite au programme lancé concernant les énergies renouvelables en Algérie,

- L'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique pour un développement économique durable à long terme. afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.
- d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable.
- Le choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Nous constatons l'émergence des énergies renouvelables qui se caractérisent par leur stock inépuisable et durable. Elles sont propres et ont un faible impact sur l'environnement d'où leur succès grandissant dans l'opinion publique, chez les investisseurs et les pouvoirs publics .

On constate que la production d'électricité renouvelable atteint en 2012 un développement important. L'essentiel de la production d'électricité éolienne est concentré dans les quatre premiers pays producteurs sont Etats-Unis , Chine , Espagne , Allemagne et dans le solaire , on peut citer (Allemagne , Italie , Etats-Unis , Espagne et Japon).

Parmi les technologies des énergies renouvelables qu'on a vu au début du chapitre, on s'intéresse dans le chapitre suivant sur l'énergie éolienne qui est notre cas d'étude.

II-1-Introduction

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dite renouvelables sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement important [18].

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes dans le monde a conduit les recherches en Génie Electrique de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et à optimiser la qualité d'énergie produite. Plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne, c'est le cas de L'Allemagne, L'Espagne et le Danemark, ...etc. [19].

Une éolienne à pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Une éolienne doit comporter:

- un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- Un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des paliers de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans la première partie de ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents statistiques, le gisement éolien en Algérie, avec présentation du système éolien y compris le domaine d'application des éoliennes avec leurs différentes constitutions.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes technologies des éoliennes avec les principes de conversion énergie cinétique, mécanique et électrique ainsi que les machines utilisées et modes de fonctionnement de la machine.

II-2- Historiques et statistiques

II-2-1 Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie.

Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical [20].

Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moulin des grains depuis le 7ème siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. A partir de la perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale [20].

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12ème et le 19ème siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19ème siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moulin des grains mais aussi pour pompage d'eau.

Par ailleurs, la construction d'éoliennes multipales ne se développe pas sur l'europe mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin Américain. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles [21].

L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées [22].

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar (ouled aissa) par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans [23].



Figure II-1 Eolienne d'Adrar [23]

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Dali brahim Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie [23].



Figure II-2 Eolienne de 100kw de Grand Vent [23]

Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles «moins polluants ». Au cours des dix dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage [24].

II-2-2 Statistiques

Depuis ces dernières années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier. Ceci est principalement dû à deux raisons:

- Produire une énergie propre.
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles.

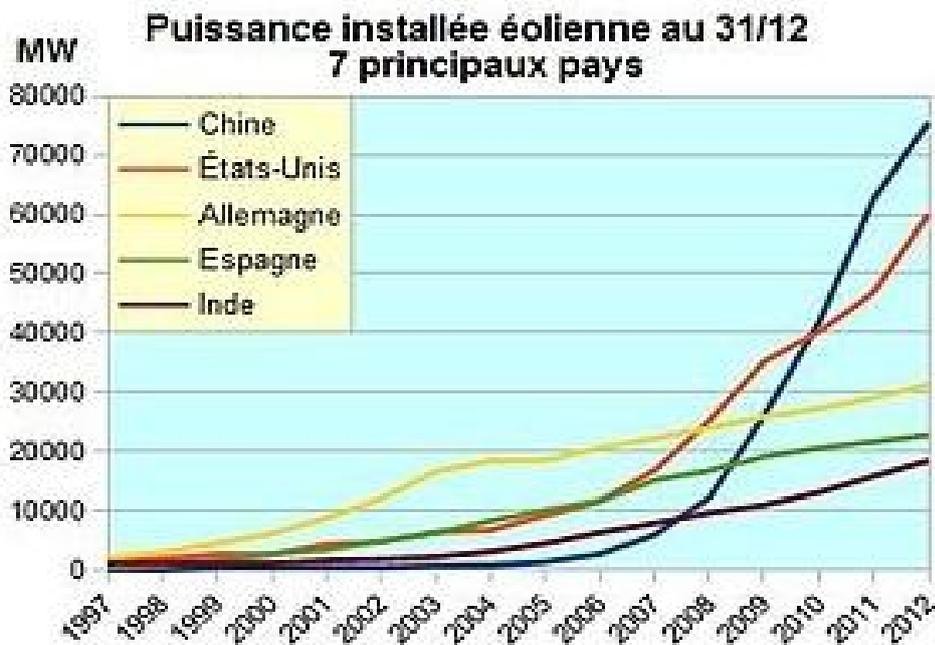


Figure II-3 Puissance installée éolienne par 07 principaux pays [64]

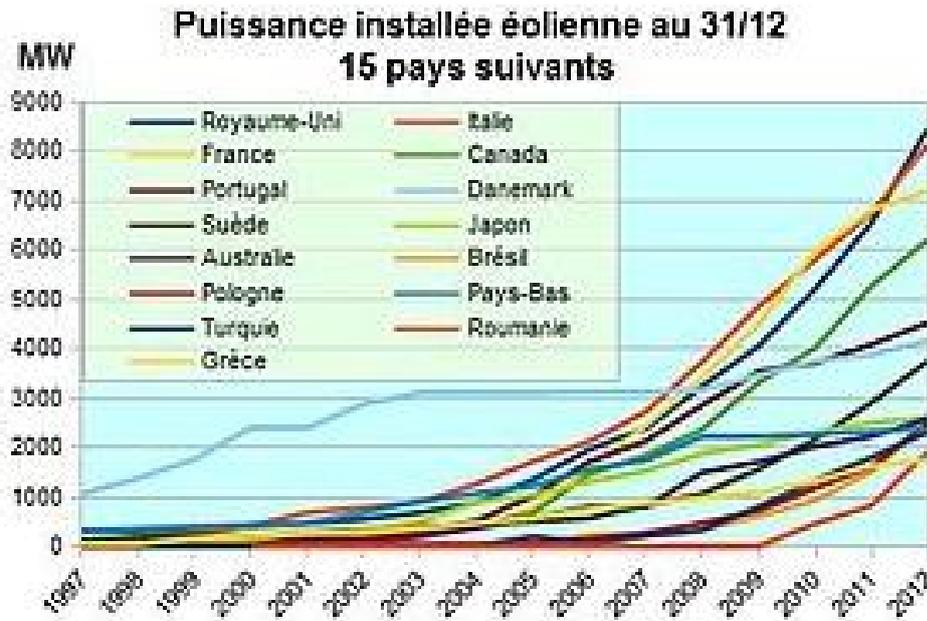


Figure II-4 Puissance installée éolienne par 15 pays suivants [65]

II-3- Gisement d'énergie éolienne

II-3-1 en Algérie

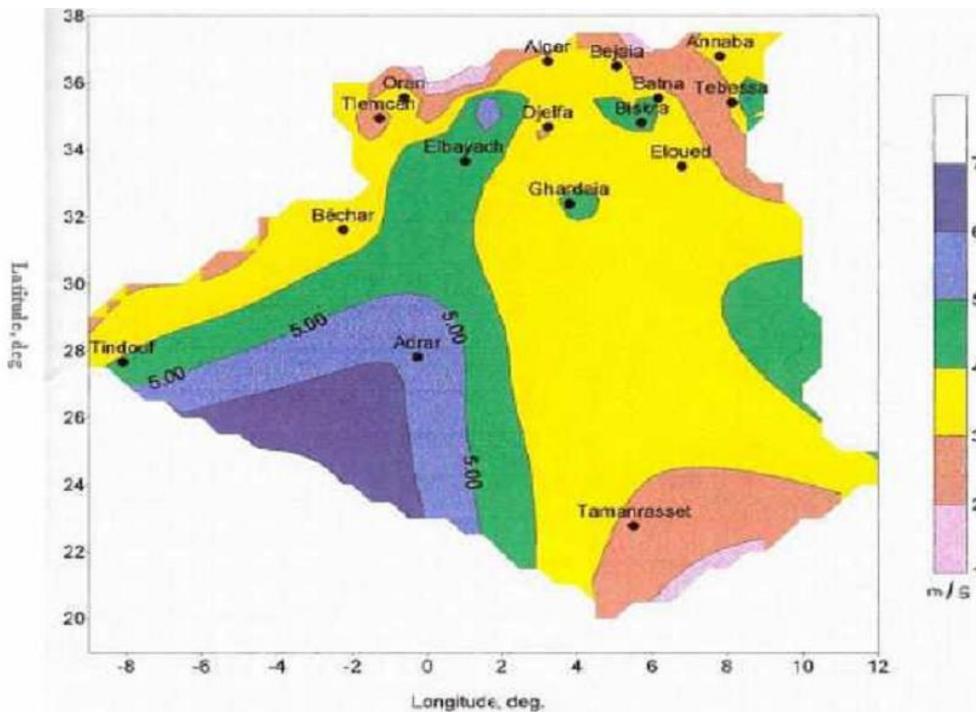
La détermination du gisement éolien en Algérie est primordiale et constitue un préalable nécessaire à toute étude de faisabilité d'installation d'éoliennes pour la production d'électricité. Pour cela, l'étendue du pays, l'ampleur du travail, les recherches menées sont basées sur une analyse de longues périodes des valeurs des vents enregistrées au niveau de l'office national de métrologie ONM [25].

Des études ont été entreprises pour l'évaluation de cette ressource à travers le pays. Les résultats ont montré une variation importante de la vitesse du vent en fonction des saisons, de l'altitude et une variation substantielle d'un endroit à un autre à cause de la topologie, avec augmentation du taux de la vitesse moyenne entre 10 et 50 mètres selon la région étudiée. L'étude menée par le CDER en exploitant les données de 75 stations météorologiques réparties sur le territoire national sur 11 années montre que la répartition géographique de la vitesse du vent est différente durant les douze mois de l'année.

Les mois les plus ventés sont ceux de Juin et d'avril. Les vitesses supérieures à 4 m/s s'étendent sur la majeure partie du pays. Les vitesses supérieures à 5 m/s s'étendent sur tout le sud-ouest et dépassent 6 m/s dans la région d'Adrar [25].

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement due à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par 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. Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque que la vitesse moyenne est peut élever [26].



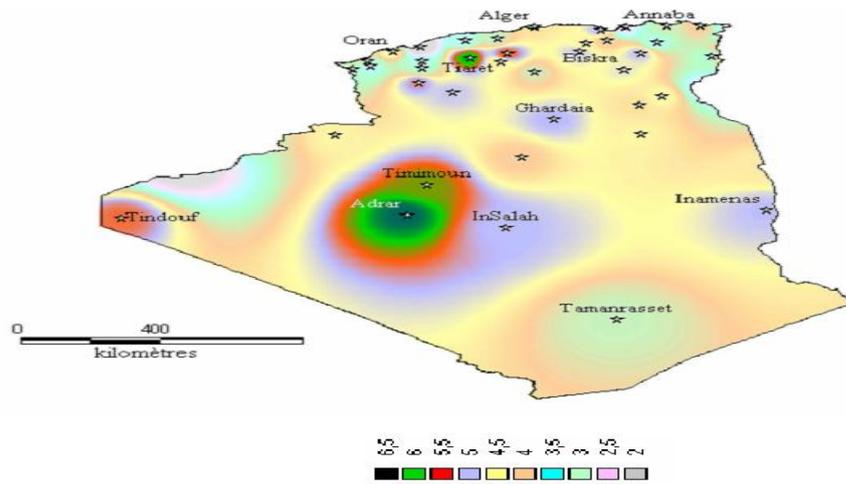


Figure II-6 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l’Algérie estimée à 10 m du sol [67]

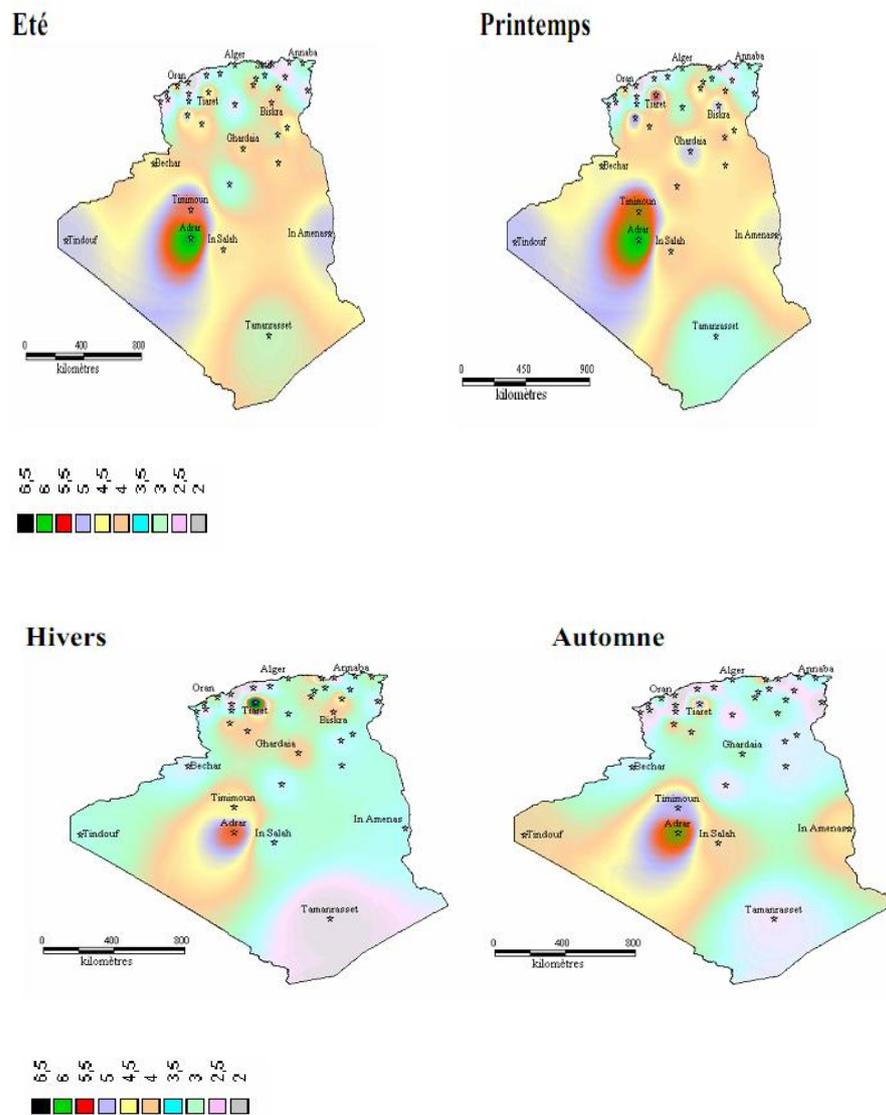


Figure II-7 Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps) [26]

II-3-2 Classement du site

La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en plusieurs catégories sur le tableau ci-dessous [24].

Tableau II-1 Catégories de la vitesse de vent (Echelle Beaufort) [68]

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m ²)
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

Dans le domaine de l'éolien, L'Algérie envisage de construire plusieurs fermes éoliennes dans le sud du pays dont la première est celle d'une puissance de 10 MW qui est réalisée à Adrar et opérationnelle en juin 2014. Ces fermes permettront de renforcer les sources énergétiques actuelles, disponibles au niveau de la région [27].

II-4- Evaluation des ressources éoliennes

II-4-1 Analyse des données de la vitesse moyenne du vent

L'estimation du potentiel énergétique éolien disponible sur un site donné est sans doute l'étape la plus importante lorsqu'il s'agit d'envisager l'implantation d'un système d'exploitation de ce type d'énergie. Sa dépendance directe du vent nécessite une connaissance des différents aspects, tels que la variation horaire et mensuelle de la vitesse du vent ainsi que sa distribution en fréquence. Dans cette étude, le site concerné est celui d'Adrar [27]

II-4-1-a Evolution de la vitesse du vent site Adrar

La figure ci-dessous montre la variation de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent pour le site d'Adrar. Cette figure montre que ce site présente un maximum de vitesse moyenne des vents pendant le mois Juin avec une valeur de 7m/s et par contre son minimum est de 4.45m/s durant le mois de septembre. Ainsi, les données montrent que le site d'Adrar est un site venté durant toute l'année, avec une vitesse moyenne annuelle autour de 6 m/s .

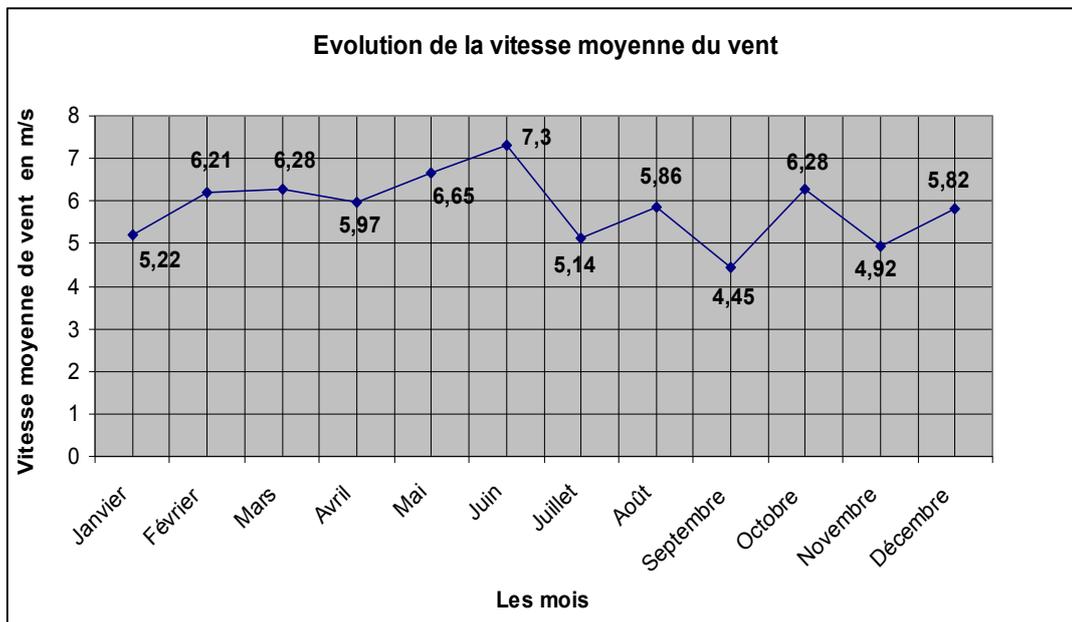


Figure II-8 la vitesse mensuelle moyenne [28]

Selon la figure II-8 ,Les données montrent que le site d'Adrar présente un potentiel éolien important du fait que le vent souffle à une vitesse relativement élevée pendant longtemps.

I-4-2 Distribution de la vitesse du vent

La connaissance des caractéristiques du régime de la vitesse du vent d'un site est importante pour l'exploitation des ressources éoliennes. La connaissance de la distribution de la vitesse du vent sur un site donné permet l'estimation de l'énergie éolienne disponible et récupérable par les éoliennes [27]. A cet effet, la distribution des vitesses du vent peut être représentée de deux manières:

➤ **distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées en termes de pourcentage**

Le tableau doit contenir la distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées en termes de pourcentage, jusqu'à une certaine vitesse au de la de laquelle la fréquence est devient nulle [29].

Tableau II-2 Distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées [27]

Intervalle de vitesse en m/s	Fréquence des vitesses du vent en (%)
0-1	7
1-2	1
2-3	4
3-4	9
4-5	11
5-6	16
6-7	16
7-8	11
8-9	8
9-11	10
11-13	4
13-15	2
15-17	1
>17	0

➤ **Modèle de la distribution de fréquence de Weibull**

Le calcul des performances d'un aérogénérateur opérant sur un site donné, passe avant tout par la mise en équation de la variation du potentiel énergétique caractérisé par sa vitesse. Parmi les modèles mathématiques utilisés en énergie éolienne, le modèle statistique de la distribution de Weibull .

La distribution de fréquence de Weibull est un modèle reconnu de façon générale par la communauté scientifique puisqu'il a démontré de bons résultats. Quant à la représentation de la distribution de fréquence de la vitesse du vent, elle est décrite par l'équation suivante [30].

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (\text{II.1})$$

où $f(v)$, densité de probabilité

Où k et c sont des paramètres appelés les paramètres de Weibull.

- Le paramètre k : appelé facteur de forme est sans dimension, il caractérise la forme de la distribution de fréquence.
- Le paramètre c : appelé facteur d'échelle, il détermine la qualité du vent. Il a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes. Les paramètres de Weibull peuvent être calculés par les deux expressions suivantes

$$k = \left(\frac{\sigma}{v}\right)^{-1.086} \quad (\text{II.2}) \quad c = \frac{\bar{v}}{\tau \left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{II.3})$$

Le paramètre c peut être déterminé par et τ par la formule suivante

$$c = \frac{2 * \bar{V}}{\sqrt{\pi}} \quad (\text{II.4})$$

$$\tau : \text{Ecart type} \quad \sigma = \sqrt{\frac{1}{N_d} \sum_{i=1}^{N_d} (V_i - \bar{V})^2}$$

$$F(v) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (\text{II.5})$$

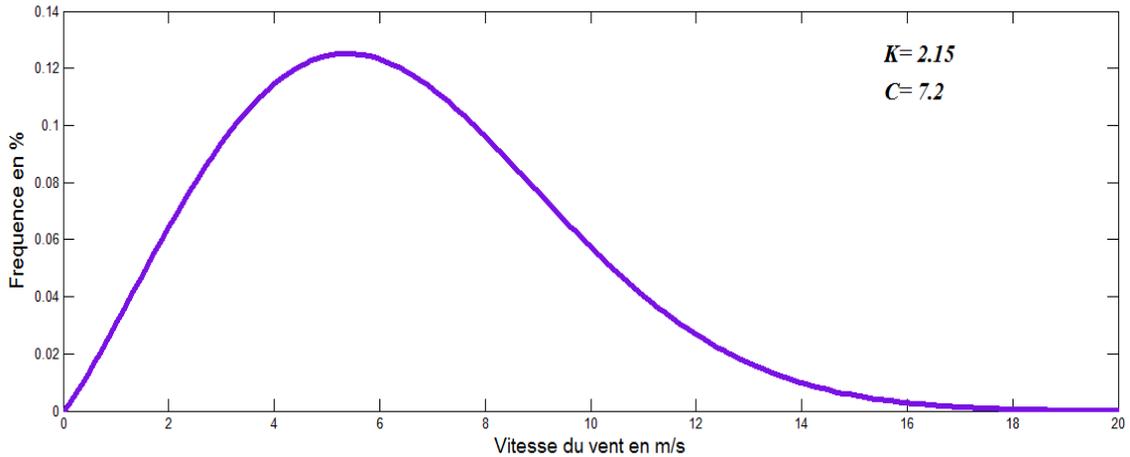


Figure II-9 Histogramme et distribution de Weibull des vitesses du vent [27]

▪ La puissance moyenne annuelle

Ainsi, la puissance moyenne produite par un aérogénérateur est estimée par la relation suivante

$$P(v) = \int_{V_{in}}^{V_{out}} P(v) f(v) dv \quad (\text{II.6})$$

II-4-3 Extrapolation verticale des vitesses de vent

La vitesse du vent varie en fonction de la hauteur et comme la hauteur des mesures de la vitesse du vent (hauteur donnée généralement 10 m) est différente de la hauteur du moyeu de l'éolienne, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'extrapolation de ces mesures à la hauteur voulue pour l'estimation de la production d'une éolienne (hauteur du moyeu). L'équation de l'extrapolation verticale des vitesses de vent est donnée par l'expression suivante [27].

$$v(h) = v(h_{mes}) \left(\frac{h}{h_{mes}} \right)^\alpha \quad (\text{II.7})$$

- h : est la hauteur pour laquelle le vent est estimé (hauteur du moyeu de l'éolienne).
- h_{mes} : est la hauteur des mesures (généralement 10 m).
- α : est un facteur empirique exprimant les influences de la rugosité de la surface et de la stabilité atmosphérique. IL dépend de plusieurs paramètres à savoir l'altitude, la température, la nature du sol.

Tableau II.3 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0,0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0,0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0,03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0,055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0,1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0,2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0,4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1,6

II-4-4 Densité de puissance éolienne

La densité de puissance éolienne dépend de la distribution des fréquences de la vitesse du vent et elle est proportionnelle à la moyenne du cube de la vitesse du vent.

Son expression est donnée par l'équation suivante:

$$P = \frac{1}{2} \rho * v^3 \quad (\text{II.8})$$

Sur la base de la fréquence d'occurrences des vitesses appartenant aux différents intervalles, la densité de puissance moyenne disponible peut être exprimée par l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho \sum_{i=1}^j (v_i^3 * f_i) \quad (\text{II.9})$$

II-5 Critères de choix de sites éoliens

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Ils incluent la présence d'un vent régulier et diverses conditions telles que : présence d'un réseau électrique pour recueillir le courant, absence de zones d'exclusion (dont périmètre de monuments historiques, sites classés..), terrain approprié, etc [31].

Un bon site éolien doit présenter les qualités suivantes :

- site venté
- peu de turbulences
- une bonne facilité d'accès
- proche du réseau électrique

II-5-1 La nature du sol

Le sol doit être suffisamment résistant pour supporter les fondations de l'éolienne. Ce critère n'est pas déterminant car dans le cas d'un sol meuble, des pieds seront alors enfoncés sous les fondations de l'éolienne [32].

II-5-2 L'accessibilité du site

Doit permettre le transport des gros éléments de l'éolienne (pales, tour, nacelle) et des grues nécessaires au montage. Cette contrainte peut limiter la puissance maximale installable par machine [32].

II-5-3 La connexion au réseau électrique

Pour cela, les petites fermes d'éoliennes sont le plus souvent situées à proximité d'un poste de transformation haute tension afin de diminuer le coût de raccordement. Pour les grosses fermes éoliennes, le réseau doit être en mesure de supporter l'énergie produite, et son renforcement est parfois nécessaire [32].

II-6 Présentation du système éolien

II-6-1 Description d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus généralement appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

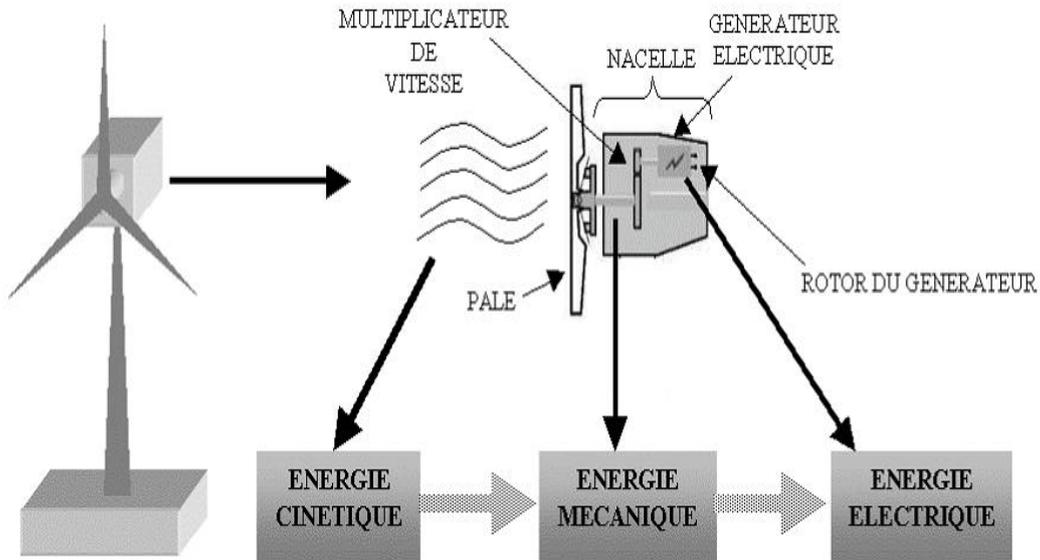


Figure II-10 Conversion de l'énergie éolienne du vent [50]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en relation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [33].

II-6-2 Principe de fonctionnement

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolien et commence à tourner.

Une puissance P_{vent} est alors captée et transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur près, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine [34].

II-7 Différents types d'aérogénérateurs

les éoliennes sont divisés en deux grandes familles:

- les éoliennes à axe vertical
- les éoliennes à axe horizontal

II-7-1 Les éoliennes à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisque elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation.

Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un axe dans le cas d'une turbine sous le vent [18].

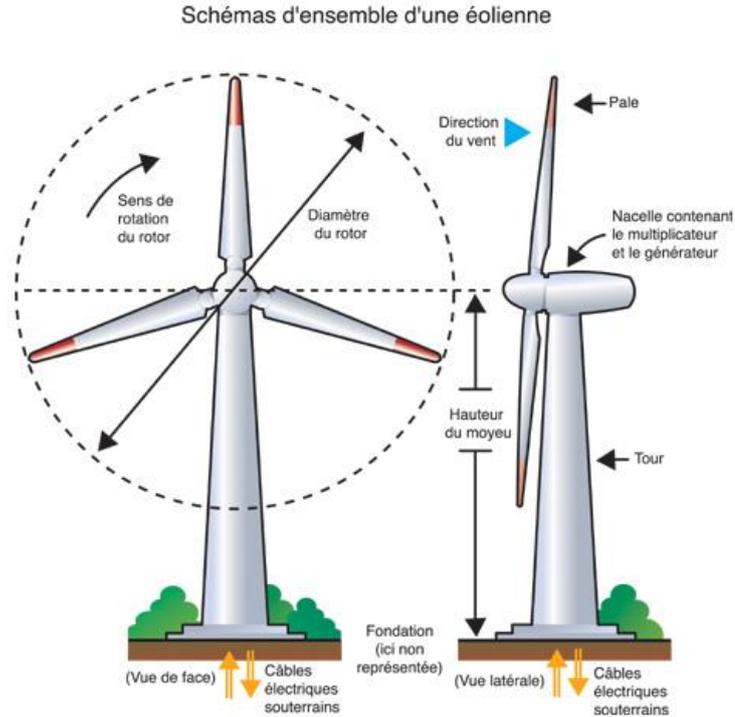


Figure II-11 Eoliennes à axe horizontal [69]

Le tableau ci-dessous concernant une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Tableau II-4 Classification des turbines éoliennes [70]

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance Délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

II-7-2 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les

avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [08].

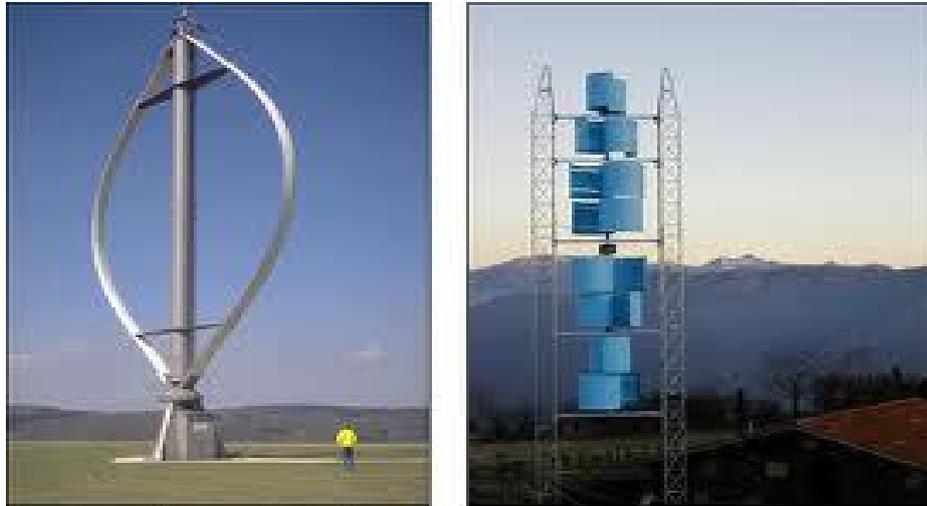


Figure II-12 Les éoliennes à axe vertical [71]

II-8- Principales composantes d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes [34]:

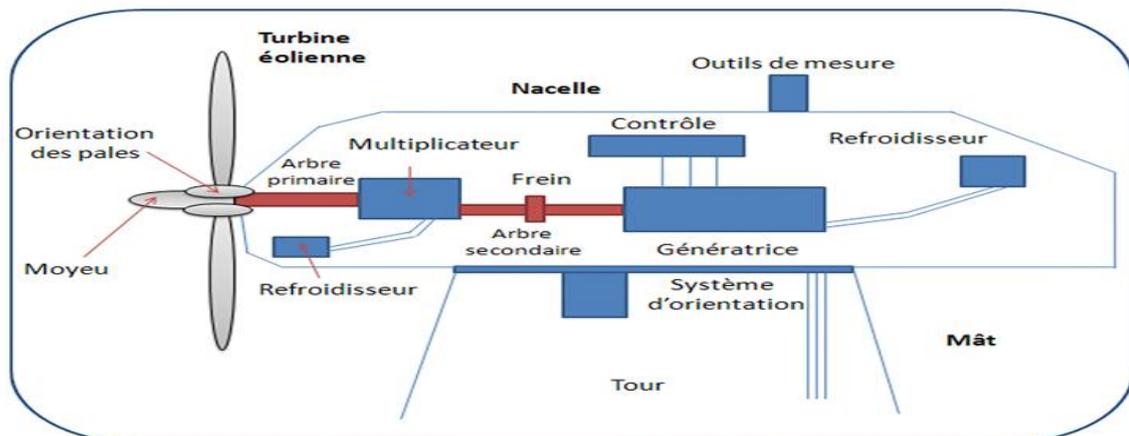


Figure II-13 Principales composantes d'une éolienne [20]

II-8-1 Le mat

qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500KW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance ;

II-8-2 Les pales

qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Les premières éoliennes étaient munies de deux pales. Cette solution, même si elle permet des vitesses de rotation plus élevées, présente quelques inconvénients qui sont principalement les vibrations, les bruits et une fatigue accrue du rotor. Actuellement, la majorité des installations sont dotées de système tripale ;

II-8-3 La fondation

Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vent et/ou dans des conditions de givrage.

II-8-4 La nacelle

Qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A ce la vient s'ajouter.

II-9 Classement de différentes technologies d'éoliennes

IL existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable

II-9-1 Fonctionnement à vitesse fixe

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas). Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés [36].

La vitesse mécanique $\Omega_{\text{méc}}$ est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de poles de la génératrice.

Pour une génératrice standard à deux paires de poles, la vitesse mécanique $\Omega_{\text{méc}}$ est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\Omega_s = 1500 \text{ tr/min}$, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor d'éolienne [20].

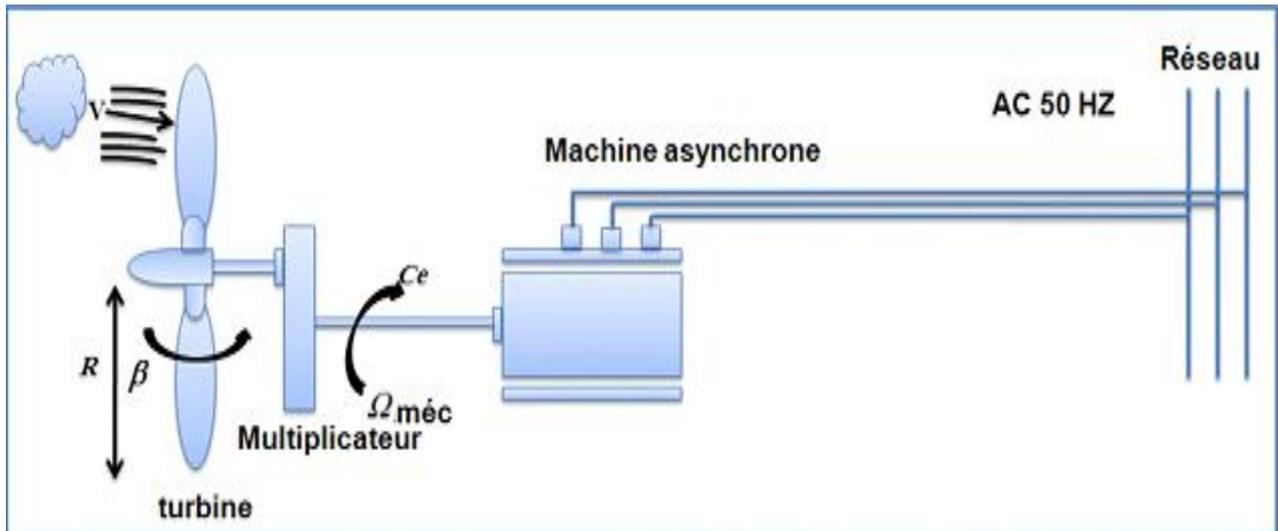


Figure II-14 Eolienne connectée au réseau [20]

- **Les avantages de la vitesse fixe**
 - a. Simplicité d'implantation
 - b. Plus grande fiabilité
 - c. Non besoin de système électronique de commande
 - d. Moins cher
 - e. Machine robuste
- **Les inconvénients de la vitesse fixe**
 - a. En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint
 - b. Puissance extraite non optimisée
 - c. Maintenance de boîte de vitesse
 - d. Pas de contrôle d'énergie réactive
 - e. Magnétisation de la machine imposée par le réseau

II-9-2 Fonctionnement à vitesse variable

Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique.

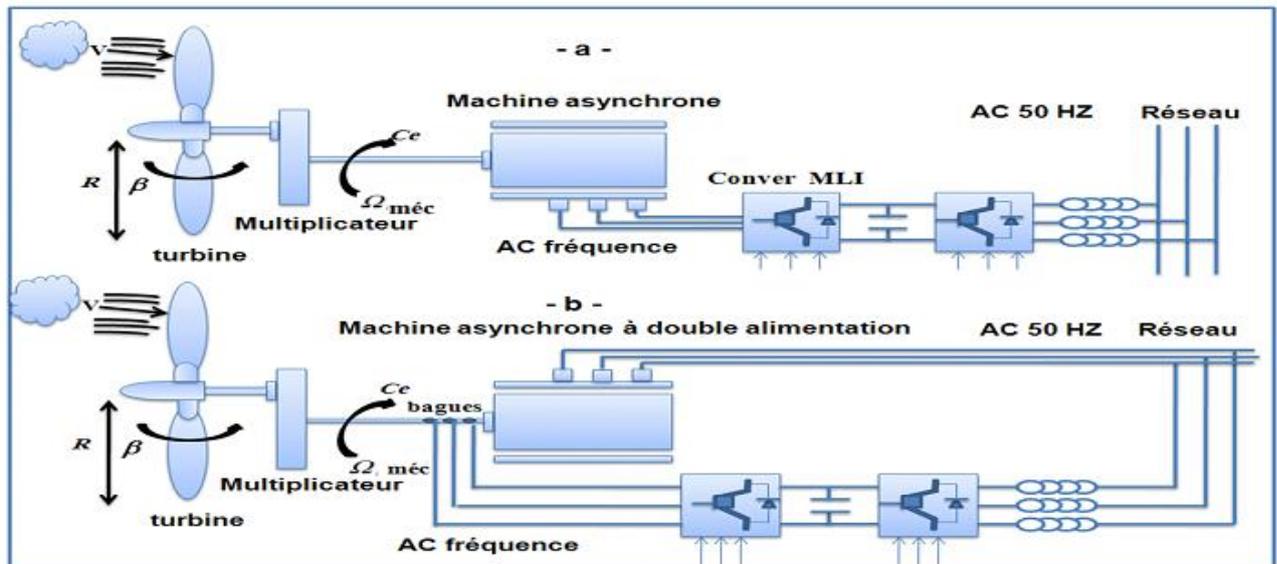


Figure II-15 Eoliennes à vitesse variable [20]

- **Les avantages de la vitesse variable [36].**
 - a. Une meilleure exploitation de l'énergie du vent
 - b. La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques
 - c. Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale
 - d. Connexion de la machine plus facile à gérer
 - e. La magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau

- **Les inconvénients de la vitesse variable [37].**
 - a. Convertisseur de puissance « complexe »
 - b. Maintenance de la boîte vitesse
 - c. Prix de l'électronique de puissance
 - d. L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût
 - e. Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA

II-10 Endroit des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent et il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage [24]. Les parcs éoliens sont deux sortes comme suit :



(a)

(b)

Figure II-16 Les parcs éoliens offshore (a) et onshore (b) [72]

II-11 Application des éoliennes dans les systèmes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes [02].

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

II-11-a Systèmes isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes. Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

II-11-b Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux. L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

II-11-c Systèmes liés au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique.

II-12-a Avantages l'énergie éolienne [20]

- a. Il s'agit d'une forme d'énergie indéfiniment durable et propre.
- b. Elle ne nécessite aucun carburant.
- c. Elle ne crée pas de gaz à effet de serre (sauf si l'on considère que ce type d'énergie est intermittent et nécessite l'utilisation de centrales thermiques constamment au ralenti afin de réguler les variations imprévisibles de la production éolienne).
- d. Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0.8 à 0.9 tonne les émissions de Co₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- e. Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est entièrement en métal et plastique.

- f. Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, et d'autres utilisations.
- g. L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint par rapport à d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.
- h. Après son fonctionnement (environ 20 ans), elle est entièrement démontable.

II-12-b Inconvénients l'énergie éolienne [35].

- a. Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor ;
- b. L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel ;
- c. La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire ;
- d. qui provoque l'instabilité de la production ;
- e. La perturbation de la réception des ondes hertziennes, ce qui provoque la distorsion des images télévisées ;
- f. C'est une source coûteuse à rendement faible dans les sites moins ventés.

II-13 Puissance d'une éolienne en fonction du vent

Et la puissance mécanique disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur s'exprime par l'équation suivante :

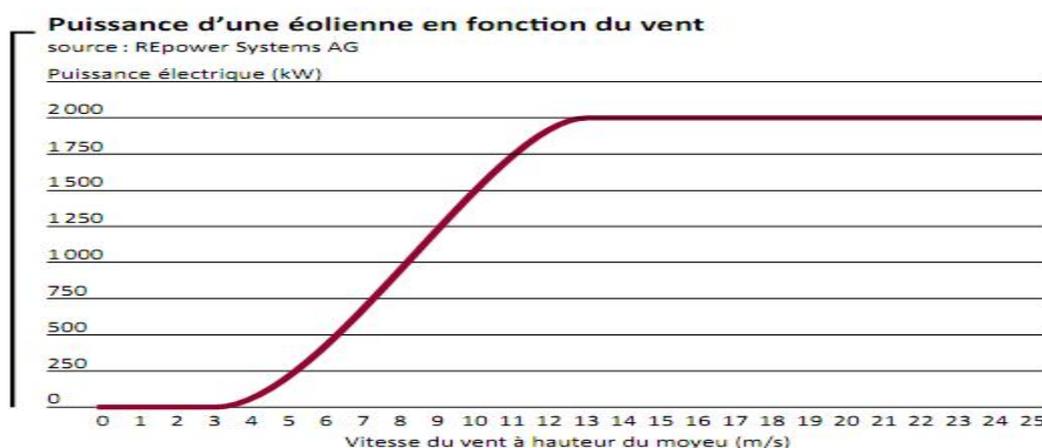


Figure II-17 Puissance d'une éolienne en fonction du vent [73]

D'après cette courbe, on voit les consignes suivantes ;

- Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h, l'éolienne est arrêtée car le vent est trop faible. Cela n'arrive que 15 à 20 % du temps.
- entre 10 et 36 km/h, la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement.
- À partir de 36 km/h, l'éolienne approche de sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production.
- À 45 km/h, l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h.
- À partir de 90 km/h, l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. Cela n'arrive que sur les sites très exposés, quelques heures par an, durant les fortes tempêtes.

II-14 Le Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

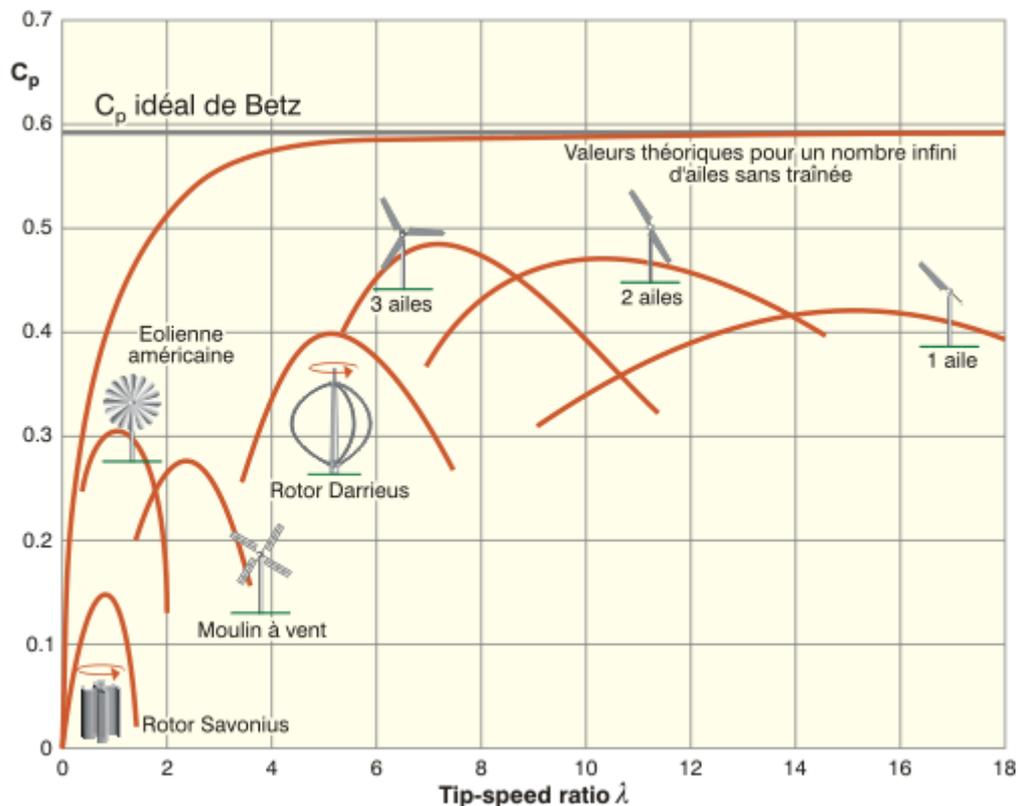


Figure II-18 Coefficient de puissance pour types d'éoliennes [74]

II-15 Principe de fonctionnement D'une pale d'Eolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au coeur du principe de fonctionnement [38].

II-15-a Description d'une pale d'éolienne

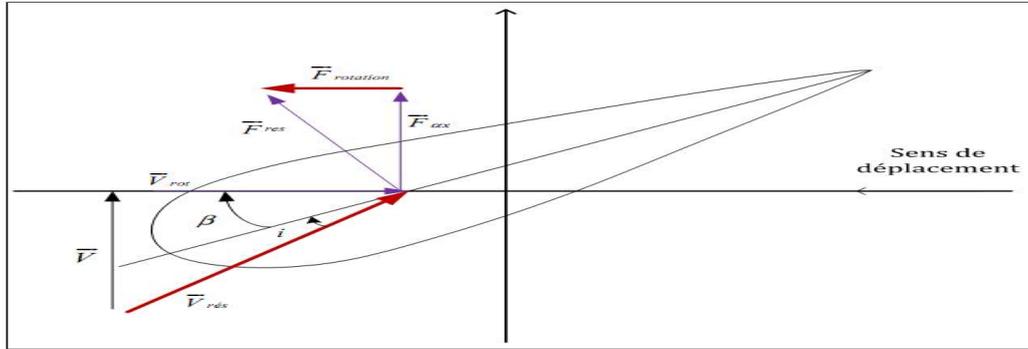


Figure II-19 Bilan des forces sur une Pale d'éolienne [39]

La Figure est la représentation en longueur d'une pale. Le sens et la vitesse de vent sont caractérisés par le vecteur V . Le vecteur V_{rot} modélise le vent engendré par la rotation de l'éolienne. La somme des deux vecteurs donne V_{res} . La force du vent sur la pale est notée F_{res} qui est constitué de F_{ax} lié à la résistance du mat et F_{rot} qui produira le mouvement désiré.

Lorsque le vent est trop puissant, L'angle calage β est alors ajusté pour restreindre l'extraction de la puissance nominale [39].

II-15-b Modes du Système de régulation de vitesse

La caractéristique puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en trois zones [40].

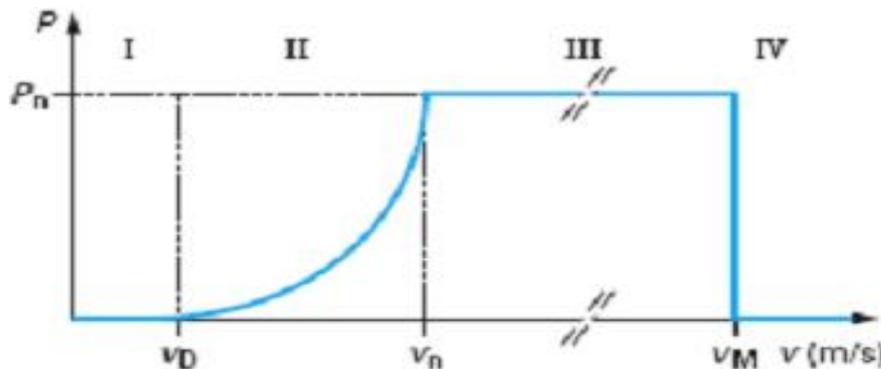


Figure II-20 Modes du système de régulation [75]

avec les paramètres suivantes :

0...VD: La valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.

VD: La vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.

Vn: La valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

VM: La valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

Pn: La puissance nominale de l'éolienne.

II-15-c Système à Décrochage Aérodynamique "Stall"

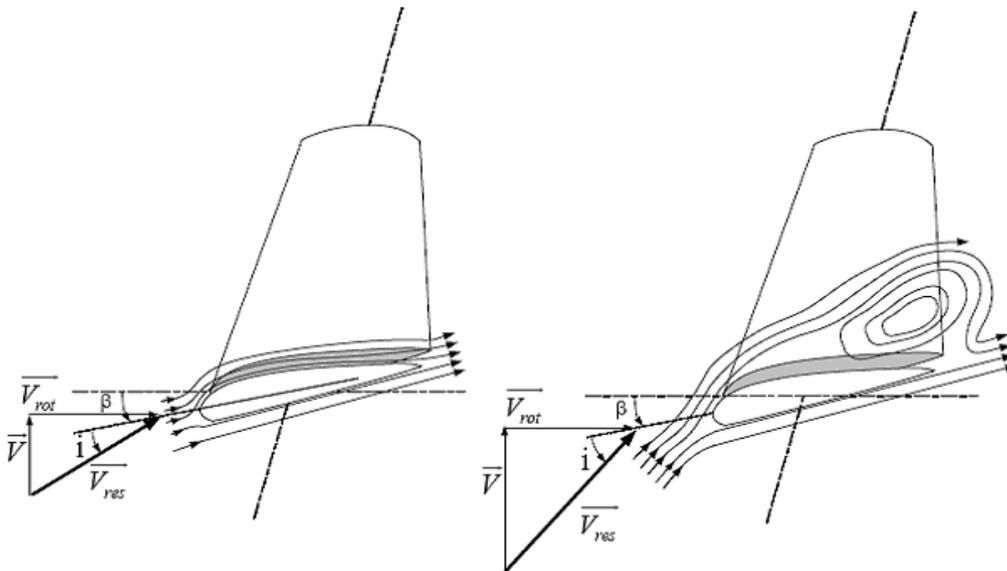


Figure II-21 Flux d'air sur un de pales profile (stall) [75]

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse est le plus simple et le moins coûteux. Lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par conséquent une baisse du coefficient de puissance.

Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être

amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent.

II-15-d Système à Décrochage Aérodynamique " Pitch "

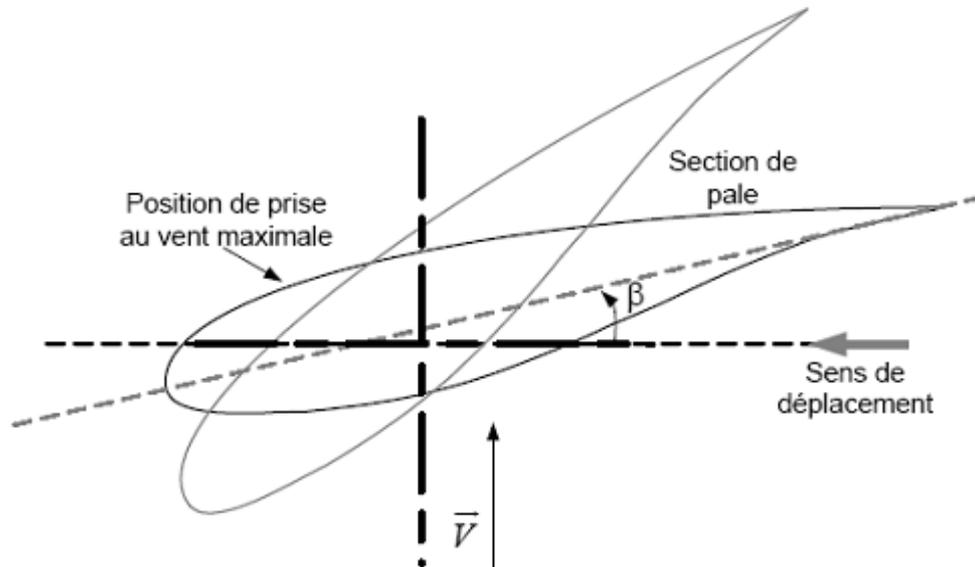


Figure II-22 Variation de l'angle de calage d'une pale [75]

Pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. C' est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW).

Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure [40].

II-16 Principe de la conversion d'énergie mécanique-électrique

Les machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens sont deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne, sont comme suite les machines synchrones et asynchrones.

II-16-a Machines Synchrones

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (sans multiplicateur mécanique), pour minimiser la maintenance et accroître la fiabilité [41].

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que le générateur à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure20), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite [42].

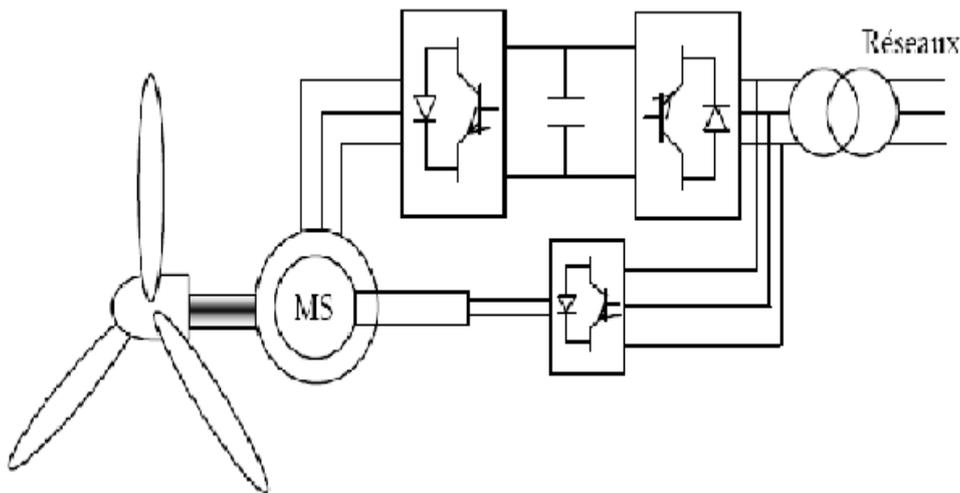


Figure II-23 Eolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à rotor bobiné

L'utilisation des génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents.

Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées principalement pour les raisons suivantes [43].

- a. Prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares).

- b. Démagnétisation progressive découlant de l'utilisation de ces aimants en présence de champs magnétiques intenses régnant dans le générateur.

Pour une puissance désirée, on a le choix entre une petite génératrice (à faible nombre de pôles) tournant à grande vitesse, ou une génératrice de grande dimension (présentant un grand nombre de pôles) mais tournant plus lentement.

▪ **Les machines synchrones à aimants permanents (MSAP)**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné [44].

✓ **Avantages des génératrices synchrones [36]**

- a. Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- b. Absence de boîte de vitesse.
- c. Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.

✓ **Inconvénients des génératrices synchrones**

- a. Machine spécifique
- b. Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.
- c. Grand diamètre de la machine

II-16-b Machines Asynchrones

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages: elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique.

On peut regrouper les machines asynchrones éoliennes selon différentes catégories.

Ils peuvent être classés selon :

▪ Machines Asynchrones à cage d'écureuil

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau (sans interface électronique de puissance) jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt [45].

Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse [45].

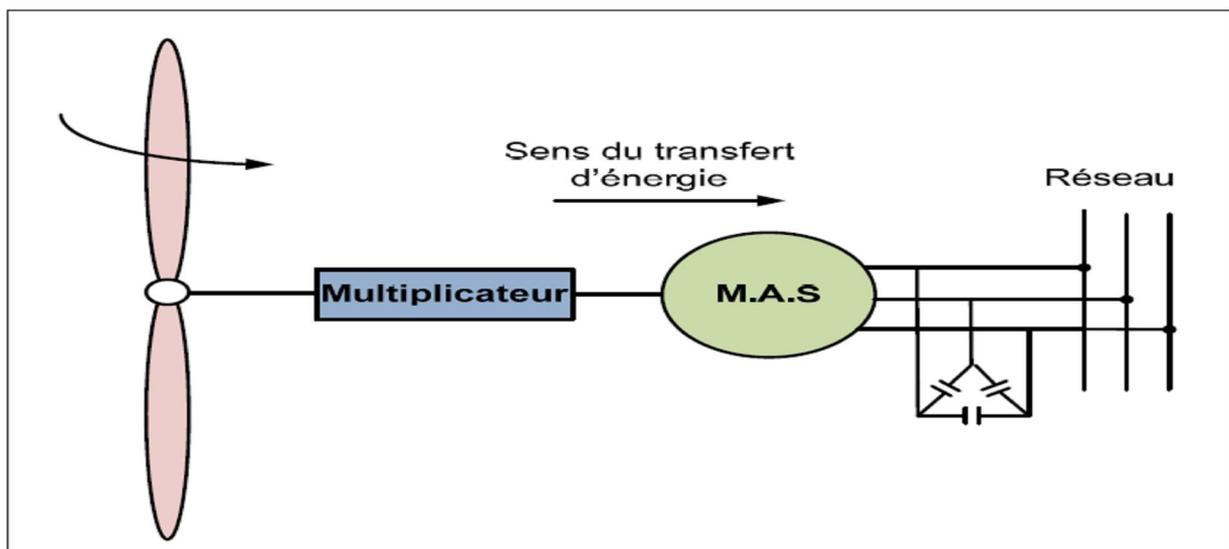


Figure II-24 Connexion directe d'une machine asynchrone dur le réseau [33]

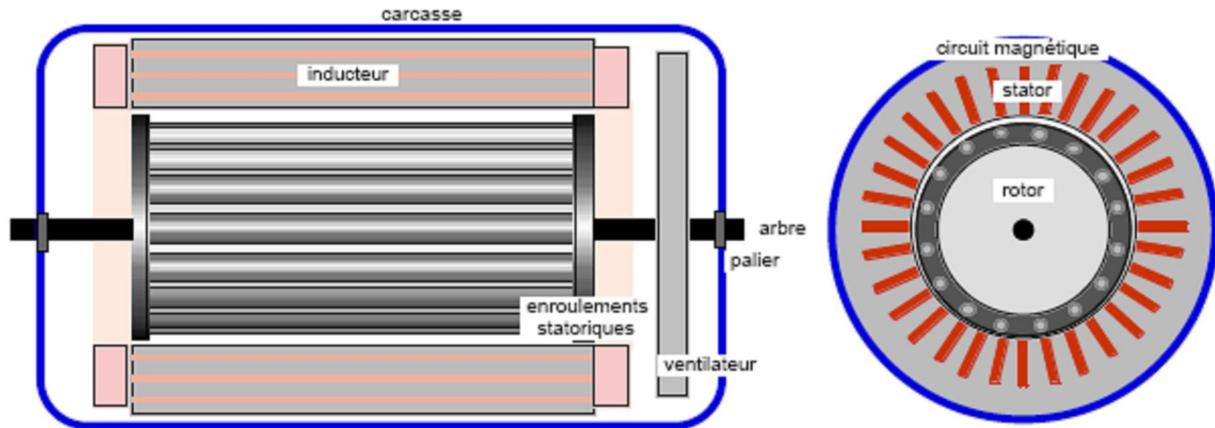


Figure II-25 Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil [46]

▪ Machines Asynchrones à double alimentation

Une machine triphasée à courant alternatif avec deux enroulements triphasés accessibles, dans lesquels la puissance peut être fournie ou extraite de la machine à travers ces enroulements. Ce type de machines nécessite une seule d'alimentation alternative qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'entraînement et de génération à vitesse variable, dont le glissement peut être modifié au de l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien les deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction [47].

Les machines asynchrones à rotor bobiné ont des enroulements logés dans des encoches. Les courants rotors circulent via des anneaux qui glissent contre des balais généralement en carbone montés sur le châssis du générateur. Contrairement aux machines à cage directement connectées au réseau, elles permettent, par un réglage dynamique du glissement, de s'adapter aux variations de puissance fournies par la turbine, augmentant ainsi le rendement du système. Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa) utilisent ce type de machines [33].

L'utilisation de la MADA pour la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est très répandue.

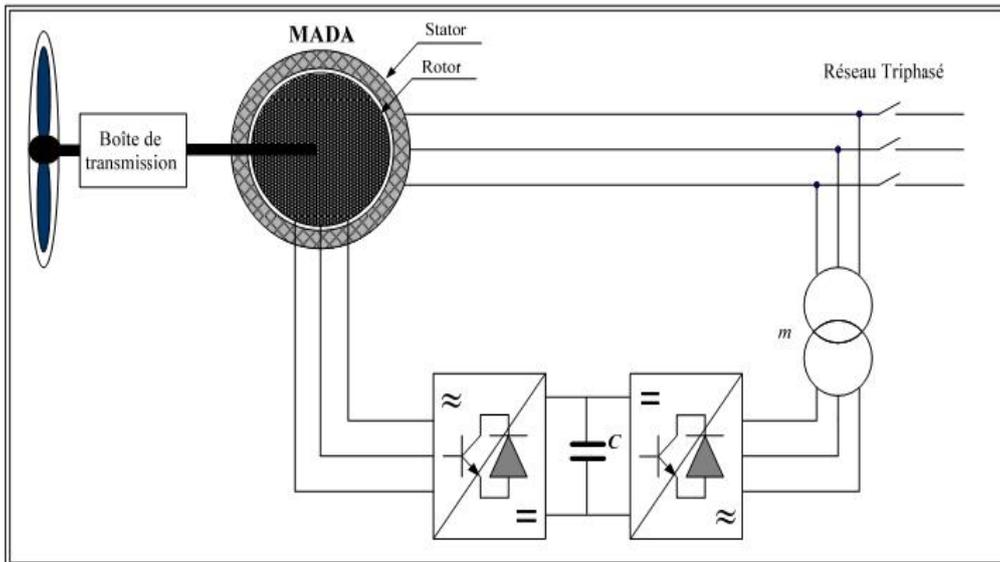


Figure II-26 Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA [48] .

II-16-c Modes de fonctionnement de la MADA [49]

1. Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

La puissance est fournie par le réseau au stator, et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner comme suit.

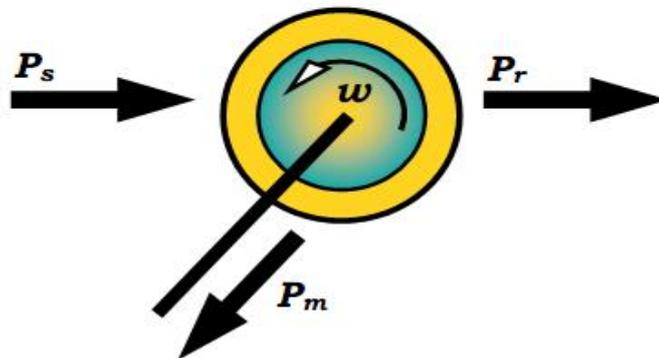


Figure II-27 Fonctionnement de la Mada en Moteur hypo-synchrone

2. Fonctionnement en moteur hyper-synchrone

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au dessus de la vitesse de synchronisme, figure 22. La machine à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

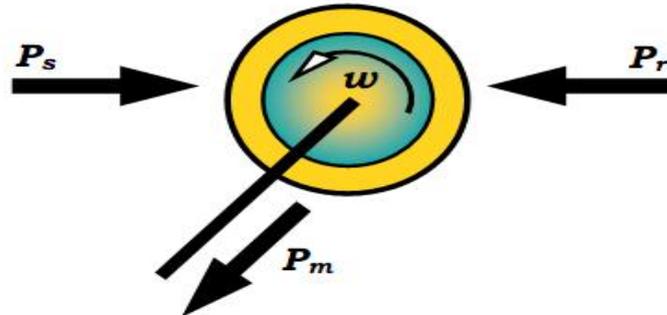


Figure II-28 Fonctionnement de la MADA en Moteur hyper-synchrone

3. Fonctionnement en génératrice hypo-synchrone

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. Le rotor absorbe la puissance du glissement et la direction du champ magnétique est identique à celle du champ du stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut fonctionner dans ce régime.

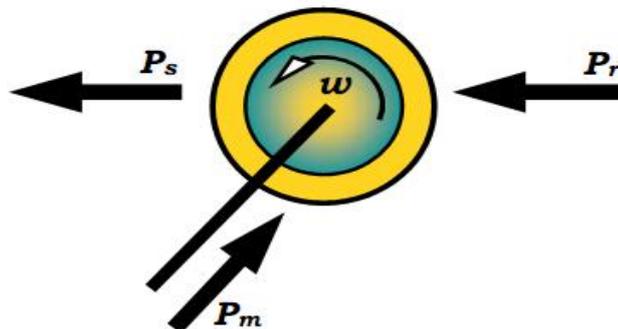


Figure II-29 Fonctionnement de la MADA en Génératrice hypo-synchrone

4. Fonctionnement en génératrice hyper-synchrone

La puissance est alors fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la vitesse de synchronisme. La machine à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

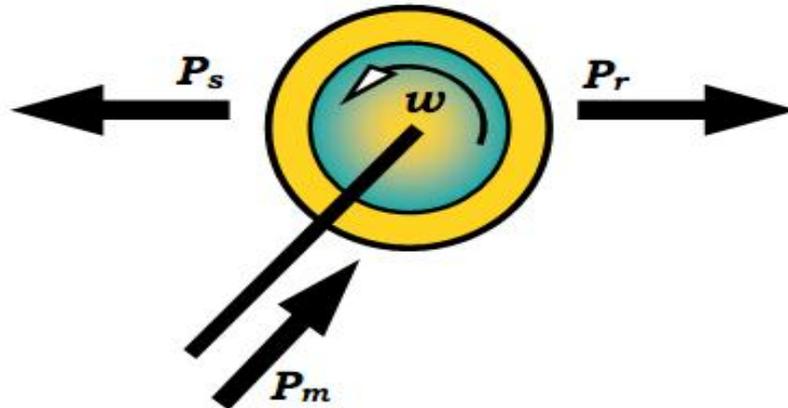


Figure II-30 Fonctionnement de la DFAM en Génératrice hyper-synchrone

II-17 Conclusion

On peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Depuis plusieurs années, la production d'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde entier. Ceci dû à la production d'une énergie propre et elle une source d'énergie durable et alternative aux combustibles fossiles. En 31/12/2012 puissance installée a atteint 75000W par la chine.

Concernant le gisement éolien, en Algérie, le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar .Concernant le nord, on remarque que la vitesse moyenne est peu élevée.

Le plus important point tel que la connaissance de la distribution de la vitesse du vent sur un site donné permet l'estimation de l'énergie éolienne disponible et récupérable par les éoliennes.

On constate que : Les éoliennes rapides à axe horizontal ont un nombre de pales assez réduit. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement.

Concernant les machines utilisées dans le système éolien, on constate que les machines asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa) utilisent ce type de machines

Il est à noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation de toute la chaîne du système éolien basé à une génératrice à double alimentation.

III-1 Introduction

IL existe deux grandes familles d'éoliennes : celle à axe vertical et celle à axe horizontal. Actuellement, les éoliennes à axe horizontal sont largement plus utilisées que les éoliennes à axe vertical pour des raisons économiques liées à leur fabrication et à leur installation. Parmi les éoliennes à axe horizontal, on distingue celles à vitesse fixe et celles à vitesse variable. Ces dernières sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie électrique sur le réseau électrique. Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice électrique de type machine asynchrone à rotor bobiné.

La machine asynchrone à double alimentation avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement. La génératrice permet de fonctionner sur une large plage de vitesses du vent en tirant le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse du vent.

L'objectif principal des systèmes éoliens est la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et économique a suscité un très grand intérêt et a exigé aux constructeurs de réfléchir toujours à de nouvelles solutions robustes, permettant l'extraction du maximum d'énergie et l'étude des différents systèmes réalisables.

Ce chapitre a pour objectifs de présenter une petite description de la chaîne du système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice à double alimentation (GADA) et son concept de base en trois pales à rotor horizontal.

Dans un deuxième temps, nous détaillerons les différentes modélisations du système éolien tel que : modèle aérodynamique, turbine, multiplicateur, modèle de l'arbre ainsi que celui de la génératrice. Ensuite, nous présenterons en plus la modélisation du convertisseur y compris la commande MLI.

Dans le prochain chapitre, on présente les différentes simulations et résultats de toute la chaîne du système éolien.

III-2 Modélisation du système éolien

III-2-1 Généralité sur la Modélisation

La modélisation d'une machine électrique est une phase primordiale de son développement. Les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes et d'envisager l'optimisation des machines électriques [49].

III-2-2 Le système éolien

Le système éolien étudié dans ce mémoire, basé sur une MADA en fonctionnant comme une petite génératrice asynchrone à double alimentation, est illustré à la Figure ci-dessous. La turbine, via un multiplicateur, entraîne la MADA, laquelle est raccordée au réseau électrique directement par le stator mais également à travers de convertisseurs statiques triphasés à IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) par le rotor. Celui-ci est muni de systèmes bagues/balais. Ces Convertisseurs Côtés MADA et Réseau, notés respectivement sont commandés en Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) [09].

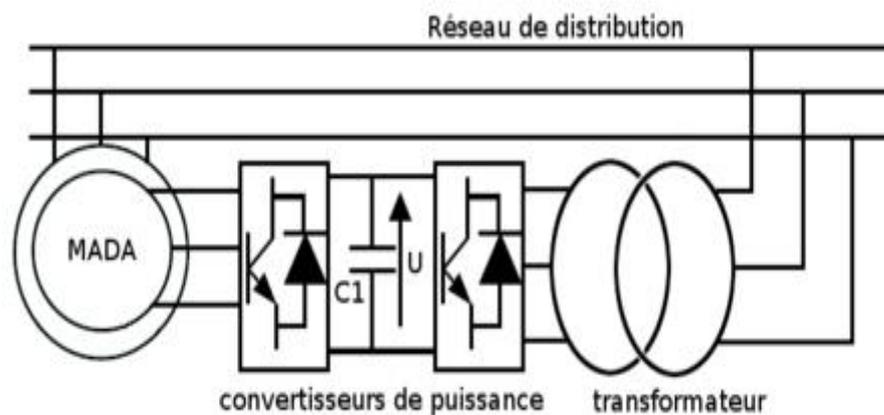


Figure III-1 Système éolien basé sur une MADA [76]

III-2-3 Modélisation de la chaîne du système éolien

Le dispositif étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers multiplicateur de vitesse de gain G [50].

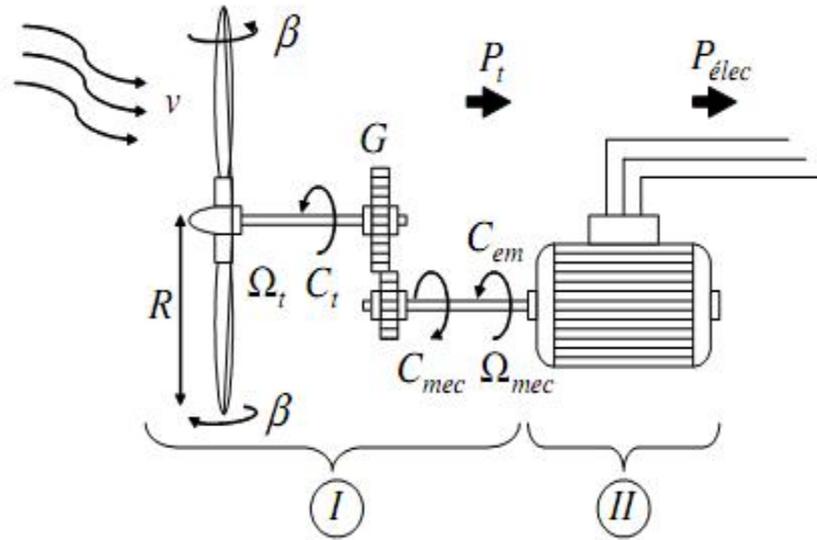


Figure III-2 Schéma de configuration de la turbine éolienne [51]

▪ **Modélisation La puissance produite**

1. **La puissance du vent**

$$P_{\text{vent}} = \frac{\rho S V^3}{2} \quad (\text{III.1})$$

2. **La densité de probabilité**

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (\text{III.2})$$

Ainsi, connaissant les caractéristiques de l'aérogénérateur choisi, la moyenne mensuelle par jour de la vitesse du vent et la densité de probabilité correspondante, nous pouvons déduire rapidement la puissance produite par l'aérogénérateur :

$$P(v) = \int_{v_{in}}^{v_{out}} p(v) f(v) dv \quad (\text{III.3})$$

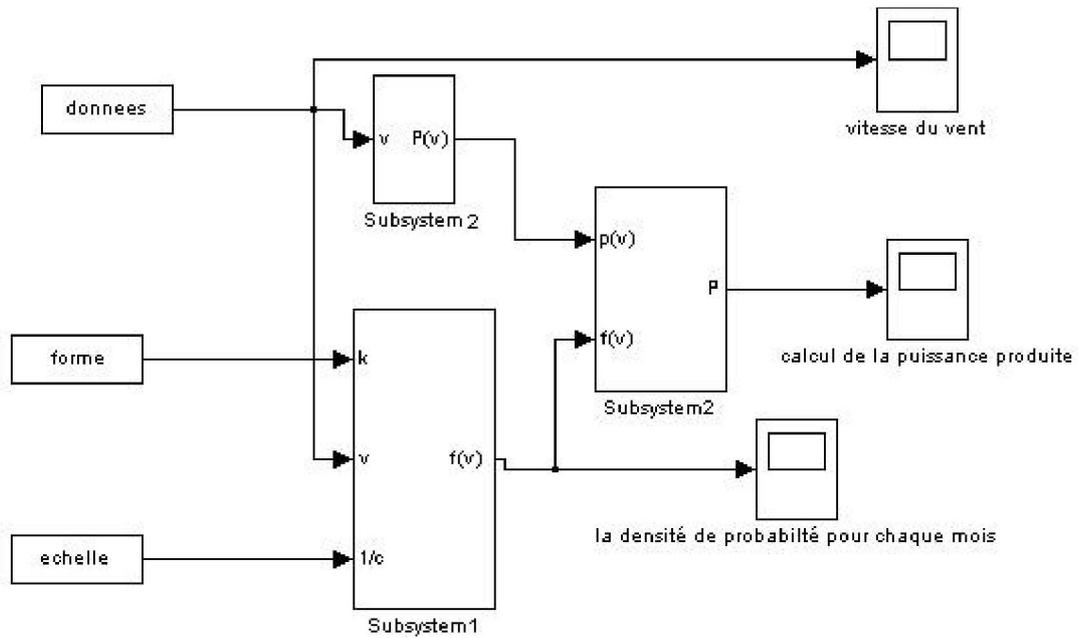


Figure III-3 Modélisation du système de production éolienne sous simulink [52]

III-3- Modélisation de la conversion d'énergie éolienne

- Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure III-4 avec la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et V_2 en aval. Supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre les vitesses V_1 et V_2 telque on a :

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \tag{III.4}$$

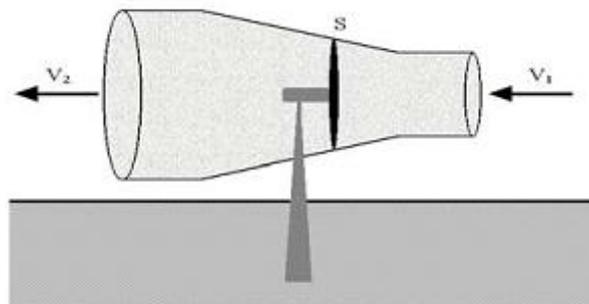


Figure III-4 tube de courant autour d'éolienne [17]

En appliquant la théorie de la quantité de mouvement et du théorème de Bernoulli, on peut déterminer la puissance incidente (la puissance théorique), due au vent. Donc La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante et d'après la théorie de Betz, la puissance du vent est:

$$P_{\text{vent}} = \frac{\rho S V^3}{2} \quad (\text{III.5})$$

Avec S la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air 1.25 kg /m³ et v la vitesse du vent . L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent, La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $P_{\text{éolienne}}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance C_p .

$$(\text{III.6})$$

$$P_{\text{éolienne}} = C_p \times P_{\text{vent}}$$

▪ Modèle de la turbine éolienne

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site.

$$P_{\text{éolienne}} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) * \rho * \pi * R^2 * V_1^3 \quad (\text{III.7})$$

ρ : La densité de l'air, environ 1.26 kg/m³

S : surface balayée par l'hélice en m²

V1 : La vitesse du vent en m/s.

$P_{\text{éolienne}}$: La puissance en Watt

R : rayon du rotor

Ω :Vitesse angulaire de rotation

▪ Cas de la turbine moyenne et grande puissance

Le schéma bloc qui représente la turbine éolienne

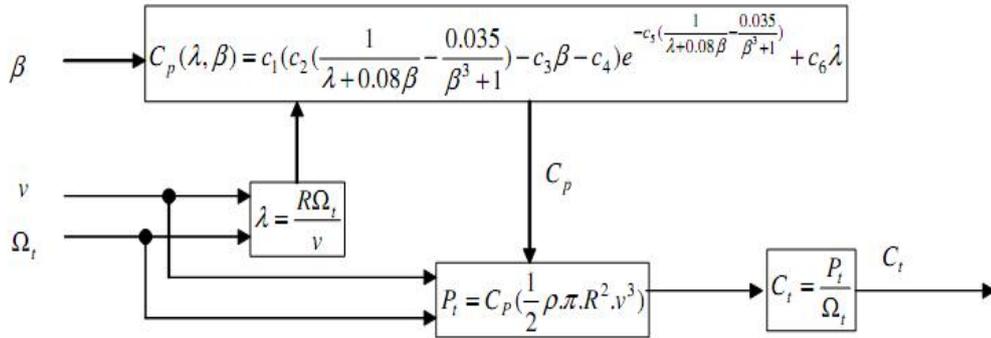


Figure III-5 Modèle de la turbine éolienne $C_p(\gamma, \beta)$

▪ Cas de la turbine petite puissance

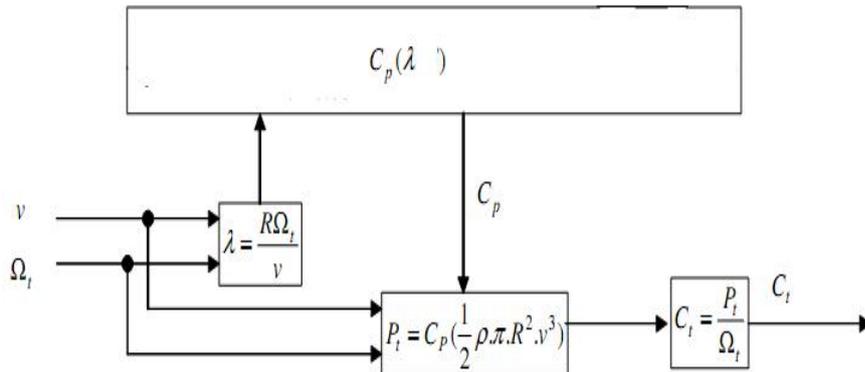


Figure III-6 Modèle de la turbine éolienne $C_p(\gamma)$

Dans un système éolien, à cause des différentes pertes, la puissance extraite disponible sur le rotor de la turbine, est inférieure à la puissance incidente. La puissance extraite ou puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s’écrit alors :

$$P_t = C_p P_v = C_p(\lambda, \beta) \frac{\rho S v^3}{2} \tag{III.8}$$

P_t : La puissance extraite ou puissance aérodynamique

P_v : La puissance incidente ou puissance du vent

C_p : Le coefficient de puissance ou rendement aérodynamique

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. L'expression du coefficient de puissance pour ce type de turbine, est déterminée par l'équation suivante [42].

La limite n'est en réalité jamais atteinte et que chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

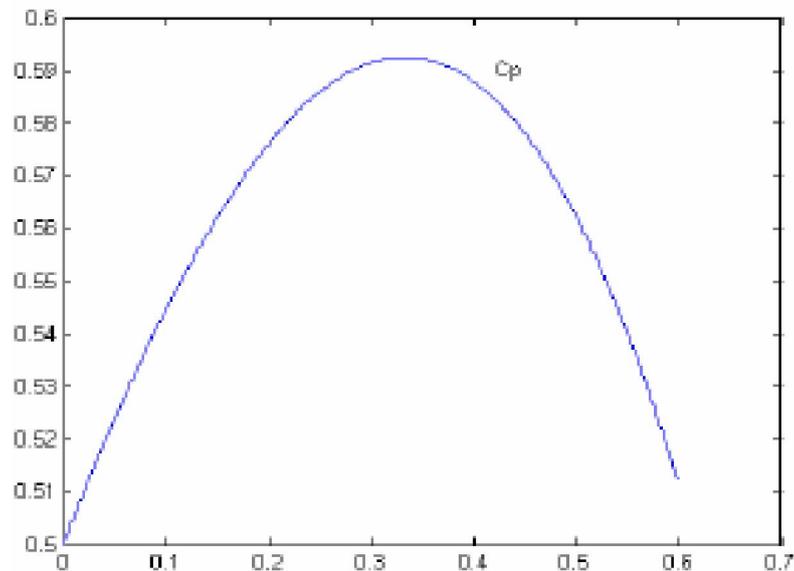


Figure III-7 Coefficient de puissance

- **Les différents coefficients de puissance C_p**

1. **Cas du type d'une éolienne : [50]**

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$$

- **Cas du type d'une éolienne :[08]**

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta_i) \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot \beta_i$$

- **Cas du type d'une éolienne (machine asynchrone) :[53]**

$$C_p = 7.9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17.375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9.86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9.4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6.38 \cdot 10^{-2} \lambda + 0.001$$

- **Cas du type d'une éolienne :[42]**

$$C_p = f(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right)$$

- **Cas du type d'une éolienne :[39]**

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6\lambda$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation des pales β . Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{III.9})$$

$$\lambda = \frac{(R * \Omega_i)}{v} \quad (\text{III.10})$$

β : L'angle de calage des pales

λ : Le rapport de vitesse

R : Rayon de la turbine = longueur de pale en (m).

Ω_t : Vitesse angulaire mécanique (rad / s) de la turbine

v : vitesse du vent m/s.

Pour notre exemple d'éolienne, en remplaçant $1/\lambda_i$ dans la formule, le coefficient de puissance est devenu comme suit :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(C_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - C_3\beta - C_4 \right) \exp^{-C_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + C_6\lambda \quad (\text{III-11})$$

Où : $C_1 = 0.5109$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$,
 $C_6 = 0.0068$

La figure 1.6 illustre les courbes du coefficient de puissance en fonction de lamda $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β

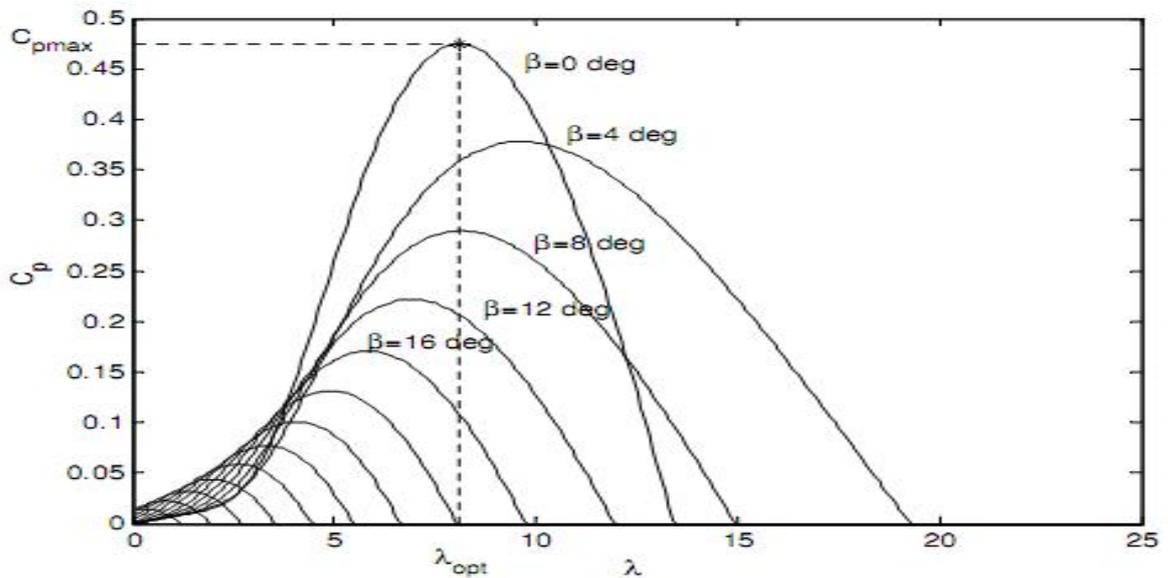


Figure III-8 $C_p(\lambda)$ pour plusieurs valeurs de β

Sur la figure ci-dessus, plusieurs courbes sont distinguées mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet. Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\beta = 0$ (deg) , $C_{p_{\max}} = 0.475$, $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β

permet de dégrader le coefficient C_p , et par conséquent, provoquer la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne [51].

Le couple mécanique sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{0.5 C_p \rho \pi R^2 v^3}{\Omega_t} \quad (\text{III.12})$$

C_t : Le couple mécanique en (N.m).

▪ Modèle du multiplicateur

:

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur [54].

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (\text{III.13})$$

Où :

G : Le Rapport de multiplication (-)

C_{mec} : Couple mécanique sur l'axe du générateur en (N.m)

Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine à celle du générateur comme suivant :

$$\Omega_{mec} = G * \Omega_t \quad (\text{III.14})$$

Où :

Ω_{mec} : Vitesse du générateur (rad / s).

▪ Modèle de l'arbre

L'arbre du générateur est modélisé par l'équation suivant :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f * \Omega_{mec} = C_T \quad (\text{III.15})$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes (Kg.m²)

f : Coefficient de frottements visqueux

Ω_{mec} : Vitesse du générateur (rad / s).

$C_T = C_{mec} + C_{em}$: Couple total de l'éolienne en (N.m)

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique C_{em} a un signe négatif. L'inertie totale est la somme de l'inertie du générateur et de la turbine ramenée au côté générateur c'est-à-dire :

$$J = \frac{J_{Turbine}}{G^2} + J_{Générateur} \quad (\text{III.16})$$

La fonction de transfert de l'équation de l'arbre du générateur est donnée

par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f * \Omega_{mec} = C_T \quad (\text{III.17})$$

Appliquant la fonction de Laplace, on obtient comme suit :

$$JS \Omega_{mec}(S) + f * \Omega_{mec}(S) = C_T(S) \quad \text{et} \quad \Omega_{mec}(S)[(JS + f)] = C_T(S)$$

Alors ,on a

$$F(S) = \frac{\Omega_{mec}(S)}{C_T(S)} = \frac{1}{JS + f} \quad (\text{III.18})$$

Le schéma bloc suivant représente le modèle de l'arbre de l'éolienne associé au modèle de la turbine :

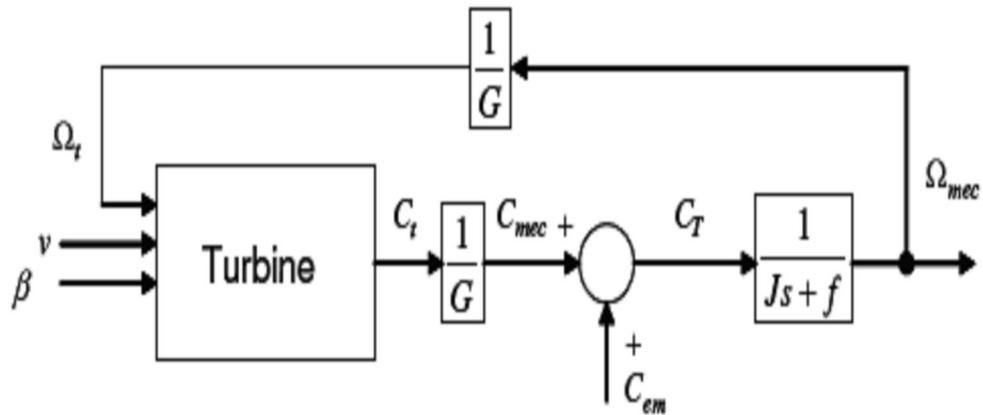


Figure III-9 Modèle de l'arbre et de la turbine éolienne

III-3-1 Modélisation de la partie électrique

▪ Description de la Génératrice

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator a trois (03) enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension.

Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans l'entrefer de la machine, où sa vitesse est : $\Omega_s = \omega_s / p$.où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et p est le nombre de paires de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator. Le rotor qui est exécuté comme le stator, supporte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôles, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse $\Omega = d\theta/dt$ par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique [34].

▪ **Modèle de la Génératrice [55]**

Les expressions des tensions dans le système d'axes dq sont de la forme :

$$U_{sd} = -r_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_{os} \psi_{sq} \quad (\text{III.19})$$

$$U_{sq} = -r_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_{os} \psi_{sd} \quad (\text{III.20})$$

$$U_{rd} = r_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - (\omega_{os} - \omega_r) \psi_{rq} \quad (\text{III.21})$$

$$U_{rq} = r_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + (\omega_{os} - \omega_r) \psi_{rd} \quad (\text{III.22})$$

Les expressions des flux dans le même système d'axes :

$$\psi_{sd} = -L_s i_{sd} + M_{sr} i_{sd} \quad (\text{III.23})$$

$$\psi_{sq} = -L_s i_{sq} + M_{sr} i_{sq} \quad (\text{III.24})$$

$$\psi_{rd} = -L_r i_{rd} - M_{rs} i_{sd} \quad (\text{III.25})$$

$$\psi_{rq} = -L_r i_{rq} - M_{rs} i_{sq} \quad (\text{III.26})$$

Sachant que $M_{sr} = M_{rs} = M$ et en remplaçant les flux par leurs expressions dans le système d'équation des tensions, on obtient comme suit :

$$U_{sd} = -r_s i_{sd} - L_s \frac{di_{sd}}{dt} + M \frac{di_{rd}}{dt} + \omega_{os} L_s i_{sq} - \omega_{os} M i_{rq} \quad (\text{III.27})$$

$$U_{sq} = -r_s i_{sq} - L_s \frac{di_{sq}}{dt} + M \frac{di_{rq}}{dt} - \omega_{os} L_s i_{sd} + \omega_{os} M i_{rd} \quad (\text{III.28})$$

$$U_{rd} = r_r i_{rd} + L_r \frac{di_{rd}}{dt} - M \frac{di_{sd}}{dt} - (\omega_{os} - \omega_r) L_r i_{rq} + (\omega_{os} - \omega_r) M i_{sq} \quad (\text{III.29})$$

$$U_{rq} = r_r i_{rq} + L_r \frac{di_{rq}}{dt} - M \frac{di_{sq}}{dt} + (\omega_{os} - \omega_r) L_r i_{rd} - (\omega_{os} - \omega_r) M i_{sd} \quad (\text{III.30})$$

i_d, i_q	Courants statoriques
U_d, U_q	Courants rotoriques
$\Psi_{sd,q}, \Psi_{rd,q}$	Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant
r_r, r_s	Résistances statorique et rotorique
L_r, L_s	Inductance cyclique propre statorique et rotorique
M	Inductances cycliques mutuelle stator – rotor
ω_{os}	La Pulsation statorique
ω_r	La Pulsation rotorique
ω_m	La différence des pulsations

Posant $\omega_m = \omega_{os} - \omega_r$. En mettant le système d'équations précédent sous la forme compacte ou matricielle, on obtient comme suit:

$$[B][U] = [L][i] + \omega_m [C][I] + [D][I] \quad (\text{III.31})$$

$$[U] = [U_{sd} \ U_{sq} \ U_{rd} \ U_{rq}]^T \quad (\text{III.32})$$

$$[\mathbf{I}] = [\mathbf{i}_{sd} \ \mathbf{i}_{sq} \ \mathbf{i}_{rd} \ \mathbf{i}_{rq}]^T \quad \text{et} \quad [\dot{\mathbf{i}}] = \frac{d}{dt} [\mathbf{I}] \quad (\text{III.33})$$

$$[\mathbf{B}] = \text{diag} \quad [1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (\text{III.34})$$

$$[\mathbf{L}] = \begin{bmatrix} -L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & -L_s & 0 & M \\ -M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & -M & 0 & L_r \end{bmatrix} \quad [\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & -L_r \\ -M & 0 & L_r & 0 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{D}] = \begin{bmatrix} -r_s & \omega_{os} L_s & 0 & -\omega_{os} M \\ -\omega_{os} L_s & -r_s & \omega_{os} M & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix}$$

En mettant le système sous la forme d'état, on obtient comme suit :

$$[\dot{\mathbf{i}}] = [\mathbf{L}]^{-1} \{[\mathbf{B}][\mathbf{U}] - [\mathbf{D}][\mathbf{I}] - \omega_m [\mathbf{C}][\mathbf{I}]\} \quad (\text{III.35})$$

III-4 Configurations

Une présentation des différents travaux réalisés sur la machine asynchrone à double alimentation a été effectuée concernant l'utilisation des convertisseurs statiques pour l'alimentation. Deux configurations sont proposées :

III-4-1 Configuration pour fonctionnement moteur

Une où la machine est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor et dédiée à des applications industrielles telles que le laminage, les enrouleurs dérouleurs, le pompage, la traction ferroviaire, la propulsion maritime ou encore toute application demandant une large plage de fonctionnement à puissance constante (fonctionnement moteur) [56].

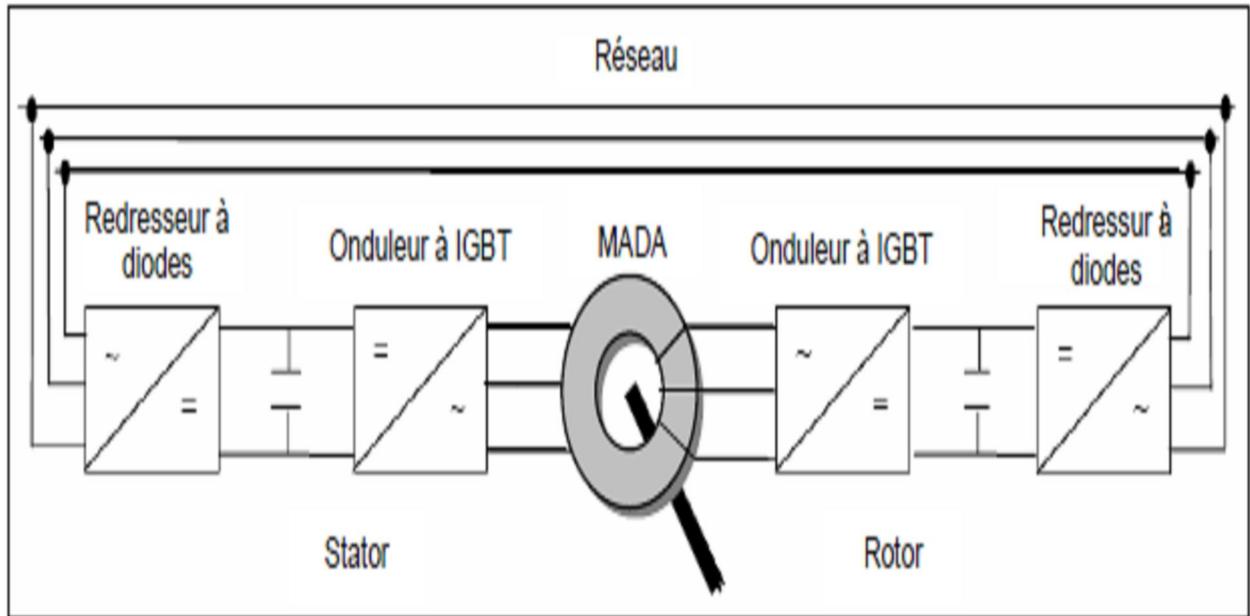


Figure III-10 Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application moteur

III-4-2 Configuration pour fonctionnement génératrice

L'autre où la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien).

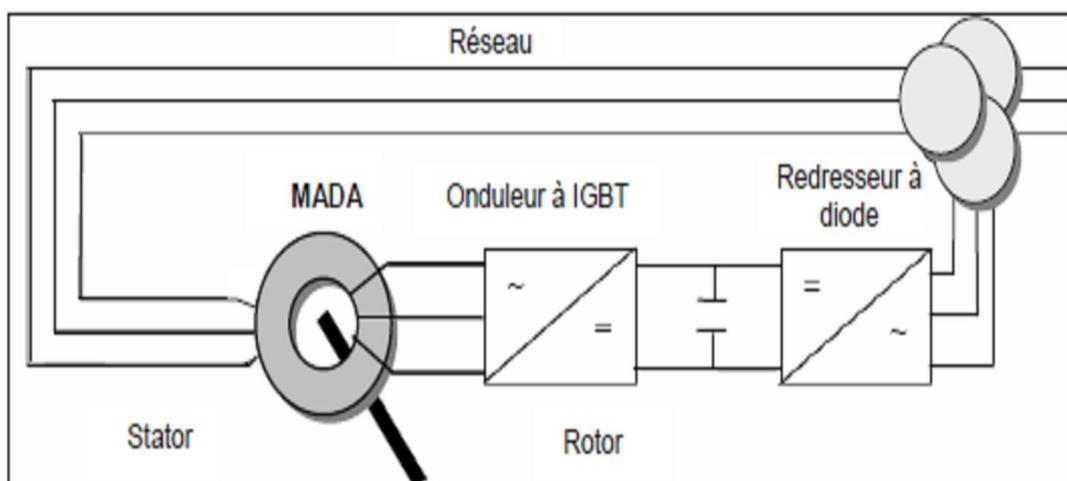


Figure III-11 Schéma de l'alimentation de la MADA pour une application génératrice

Ce type de configuration que nous intéressons, d'une part parce que la machine fonctionne en régime génératrice pour la production de l'énergie éolienne, d'autre part pour minimiser le nombre des convertisseurs statiques utilisés par conséquence de minimiser le prix [24].

La majorité des applications industrielles faisant appel à ce type de configuration est liée à la production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne où la machine fonctionne en tant que génératrice. La MADA est alors une solution attractive puisqu'elle présente un avantage majeur : le convertisseur alimentant le rotor est dimensionné généralement pour 30% de la puissance nominale du rotor. La puissance apparente du convertisseur rotorique est toutefois liée à la plage de variation de la vitesse de la machine qui est toujours choisie autour de la vitesse de synchronisme ; plus la plage de variation de la vitesse est petite plus la puissance du convertisseur du rotor est petite aussi [56].

III-5 Modélisation de l'alimentation du Rotor par le convertisseur

Le fonctionnement avec convertisseur statique est effectué en utilisant un seul convertisseur au rotor composé d'un redresseur à diodes, un filtre passe bas et d'un onduleur à IGBTs (Transistors bipolaires à gâchette isolée) alors que le stator est relié directement au source triphasé. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) utilisée est régulière, triangulaire, symétrique. Les IGBTs sont choisis en raison de la simplicité de leur commande et de la rapidité de leur commutation, malgré un coût supérieur des thyristors [24].

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor ; ce dernier qui est contrôlé par une technique de modulation de largeur impulsion (MLI) permet le réglage simultanément de la fréquence et la tension. L'objectif de l'utilisation de la commande MLI est de réduire ou de minimiser les oscillations sur la vitesse, le couple et les courants [57].

Voilà sur la figure ci-dessous le schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA.

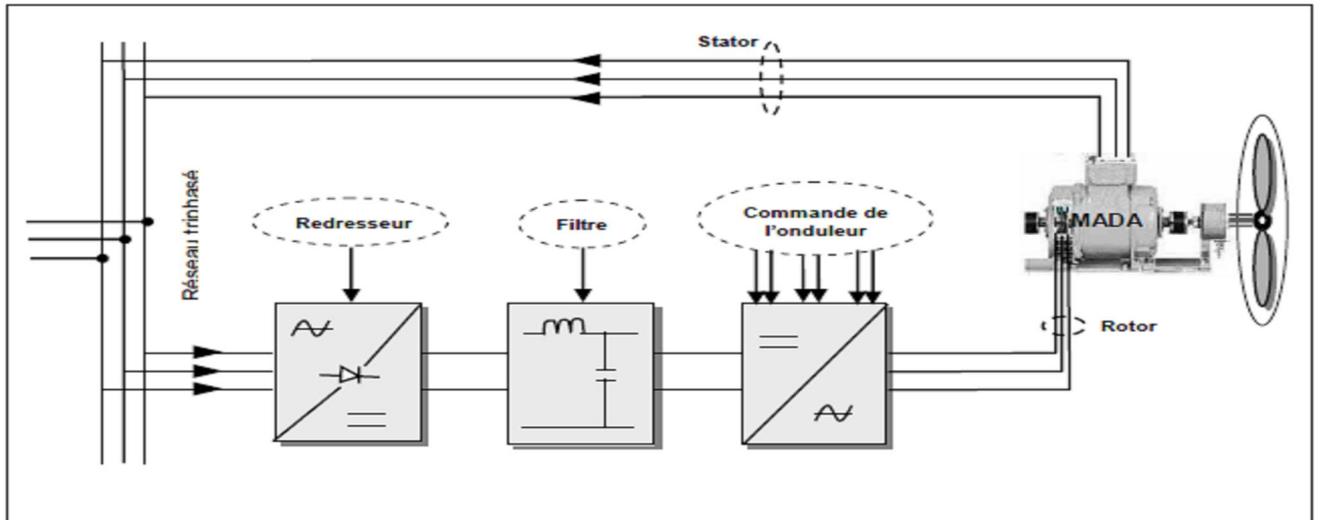


Figure III-12 Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA

III-5-1 Modélisation du redresseur triphasé à diodes

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif.

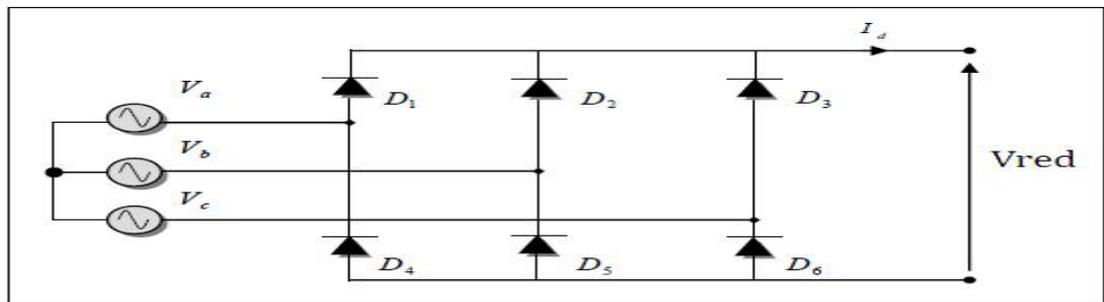


Figure III-13 Schémas du redresseur triphasé à diodes

Ce redresseur comporte trois diodes (D_1 , D_2 , D_3) à cathode commune assurant l'allée du courant I et trois diodes (D_4 , D_5 , D_6) à anode commune assurant le retour du courant I_d . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$V_a(t) = V_m \sin(2\pi ft) \quad (\text{III.36})$$

$$V_b(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{III.37})$$

$$V_c(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (\text{III.38})$$

III-5-2 Modélisation du filtre

On utilise un filtre passe bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences.

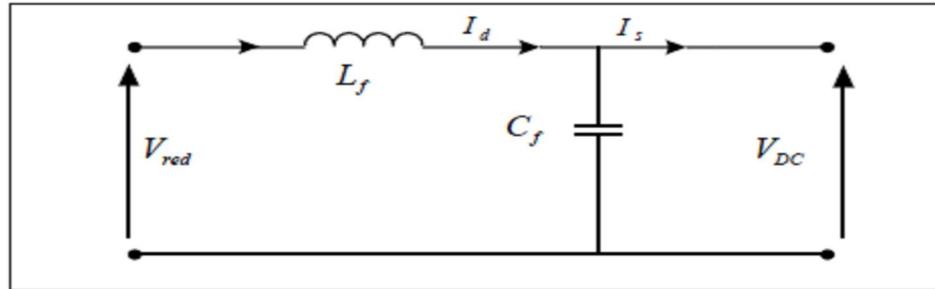


Figure III-14 Schémas du filtre passe-bas

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = \frac{V_{red} - V_{DC}}{L_f} \\ \frac{dV_{DC}}{dt} = \frac{I_d - I_s}{C_f} \end{cases} \quad (\text{III.39})$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{V_{DC}(s)}{V_{red}(s)} = \frac{1}{L_f C_f s^2 + 1} \quad (\text{III.40})$$

Où : s est l'opérateur de LAPLACE

Cette fonction de transfert est de deuxième ordre dont la fréquence de coupure est :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (\text{III.41})$$

Pour éliminer l'harmonique d'ordre deux et les harmoniques supérieures, on doit imposer le choix suivant :

$$f_c < 2 \cdot f' \quad (\text{III.42})$$

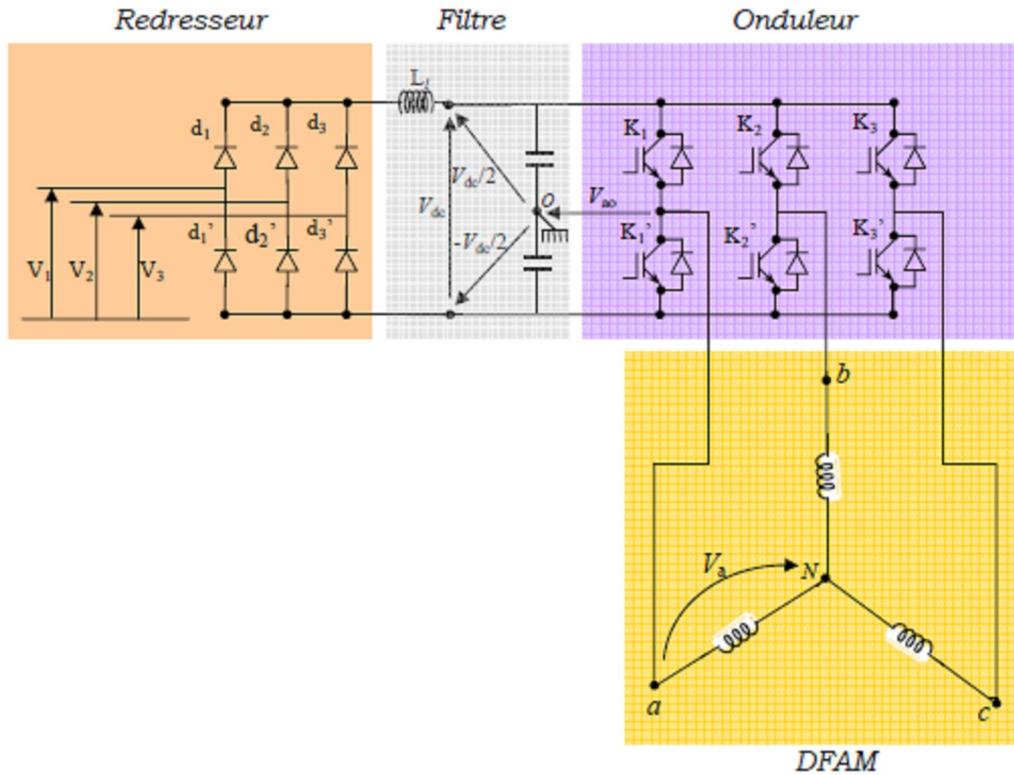


Figure III-16 Association redresseur-filtre-onduleur de tension

Les machines électriques sont alimentées par l’intermédiaire des convertisseurs électroniques de puissance. L’onduleur de tension avec onde porteuse est utilisé pour la commande vectorielle des machines électriques.

Le bloc de commande du convertisseur reçoit les tensions de référence pour les trois phases. Ces tensions sont comparées avec un signal dents de scie, et en fonction du signal d’erreur, on commande les semi-conducteurs de l’onduleur (17). Le mode de fonctionnement est très simple :

- si $V_{ref} > V_p$ - le transistor supérieur du bras de pont conduit,
- si $V_{ref} < V_p$ - le transistor inférieur du bras de pont conduit.

où V_{ref} représente une des trois tensions de référence et V_p représente le signal dents de scie ou l’onde porteuse. Ce type de commande est appelé commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI) ou (PWM en anglais).

Les trois tensions composées V_{bc} , V_{ca} et V_{ab} sont définies par les relations suivantes en tenant compte du point fictif « o ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

Soit « n » le point neutre du coté alternatif (MADA), alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{III.44})$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte que :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{III.45})$$

La substitution de (3) dans (2) nous donne

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{III.46})$$

En remplaçant dans 03, on obtient comme suit:

$$\begin{cases} V_{an} = + \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = - \frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = - \frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{III.47})$$

L'utilisation de l'expression (II.31) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.48})$$

Avec V_{ao} , V_{bo} , V_{co} comme les tensions d'entrée de l'onduleur (valeurs continues), et si v_{an} , v_{bn} , v_{cn} sont les tensions de sortie de cet onduleur, par conséquent l'onduleur est modélisé par la matrice du transfert T donnée par :

$$T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} +2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & +2 \end{bmatrix} \quad (\text{III.49})$$

III-5-4 Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)

Le principe de la stratégie à modulation de largeur d'impulsions triangulo-sinusoidale consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante avec une porteuse triangulaire bipolaire. Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [29].

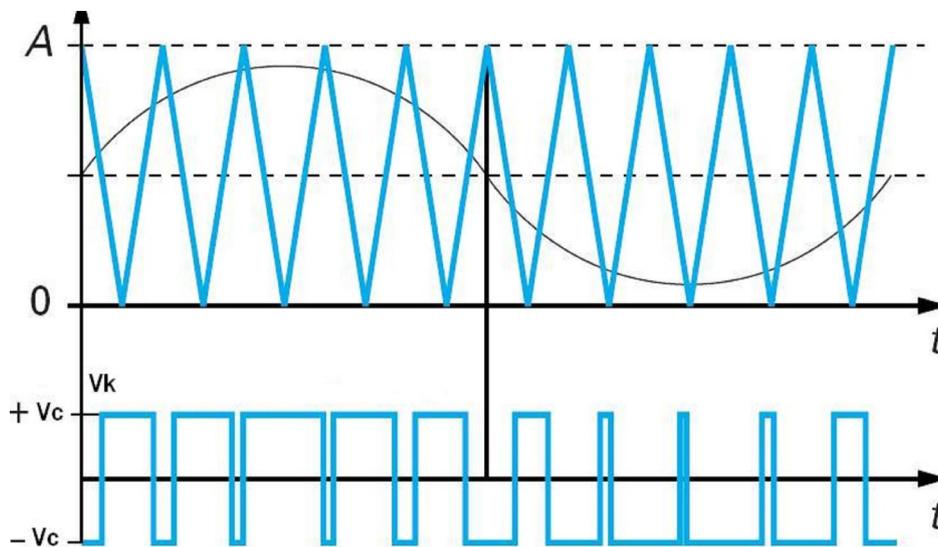


Figure III-17 Principe de fonctionnement de la technique MLI triangulo-sinusoidale à une Porteuse

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation

des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'indice d'amplitude V_{mod} :

$$V_{\text{mod}} = \frac{V_m}{V_p} \quad (\text{III.50})$$

V_m : Valeur de crête de la porteuse

V_p : Valeur maximale de la tension de référence

Ainsi on peut agir sur l'indice de modulation « m » qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence de la tension de référence f_m .

f_p : Fréquence de la porteuse

f_m : Fréquence de la modulante

III-6 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir les modèles mathématiques de toute la chaîne telle que : La puissance produite de l'aérogénérateur, la partie mécanique et la machine asynchrone électrique à travers des équations simples à l'aide de la transformation de Park ensuite la partie convertisseur.

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable.

Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone.

L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

Nous avons analysé les avantages et les inconvénients de l'utilisation des convertisseurs statiques pour l'alimentation de la MADA, deux configurations sont proposées, une où la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien), c'est cette configuration qui nous intéresse, l'autre où la machine est alimentée par deux convertisseurs, l'un au stator et l'autre au rotor.

Ainsi, le chapitre suivant fera l'objet de la simulation de toute la chaîne et leurs résultats.

IV-1 Introduction

Le développement et l'exploitation des énergies éoliennes ont connu une forte croissance ces dernières années. Parmi ces sources d'énergies, les générateurs éoliens occupent une place particulière. En effet d'une part, l'énergie éolienne est appelée à se développer fortement dans de nombreuses régions, et d'autre part, cette énergie très fluctuante, du fait d'importantes variations de la vitesse du vent, peut affecter significativement la qualité de la tension et du courant dans le réseau ou elle est injectée.

L'intérêt porté à la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) ne cesse de croître surtout dans le domaine des énergies renouvelables. En effet, dans le domaine éolien, la GADA présente bien des avantages: le convertisseur lié à l'armature rotorique est dimensionné au tiers de la puissance nominale du rotor, les pertes dans les semi-conducteurs sont faibles, etc. [2].

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies. Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance, tels que les thyristors, les triacs, les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance. Ces composantes ont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme. Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels.

L'utilisation de ces convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique participe à détériorer la 'qualité' du courant et de la tension des réseaux de distribution. En effet, ces systèmes consomment des courants non sinusoïdaux, on présente une synthèse des redresseurs MLI à bande d'hystérésis, qui sont classés comme une solution de ce problème.

Dans la première partie de ce chapitre, on s'intéresse essentiellement au but de la simulation avec logiciel destiné Matlab, le schéma de la simulation, le type de l'éolienne choisie y compris tous les paramètres de la génératrice.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différents paramètres visualisés pendant la simulation avec les résultats obtenus, ainsi que les discussions des résultats.

IV-2 L'objectif de la Simulation

La simulation est une moyenne efficace et économique, couramment utilisée pour faire des études préliminaires et/ ou comparatives. Elle se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

Actuellement, plusieurs outils de simulation, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires, parmi lesquels le MATLAB/SIMULINK.

La modélisation et la simulation interviennent pour :

- La compréhension de la structure et des interactions à l'intérieur d'un système (déterminer le rendement, la performance...)
- L'étude du comportement du système par rapport à son environnement extérieur (consommation énergétique/cout...)
- La prédiction du comportement d'un système pour des situations nouvelles ou extrêmes.
- La conception de nouveaux dispositifs/ composants, étude de système (composant) avant la création de prototype et mise en œuvre de procédés nouveaux (stratégies et algorithmes de contrôle).
- L'optimisation des solutions lors de la conception.

IV-3 Logiciel utilisé pour la Simulation

Le MATLAB est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement SIMULINK, permettant une modélisation basée sur des schémas blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les " Toolboxes ") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications.... etc.

Les simulations proposées sont réalisées sous MATLAB R2010a version 7.10.0.

IV-4 Schémas de simulation de la machine choisie

Dans cette partie nous allons présenter les différents schémas de blocs de simulation de la machine asynchrone à double alimentation GADA. La figure ci-dessous présente le schéma bloc de la simulation.

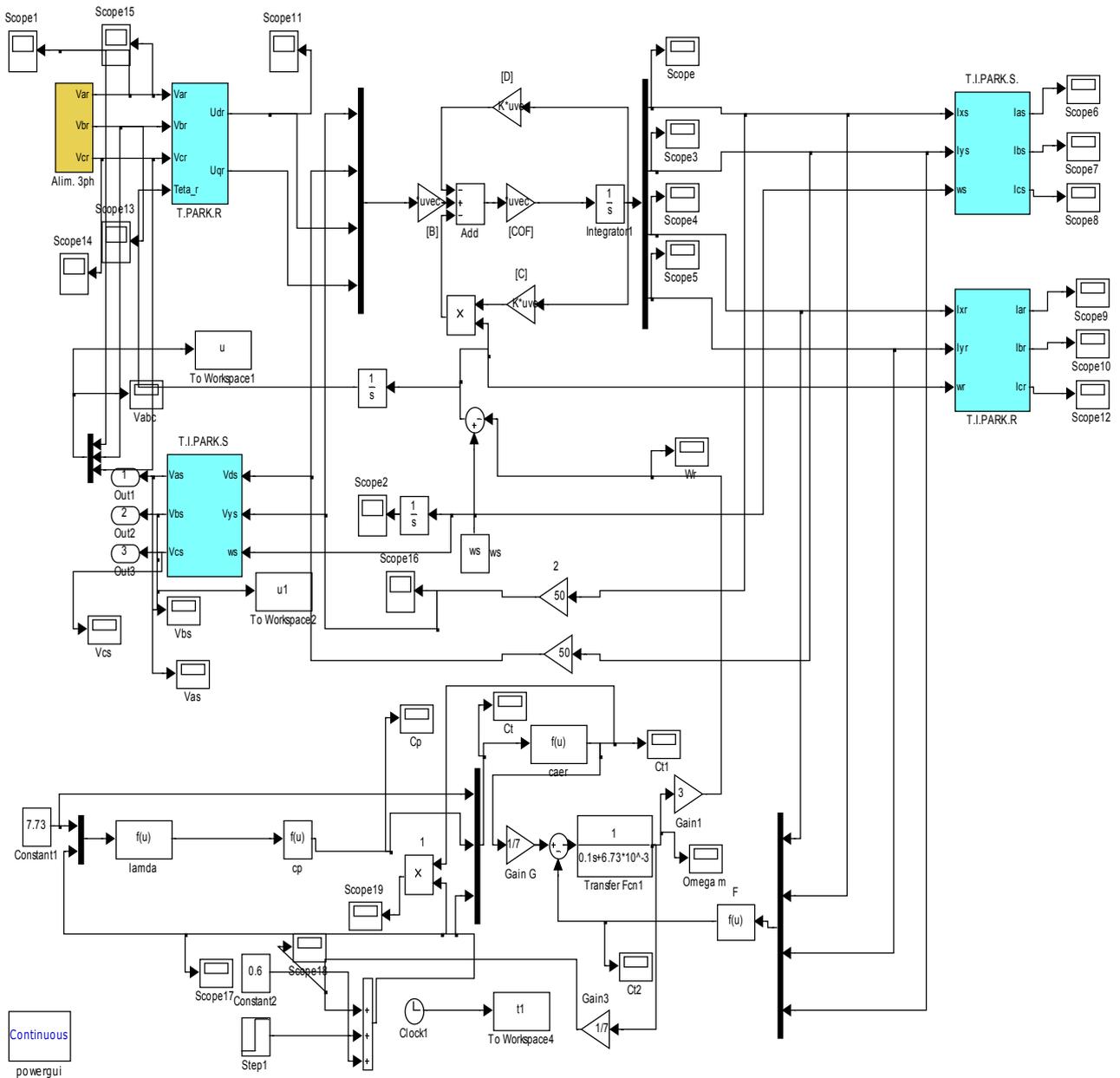


Figure IV-1 Schéma bloc de Simulation

IV-5 Type d'éolienne choisie

Dans cette thèse la machine utilisée est la génératrice asynchrone à double alimentation (gda), alimente une petite charge résistive.

IV-5-1 Fonctionnement de l'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.

IV-5-2 Les paramètres de la génératrice à double alimentation utilisée [55]

Tableau IV-1 Paramètres de l'éolienne choisie

Désignation	Unité	Part Prod Modiale
Puissance nominale	Kw	05
Tension	V	220/380
Fréquence	Hz	50
Vitesse mécanique	Tr/min	1000
Nombre de poles	/	03
L'inertie (J)	/	0,1
Résistance statorique (rs)	Ohm	0,95
Résistance rotorique (rr)	Ohm	1,8
Vitesse W_r	Rad/s	320
Mutuelle (M)	/	0,082
Inductance statorique (Ls)	/	0,094
Inductance rotorique (Lr)	/	0,088
Frottement (f)	/	$6,73 \cdot 10^{-3}$
Vitesse (Ws)	Rad/s	$2 \cdot \pi \cdot 50$
Tension alim rotor (Vr)	V	12
Fréquence du rotor (fr)	Hz	02
Résistance de charge (R)	Ohm	50

IV-6 Utilisation de convertisseur statique pour l'alimentation.

IL existe deux configurations pour l'utilisation des convertisseurs statiques concernant l'alimentation : une telque le stator et le rotor sont alimentés à travers deux convertisseurs et l'autre où la machine est alimentée par un convertisseur au rotor alors que le stator est lié au réseau (fonctionnement en générateur pour une application du type éolien) .Ce type de configuration que nous intéressons, d'une part parce que la machine fonctionne en régime génératrice pour la production de l'énergie éolienne, d'autre part pour minimiser le nombre des convertisseurs statiques utilisés par conséquence de minimiser le prix.

La majorité des applications industrielles faisant appel à ce type de configuration est liée à la production de l'électricité à partir de l'énergie éolienne où la machine fonctionne en tant que génératrice. La MADA est alors une solution attractive puisqu'elle présente un avantage majeur : le convertisseur alimentant le rotor est dimensionné.

IV-7 La chaîne de conversion

Le fonctionnement avec convertisseur statique est effectué en utilisant un seul convertisseur au rotor composé d'un redresseur à diodes, un filtre passe bas et d'un onduleur à IGBTs(Transistors bipolaires à gâchette isolée) alors que le stator est relié directement au source triphasé. La modulation par largeur d'impulsion (MLI) utilisée est régulière, triangulaire, symétrique.Les IGBTs sont choisis en raison de la simplicité de leur commande et de la rapidité de leur commutation, malgré un coût supérieur des thyristors.

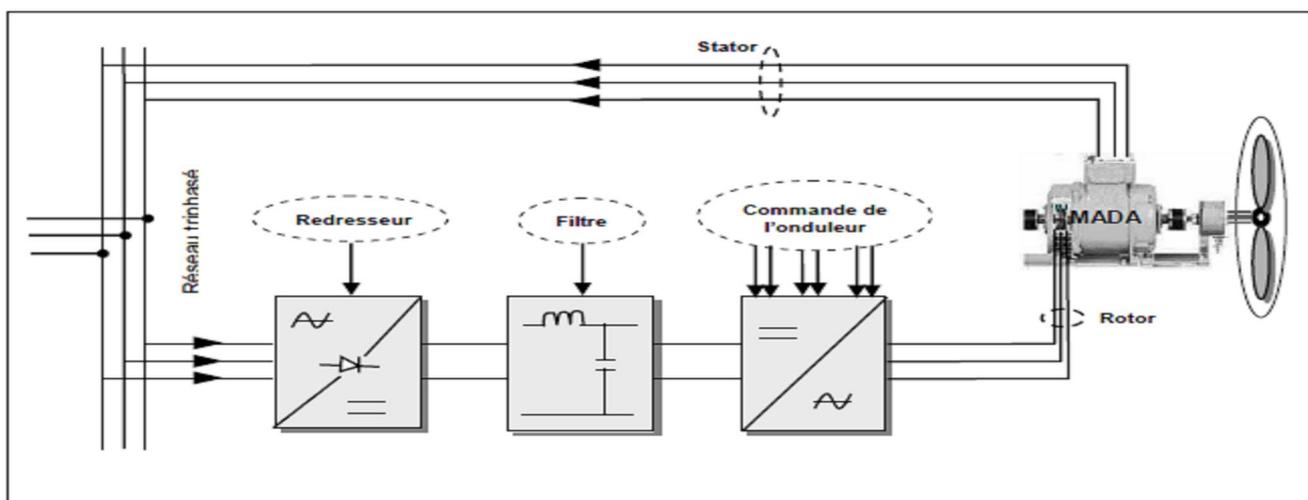


Figure IV-2 Schéma synoptique pour un fonctionnement en génératrice de la MADA

Le stator est lié au réseau, pour alimenter le rotor, on utilise un réseau de basse tension 380V, en alimentant le redresseur d'une tension alternative de 15V à partir d'un transformateur. Après redressement, la tension filtrée V_{dc} est appliquée à l'onduleur.

IV-8 Les différents paramètres visualisés pendant la simulation

Pendant la simulation, on a fixé la vitesse du vent à la valeur 7.73 m/s et les paramètres qu'on désire de visualiser sont comme suite :

1- Partie mécanique

- Le coefficient de puissance C_p
- Le couple de la turbine C_t
- Le couple électromécanique C_e
- La vitesse de la turbine Ω_t
- La vitesse mécanique Ω_m
- La vitesse rotor W_r

2- Partie électrique de la génératrice

- La tension stator V_{as}
- Le courant du stator I_{as}
- La tension rotor V_{ar}
- Le courant du rotor I_{ar}
- La puissance sortie stator P_s

3- Partie convertisseur

- Les tensions entrée redresseur V_{abc}
- La tension redressée V_{red}
- La tension filtrée V_{dc}
- La tension redressée V_{red} et la tension filtrée V_{dc}
- La tension sortie onduleur V_{ond}

IV-9 Résultats de la Simulation

A l'aide du logiciel MATLAB, la simulation de la MADA a été faite. le modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan (d, q)) liée au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance nominale 5W, alimentée directement par deux sources de tension triphasées parfaites, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220/380 V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12,2V et une fréquence égale à la fréquence rotorique. Les résultats obtenus sont comme suit :

IV-9-1 Résultats de la Simulation partie mecanique

IV-9-1-a Coefficient de puissance C_p

la figure IV-3 représente la variation du coefficient de puissance en fonction de lamda

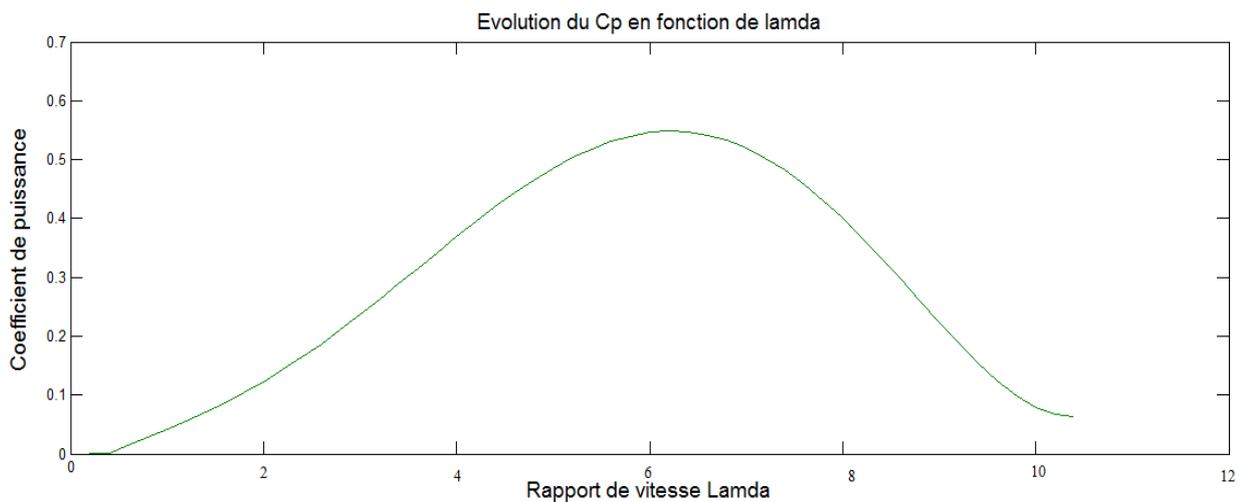


Figure IV-3 Coefficient de puissance

La figure ci-dessus montre : l'évolution du coefficient de puissance ou bien le rendement entre la puissance éolienne et la puissance du vent

IV-9-1-b Couple de la turbine C_t

la figure IV-4 représente la variation du couple de la turbine en fonction du temps

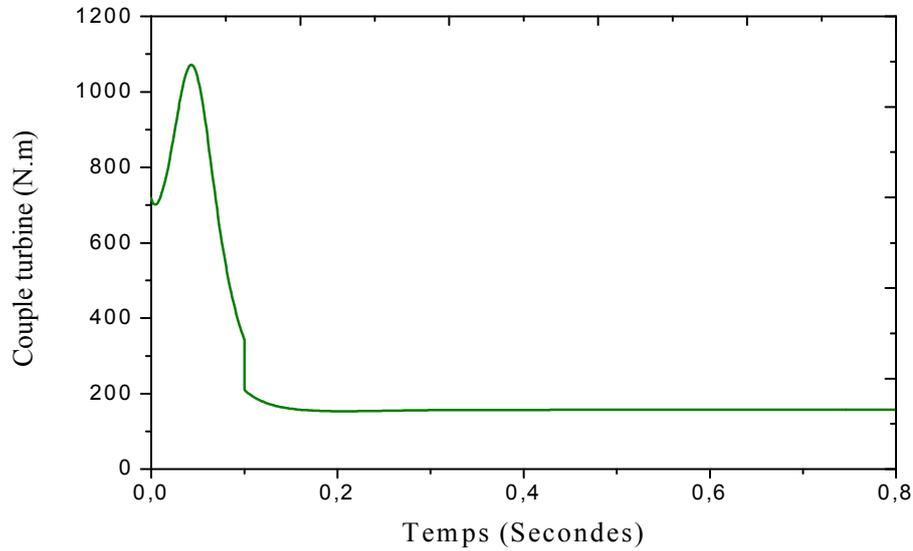


Figure IV-4 Couple de la turbine C_t

IV-9-1-c Couple électromécanique C_e

la figure IV-5 représente la variation du couple électromécanique en fonction du temps

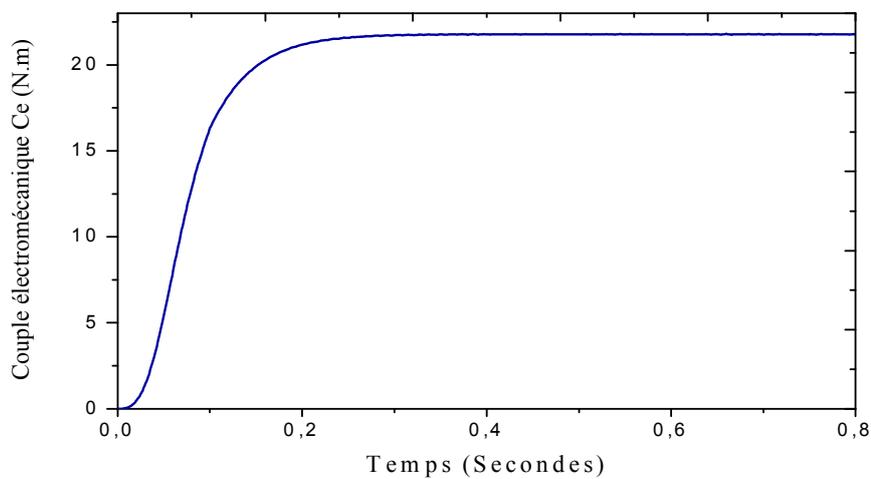


Figure IV-5 Couple électromécanique C_e

IV-9-1-d La vitesse de la turbine Ω_t

la figure IV-6 représente la variation de la vitesse de la turbine en fonction du temps

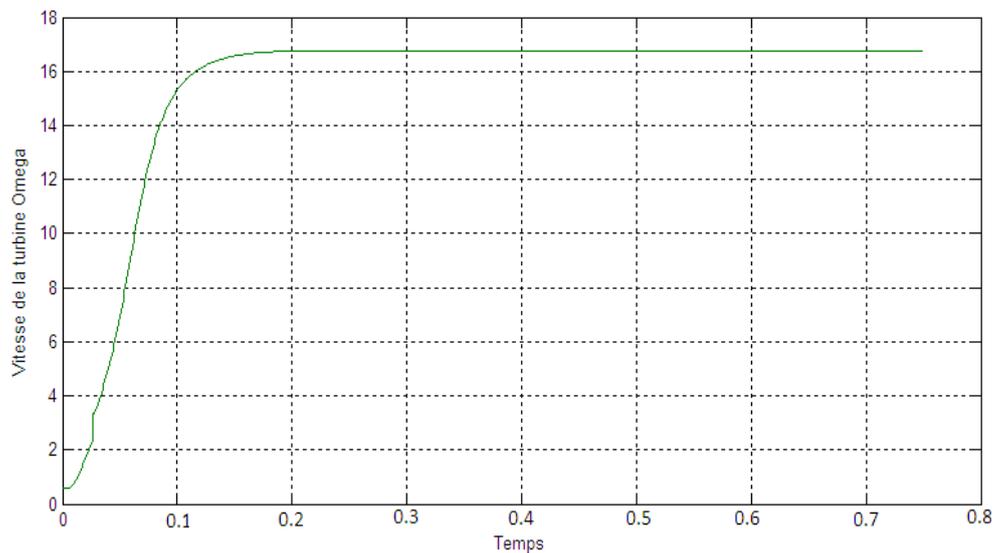


Figure IV-6 Vitesse de la turbine Ω_t

IV-9-1-e La vitesse mécanique Ω_m

la figure IV-7 représente la variation de la vitesse mécanique en fonction du temps

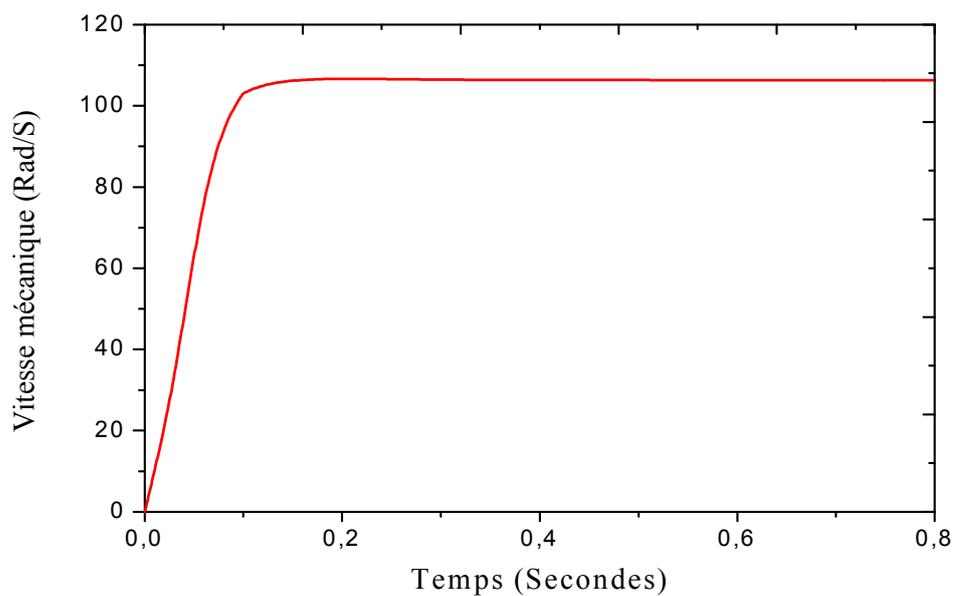


Figure IV-7 Vitesse mécanique Ω_m

IV-9-1-f La vitesse rotor W_r

la figure IV-8 représente la variation de la vitesse du rotor en fonction du temps

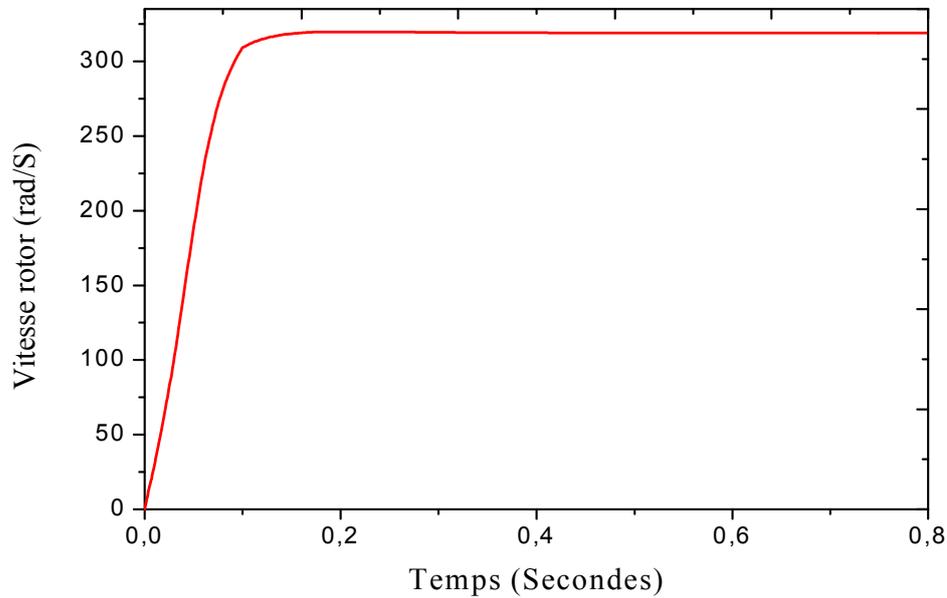


Figure IV-8 Vitesse du Rotor W_r

Interprétations des résultats

- d'après les figures ci-dessus, On constate qu'au démarrage tous les paramètres passent par une phase transitoire et à partir d'un temps $t = 0,17$ secondes, ils se stabilisent à des valeurs presque constantes et ça du qu'au moment de la simulation, on a fixé la valeur de la vitesse du vent

IV-9-2 Résultats de la Simulation partie électrique

IV-9-2-a La tension stator V_{sa}

la figure IV-9 représente la variation de la tension sortie stator en fonction du temps

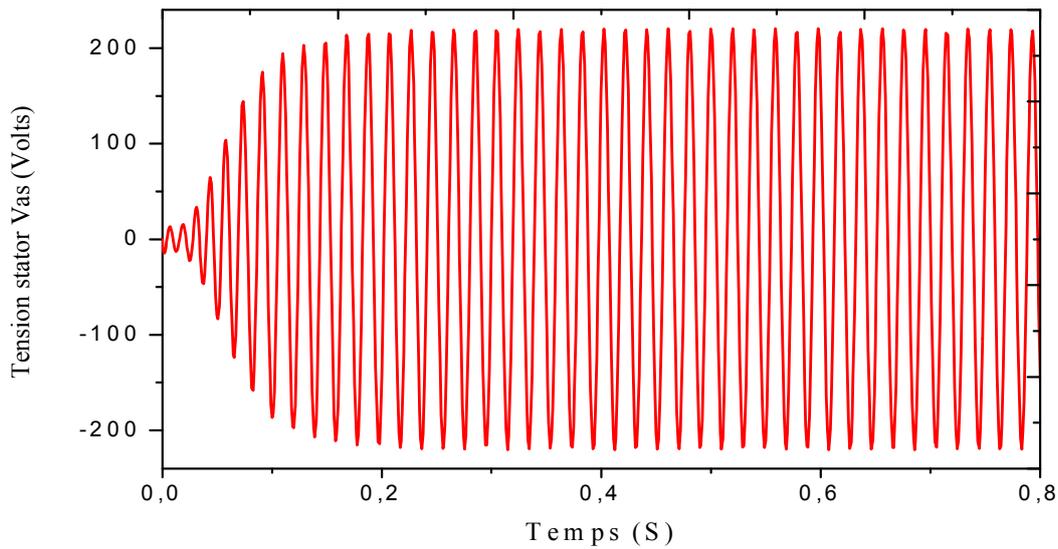


Figure IV-9 Tension stator V_{sa}

IV-9-2-b Le courant du stator I_{sa}

la figure IV-10 représente la variation du courant sortie stator en fonction du temps

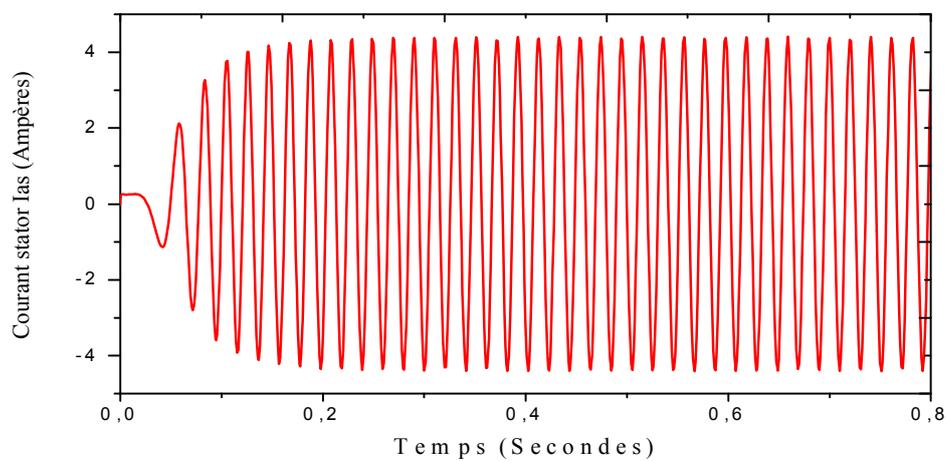


Figure IV-10 Courant stator I_{sa}

Interprétations des résultats :

- Les résultats de simulation des différentes grandeurs (tension et courant stator), ont été obtenues avec une vitesse de rotation fixe et charge purement résistive de 50Ω .

Les figures (IV-9 et IV-10) montrent respectivement l'évolution de la tension et du courant statorique de la GADA.

Au démarrage, la tension et le courant générés croissent de façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 220V et à 4,4 A à temps précis.

IV-9-2-c La tension du rotor Var

la figure IV-11 représente la variation de la tension rotorique en fonction du temps

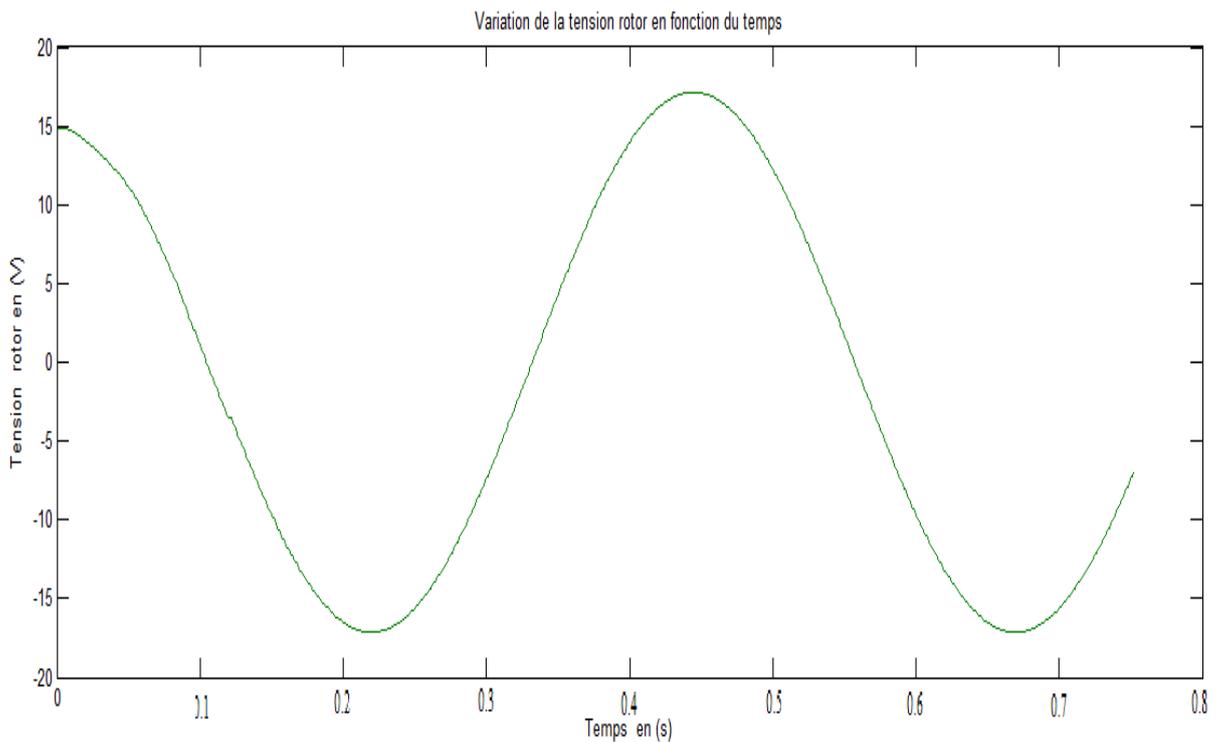


Figure IV-11 Tension du rotor Var

IV-9-2-d Le courant du rotor Iar

la figure IV-12 représente la variation du courant du rotor en fonction du temps

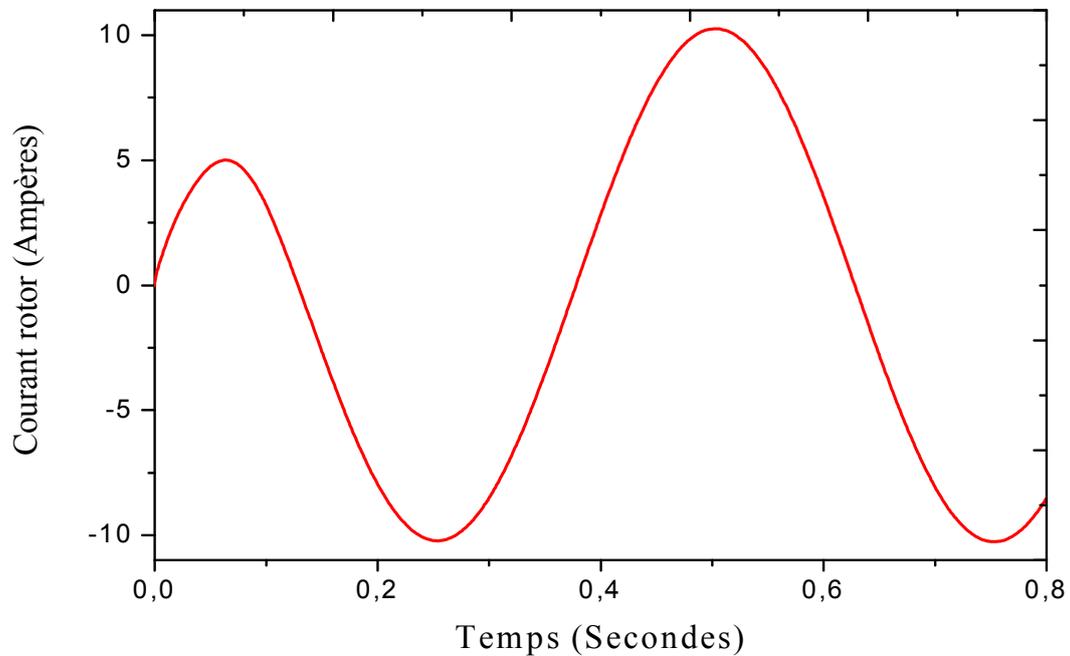


Figure IV-12 Courant rotor Iar

- Les figures (IV-11 et IV-12) représentent respectivement l'évolution de la tension et du courant rotorique de la génératrice à double alimentation.
- L'allure de la tension rotorique montre que celle-ci évolue de façon sinusoidale 12,2 V et périodique de fréquence 2 Hz.
- L'allure du courant rotorique évolue de manière sinusoidale, d'amplitude constante égale à 10,4 A et de fréquence identique à celle de la tension rotorique.

IV-9-2-e La puissance P_s

la figure IV-13 représente la variation de la puissance en fonction du temps

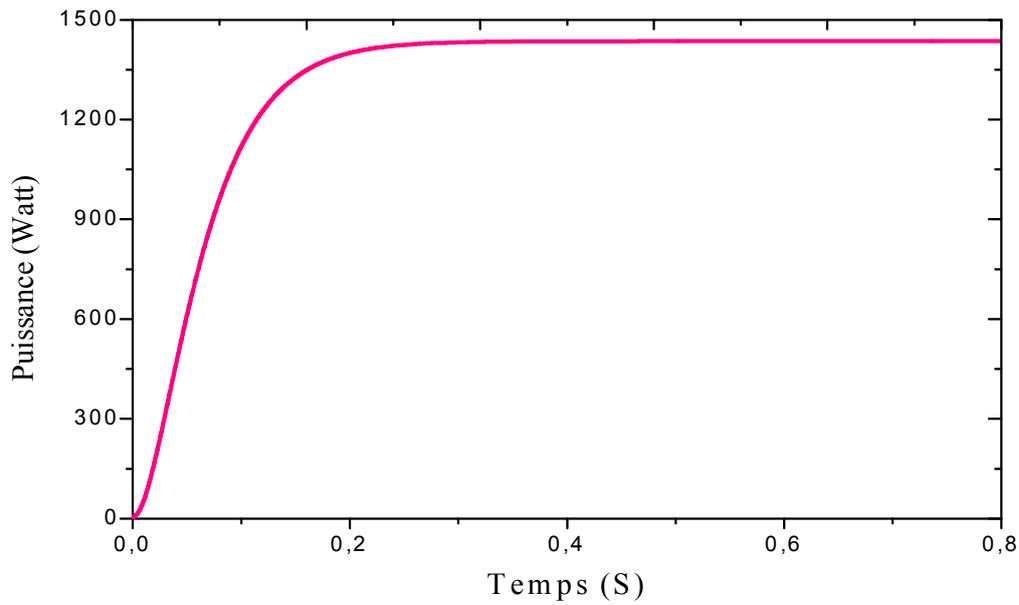


Figure IV-13 Puissance de la charge P_s

- d'après la figure, on remarque que : la puissance au niveau stator passe par la période transitoire et à partir de $t=0,17$ secondes, elle se stabilise et elle suit l'évolution de la tension et le courant.

IV-9-3 Résultats de la Simulation partie convertisseur

IV-9-3-a Les tensions entrée redresseur V_{abc}

la figure IV-14 représente la variation des trois tensions entrée redresseur en fonction du temps

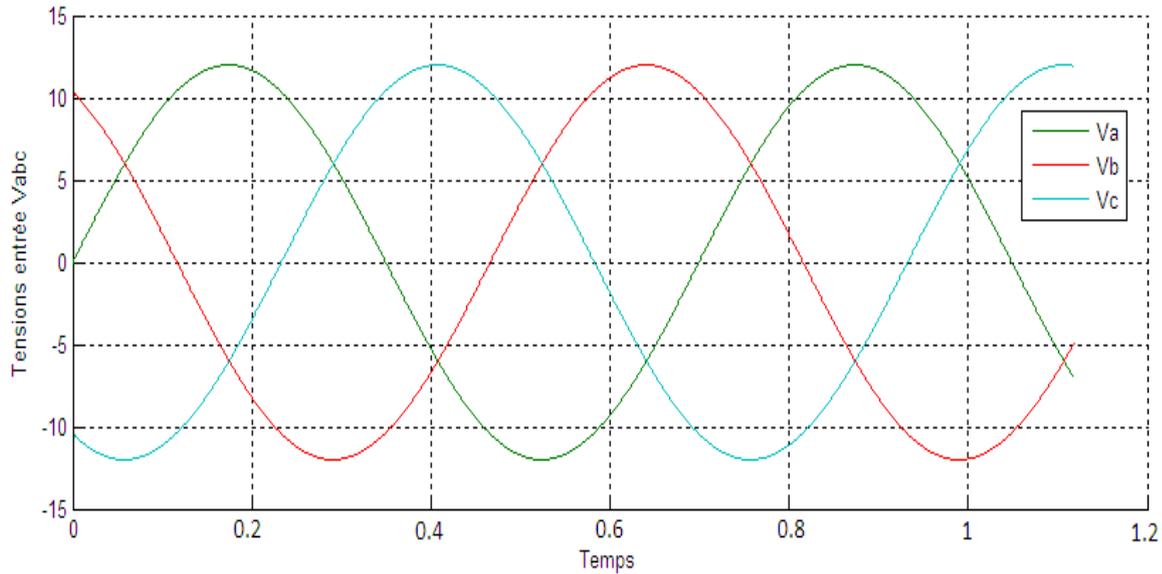


Figure IV-14 Tensions entrée redresseur V_{abc}

- Sur la figure, on constate que les trois tensions du réseau sont équilibrées

IV-9-3-b La tension redressée V_{red}

la figure IV-15 représente la variation des trois tensions entrée redresseur en fonction du temps

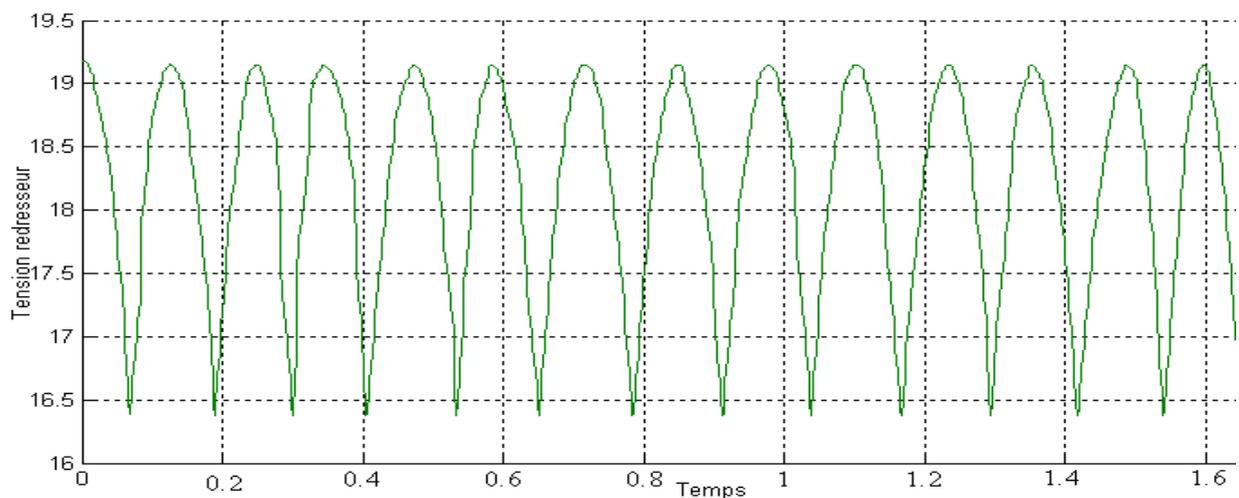


Figure IV-15 Tension redressée V_{red}

- Sur la figure ci-dessus, on peut dire que le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif.

IV-9-3-c La tension filtrée V_{dc}

la figure IV-16 représente la variation de la tensions filtrée en fonction du temps

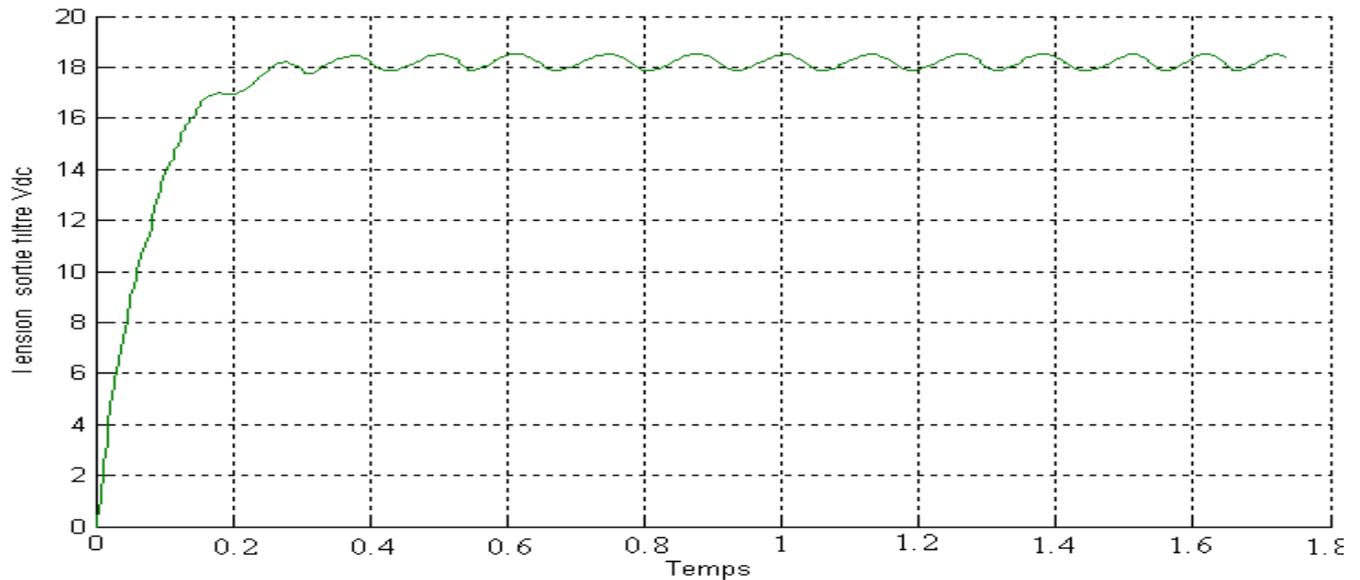


Figure IV-16 Tension filtrée V_{dc}

- Sur la figure, On utilise un filtre passe bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences et la tension filtrée V_{dc} est appliquée à l'onduleur.

IV-9-3-d Les tensions redressée V_{red} et filtrée V_{dc}

la figure IV-17 représente la variation des tensions (entrée redresseur et filtrée) en fonction du temps

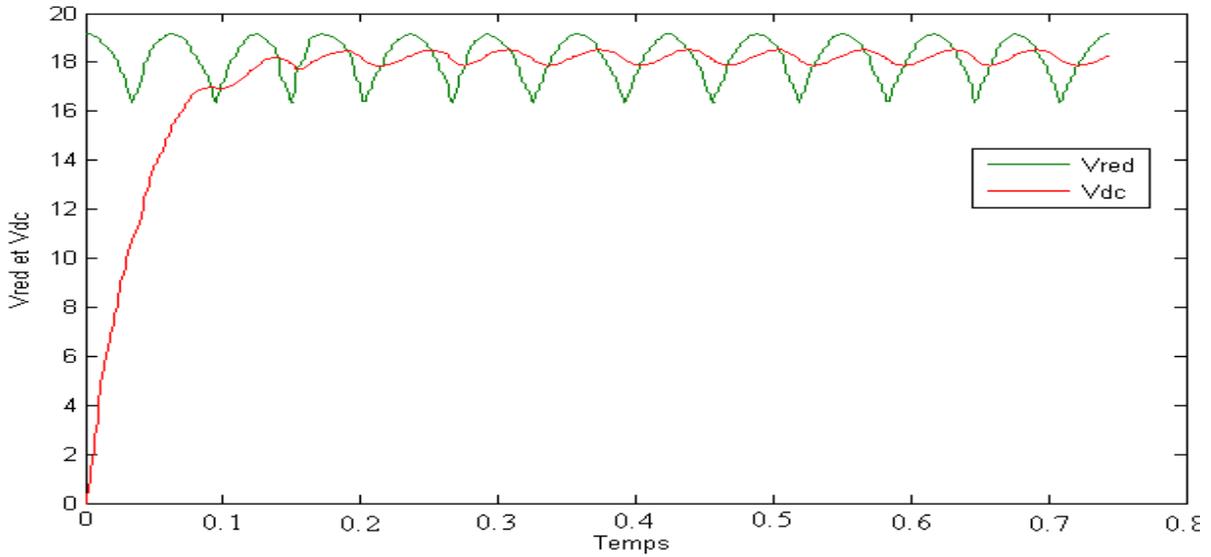


Figure IV-17 Tension redressée V_{red} et tension filtrée V_{dc}

➤ Sur la figure, on voit les deux allures des courbes de tensions (redressée et filtrée).

IV-9-3-e La tension sortie onduleur V_{ond}

figure IV-18 représente la variation de la tension ondulée en fonction du temps

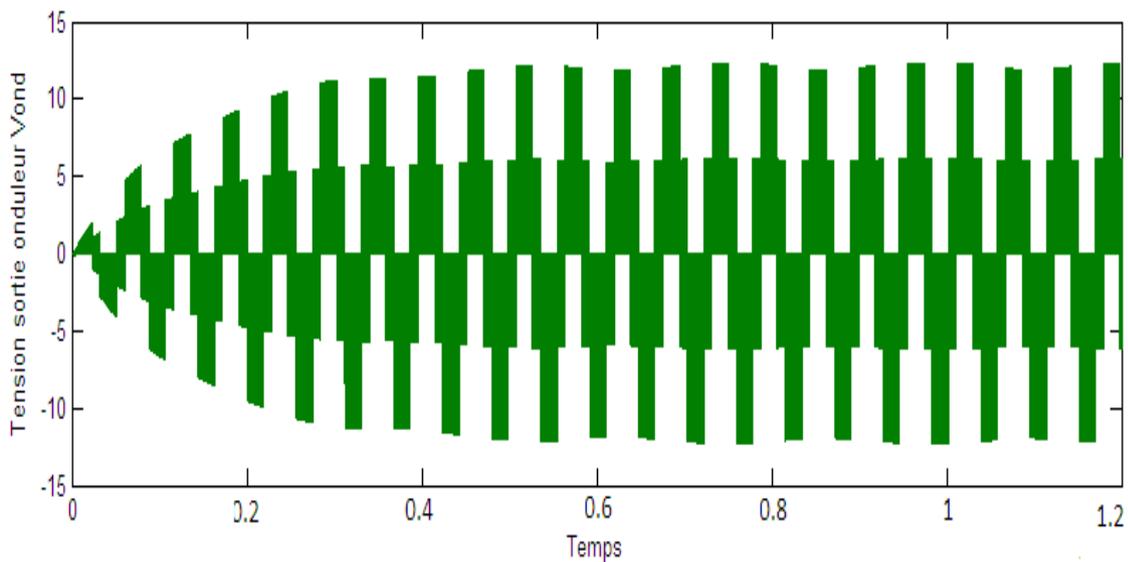


Figure IV-18 Tension sortie onduleur V_{ond}

- Sur la figure, on voit le résultat de la simulation numérique de la tension ondulée commandé par la technique MLI triangulo-sinusoïdale en comparant les signaux entre la porteuse et la modulante.

IV-10 Conclusion

Parmi les sources d'énergies renouvelable, l'éolienne apparaît actuellement en bonne position comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile parceque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considerable.

Une éolienne à pour rôle d'une conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, plusieurs efforts théoriques et expérimentales ont été effectués dans ces dernières années afin de mieux comprendre cette technologie (éolienne) d'une part et d'augmenter la puissance et le rendement de conversion d'autre part.

L'objectif du travail dans ce chapitre est consacré à la simulation des parties du système éolien à base d' une génératrice à double alimentation GADA au site d'ADRAR.

L'analyse des résultats obtenus à partir de simulation montre que ;

- Afin de bien comprendre le bon fonctionnement du système éolien, la simulation nécessite l'étude des trois parties du système (cinétique, mécanique et électrique).
- Tout système mecanique soumis à un mouvement quelconque, présente au début de ce mouvement un couple résistant du à son inertie,ce couple engendre un fort appel de courant afin d'atteindre son régime de fonctionnement normal.
- Tous les paramètres du système éolien (couple de turbine, couple électromagnétique, vitesses de la turbine et mécanique, vitesse du rotor, puissance électrique,.....) passent par une phase transitoire d'une valeur maximale puis se stabilisent suite à la valeur fixe de la vitesse du vent.
- La tension et le courant générés du stator croient d'une façon exponentielle, puis se stabilisent.

Ces résultats ont un intérêt important pour concevoir le comportement énergétique des systèmes éoliens complet à différentes puissances.

Conclusion générale

Parmi les sources d'énergie renouvelables comme le solaire, la biomasse, la géothermie, la marémotrice, l'hydraulique,....., l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

L'énergie éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique ; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

L'objet de notre travail était la simulation d'un système éolien basé une génératrice à double alimentation.

Dans ce travail, et après un bref historique sur l'utilisation des systèmes éoliens (gisement, types, paramètres, applications, caractéristiques,.....), nous avons étudié d'une façon explicite les trois différents parties constitutifs le système éolien (cinétique, mécanique et électrique) et enfin, nous avons établir les différents modèles mathématiques de toute la chaine de conversion éolienne tel que: La puissance produite de l'aérogénérateur, la partie mécanique et la machine asynchrone électrique à travers des équations simples à l'aide de la transformation de Park ensuite la partie convertisseur.

Les premiers résultats montrent que parmi les sources d'énergie renouvelables, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante.

Les données météorologiques montrent que le site d'Adrar bénéficie d'un gisement éolien considérable et que ce site est venté durant toute l'année, avec une vitesse moyenne annuelle autour de 6 m/s.

Les résultats présentés dans la dernière partie du mémoire ont été faites afin d'étudier la possibilité de réaliser et installer un système éolien au site d'ADRAR.

L'analyse des résultats obtenus à partir de simulation montre que ;

- Pour mieux comprendre le fonctionnement du système éolien, la simulation nécessite l'étude des trois parties du système (cinétique, mécanique et électrique).
- Tous les paramètres du système éolien (couple de turbine, couple électromagnétique, vitesses de la turbine et mécanique, vitesse du rotor, puissance électrique,...) passent par une valeur maximale puis se stabilisent suite à la valeur fixe de la vitesse du vent.
- La tension et le courant générés du stator croient d'une façon exponentielle , puis se stabilisent.

Ces résultats ont un intérêt important pour concevoir le comportement énergétique des systèmes éoliens complet à différentes puissances.

Perspectives

Espérons que cette étude peut fournir une base théorique pour d'autres travaux qui se penchent sur :

- L'étude des systèmes éoliens de moyenne et de grande puissance.
- Possibilité de réaliser un système éolien expérimentalement.
- Possibilité de traiter les systèmes hybrides (éolien – solaire).

ANNEXES

1^{er} parc éolien à Adrar (moyenne puissance) [76]

1- Situation du site

Le site de Kaberten se situe à environ 72 km au Nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar à proximité d'un poste électrique de la filiale GRTE de Sonelgaz. il se trouve à une altitude d'environ 260 m et ses coordonnées géographiques sont 28°27' 7.44 N 0°02' 59.08 W.

Cette nouvelle centrale de production d'électricité est implantée sur une superficie de 30 hectares. Elle a été réalisée par le consortium algéro-français CEGELEC en partenariat avec un groupement composé de sociétés filiales de Sonelgaz.

2- Photo satellite pour l'emplacement de la ferme éolienne

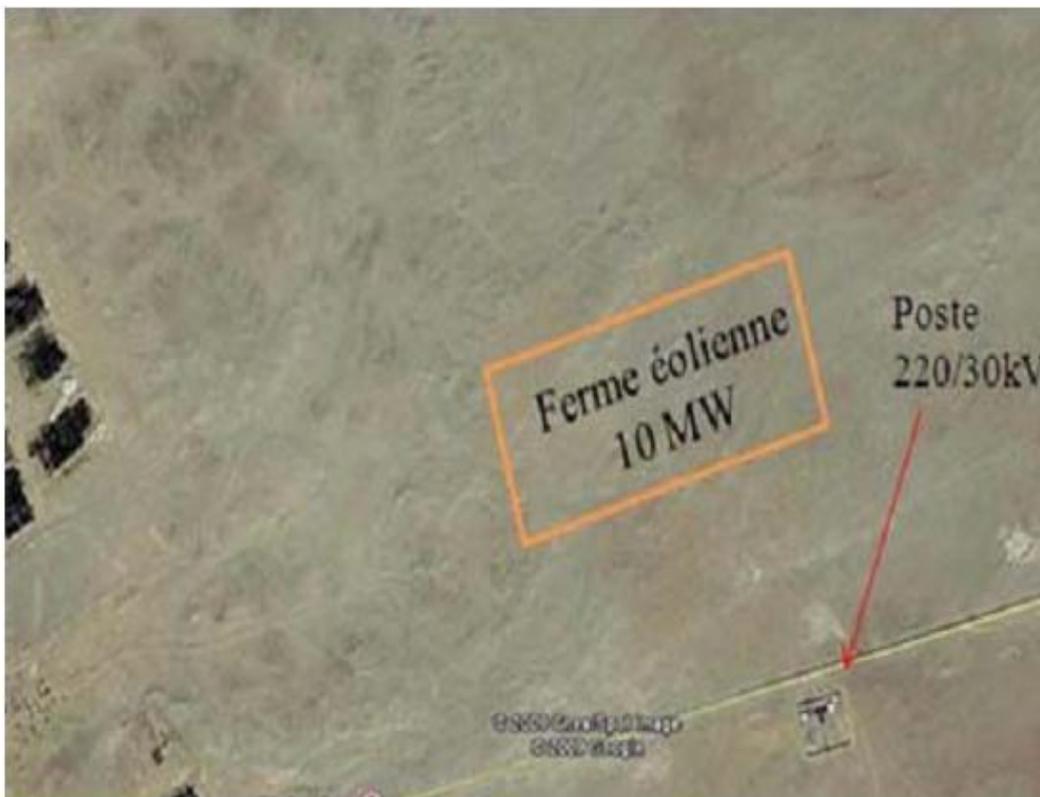


Photo satellite de l'emplacement du futur parc

3- Choix du site de Kaberten

Les éléments décisifs ayant conduit au choix du site pouvant contenir la ferme éolienne sont:

- Altitude ;
- Obstacles ;
- Situation par rapport à la direction des vents ;
- Situation par rapport au réseau électrique de distribution;
- Superficie disponible;
- Géographie et géomorphologie (qualité des sols, topographie);
- Possibilités d'accès;
- Axe routier jusqu'à la prochaine ville portuaire;
- Éléments réglementaires (éloignement suffisant par rapport au plan d'extension de la ville, éloignement suffisant aux radars, aéroport...). Ces différents points ont été analysés dans le choix du site. L'optimisation se fait en comparant à la fois le potentiel éolien du site choisi avec les coûts impliqués dans la construction du parc sur ce même endroit.

4- Photo des éoliennes de Kaberten



Photo des éoliennes

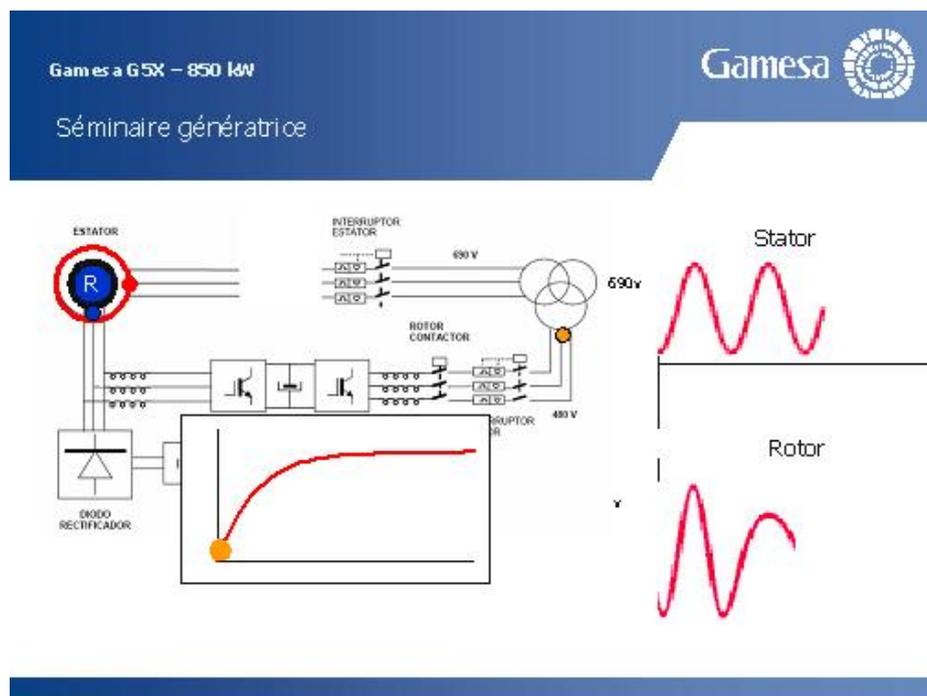
5- Mise en service

La mise en service de cette ferme éolienne a été effectuée en mois de juin 2014 . Elle est constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune et dont l'énergie produite sera évacuée vers le poste 30KV de la distribution d'électricité. .

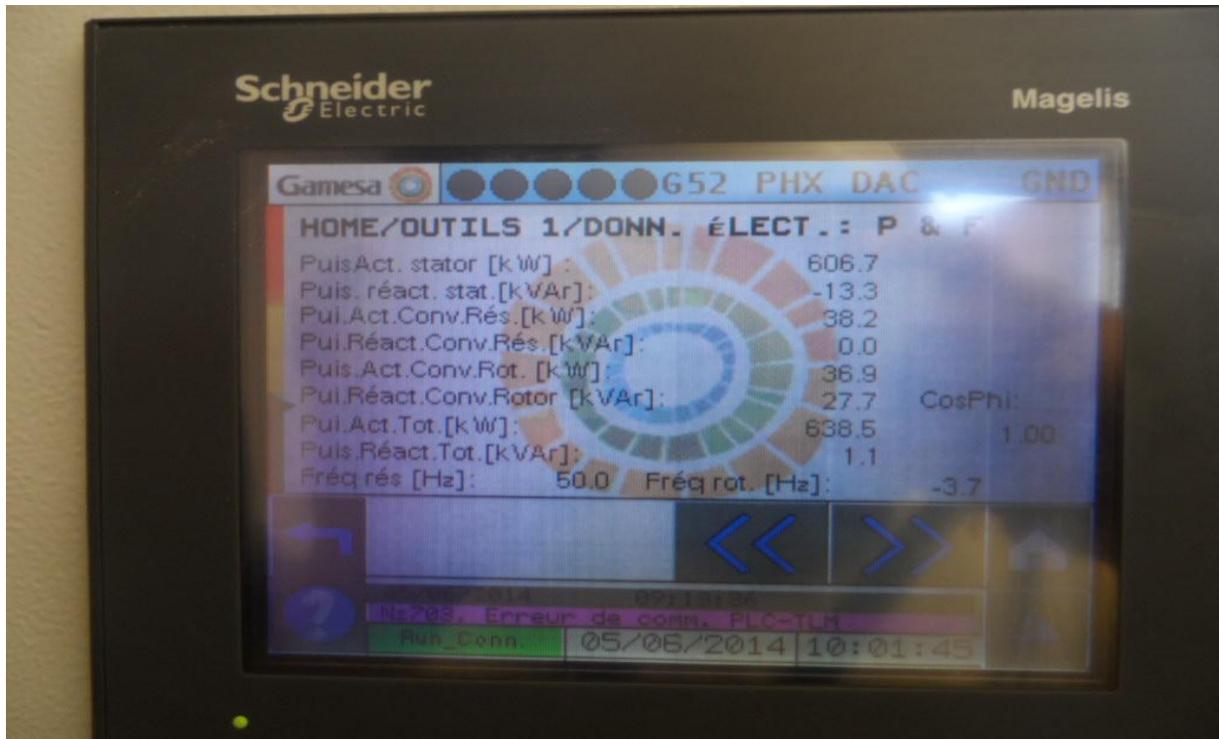
6- Les caractéristiques de l'éolienne

Désignation	Paramètres
Constructeur	GAMESA
Type éolienne	axe horizontale
Puissance nominale	850 kw
Nbre de pales	03
Hauteur du mat en m	55 m
Longueur des pales en m	26 m
Distance entre 02 éoliennes	208 m

7- Schémas de principe de fonctionnement

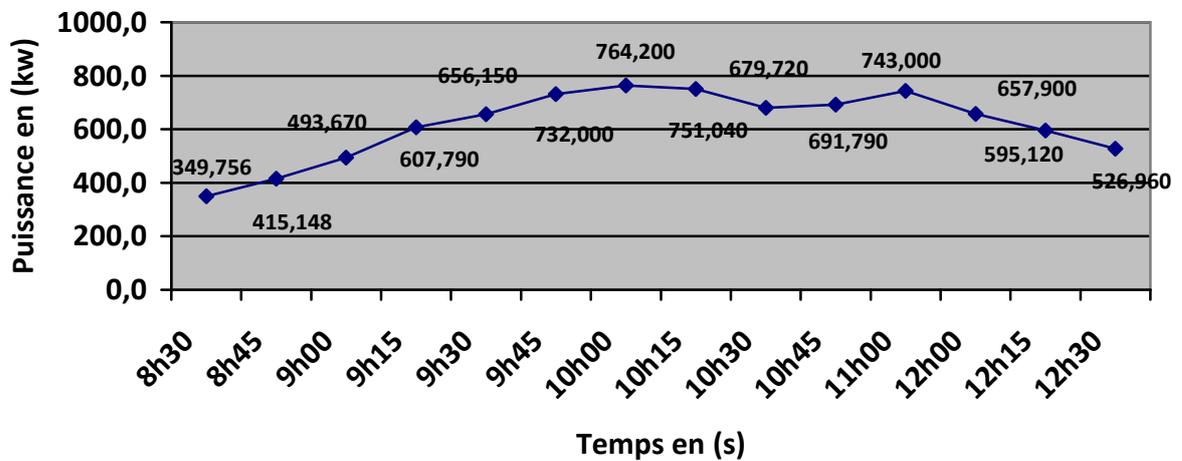


8- Données électriques au moment de l'essai

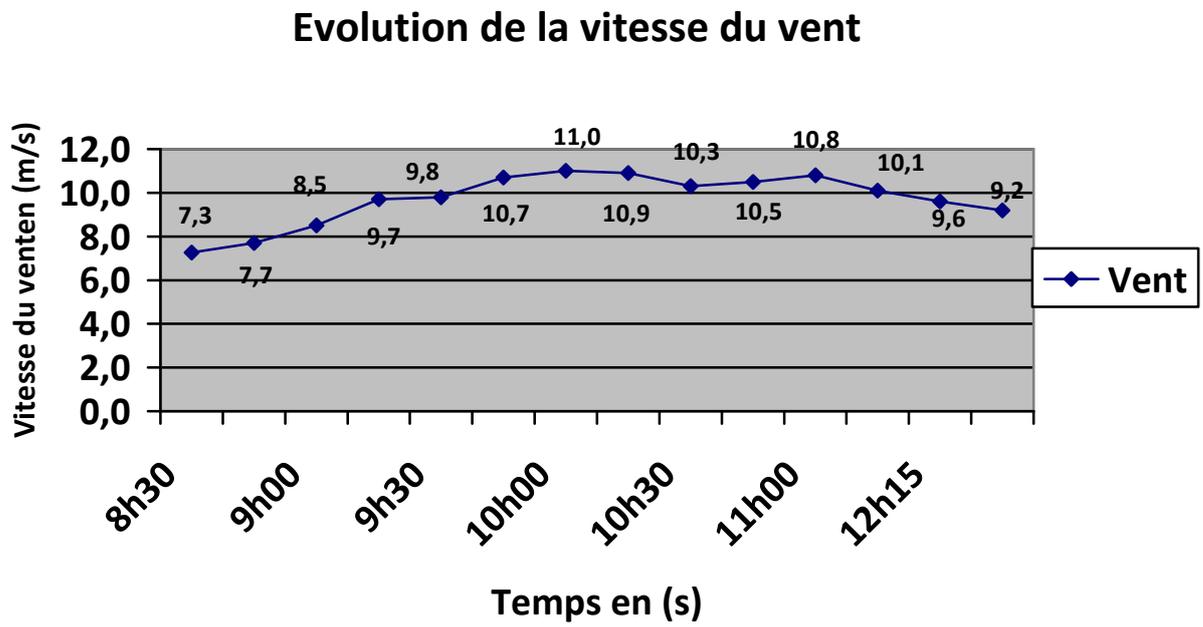


9- Evolution de la puissance en kw d'une éolienne en mois d'aout 2014

Evolution de la puissance



10- Evolution de la vitesse du vent en m/s d'une éolienne en mois d'aout 2014



BIBLIOGRAPHIE

[01] RIHANI LAZHAR

« Modélisation et Commande de la Génératrice à Induction Double Alimentée Couplée sur un Réseau Electrique »; Mémoire de Magister, en réseaux électriques Université de Batna, 19 Janvier 2012.

[02] DOUADI TAREK

« Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone »; Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option : Maîtrise d'énergie, Université de Batna, Faculté des Sciences de L'Ingénieur, Département d'Électrotechnique, Décembre 2006.

[03] Observer et la Fondation d'énergies pour le Monde

« La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde » ; Quinzième inventaire ; Collection chiffres et statistiques, le soutien financier d'EDF, Edition 2013.

[04] Ministère de l'énergie et des mines

« Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique » Conception et réalisation SATINFO ; Société du Groupe Sonelgaz ,Mars 2011.

[05] José Miguel Navarro

« Cellules Photovoltaïques Organiques Transparentes Dans Le Visible » ; Thèse de doctorat en Génie électrique, électronique, télécommunications, option : Matériaux, Technologies et Composants de l'Electronique, Université de Toulouse, 23 Octobre 2008.

[06] www.ren21.net/gsr

« Rapport Mondial 2012 Sur les énergies Renouvelables » ; Renewable Energy Policy Network for the 21st Century ; Paris CEDEX 09 France , année 2012.

[07] <http://unblogsurlaterre.com/actualites-environnement-sur-la-terre/avantages-et-inconvenient>.

[08] REDJEM RADIA

« Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » ; Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option : Modélisation et Commande Des Machines Electriques, Université de Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département d'Électrotechnique, 04 Juillet 2009.

[09] A.Mirecki

« Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.

[10] fr.wikipedia.org/wiki/Géothermie

[11] www.energienouvelable.fr/geothermie.ph

[12] www.futura-sciences.com/.../énergie-renouvelable

[13] fr.wikipedia.org/wiki/Énergie_renouvelable

[14] jeunes.edf.com/.../comment-fonctionne-une-centrale-bi

[15] web.univ-pau.fr/~omari/TPeol.

[16] SOLTANE BELAKEHAL

« Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées Aux Energies Renouvelables »; Thèse de doctorat en sciences, Spécialité Electrotechnique Option : Commande, Université de Constantine, Faculté des Sciences de L'Ingénieur Département d'Électrotechnique, 10 Juin 2010.

[17] Yacine Abderrahmane BENCHERIF

« Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne »; Projet de Fin d'Etudes ; Diplôme ingénieur en Electrotechnique ; Ecole Nationale Polytechnique ; Département de génie électrique , Juin 2008.

[18] Tarak GHENNAM

« Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Ecole Militaire Polytechnique d'Alger ,Ecole Centrale de Lille, 29 septembre 2011 .

[19] [http ://www.ewea.org](http://www.ewea.org). Wind Energy. European Wind Energy Association.

[20] Hamane Bekheda

«Contrôle Robuste d'AEROGENERATEUR »;Mémoire de Magister en genie électrique, Option : Analyse et commande des machines électriques , ENSET d'Oran, Département de génie électrique, année universitaire 2011/2012.

[21] JEAN CHATELAIN

« Machines électriques, Traité d'électricité »,Vol X,Presse Polytechnique romandes, edition Georgi,1983.

[22] THOMAS ACKERMANN

« Wind Power in Power systems »,Royal Institute of Stockholm,Sweden ,2005 .

[23] http://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_021_10.pdf

[24] DJERIRI YUCEF

« Commande par réseaux de neurones d'une MADA intégrée à un système éolien » ;
memoire de magister en Electrotechnique, Option: Conversion d'énergie et
Commande, Université DJILLALI LIABES de Sidi bel abbes, Faculté des Sciences
de L'Ingénieur Département d'Électrotechnique, 13 Décembre 2009.

[25] Pr Chems Eddine Chitour

« Les énergies renouvelables et la maitrise de l'énergie en Algérie », Actes du
Séminaire, Ecole Nationale Polytechnique, 25 Juin 2008.

[26] HASSINI née BELGHITRI HOUDA

«Modelisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Hybride Eolien-
Photovoltaïque »Mémoire de Magister en Physique Energétique et Matériaux,
Université de Abou-Bakr Belkaid De Tlemcen, Faculté des Sciences , Département de
Physique, 2010.

[27] SAID DIAF

« Evaluation du potentiel éolien et estimation de la production d'une ferme éolienne
dans la région d'Adrar » Séminaire International sur le Génie Climatique et
l'Energétique, SIGCLE'2010 Centre de Développement des Energies Renouvelables
BP 62, Route de l'Observatoire, 16340 Bouzaréah, Alger, 6 et 7décembre 2010
Constantine, Algérie .

[28] M. DAHBI *; A. BENATIALLAH **; M.SELLAM ***

« Evaluation du potentiel éolien dans le site d'adrar (Algerie)
: caracteristiques des paramètres de Weibull » VIème Congrès International sur les
Energies Renouvelables Et l'Environnement, Université de Bechar, Algérie,
Laboratoire des Energies Environnement et Système d'Information, Université
Africain, Adrar, Algérie. 19-21 Mars, 2012, Hammamet, Tunisie.

[29] R. Hammouche.

«Atlas vent de l'Algérie », Office National de la Météorologie, Alger,1991

[30] Y .F. Isaac Lun, C. Joseph Lam.

« A Study of Weibull Parameters Using Long-term Wind Observation » Renewable Energy, Vol. 20, No 2, pp. 145-153, 2000

[31] http://eolienne.f4jr.org/parc_eolien

[32] texsud.e-monsite.com/..eolienne.../3-criteres-de-choix.

[33] FREDERIC POITIERS

« Etude Et Commande de Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'Energie Eolienne - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau » Thèse de Doctorat en Electronique et Génie Electrique, Université De Nantes, Ecole Doctorale, Sciences Et Technologies de l'information et des Matériaux, 19 Décembre 2003.

[34] FARID MERRAHI

«Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne)» Mémoire de Magister en Automatique option : Commande et Conduite des Systèmes d'Energie Electrique, Département du Génie Electrique Laboratoire de commande des processus, 30 Juin 2007.

[35] TOUAL BELKACEM

« Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable » Mémoire de Magister en Electrotechnique, option Machines Electriques, Université De Batna, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département d'Electrotechnique, 17 octobre 2010.

[36] KENDOULI FAIROUZ

«Centrale Eolienne Et Qualité De L'Energie Electrique» Thèse de Doctorat en Sciences en Electrotechnique Option: Modélisation et Commande des Machines Electriques, Université Mentouri de Constantine Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 2012.

[37] ARNAUD DAVIGNY

« Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie » Thèse de Doctorat en Sciences et technologies, spécialité génie électrique, université des sciences et technologies de LILLE, Département de formation doctorale en génie électrique, 11 décembre 2007.

[38] KHALED FERKOUS

« Etude d'une chaîne de conversion d'énergie », Mémoire de Magistère en Physique, Ecole doctorale (énergie renouvelable), Université Mentouri Constantine, Faculté des sciences exactes Département de physique, 27 /05 / 2009.

[39] Colas CELLIER

« Étude et Simulation d'un système éolien connecté au réseau monophasé », Mémoire en Maîtrise en génie électrique, École de technologie supérieure Université du Québec, Montréal, LE 28 JUILLET 2012.

[40] ADAM MIRECKI

« 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, 5 avril 2005

[41] MEKKAOUI NAIMA

« Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », Mémoire de Magister, Spécialité : Maîtrise d'Énergie et Énergies Renouvelables, Université de Batna, Faculté des sciences de l'ingénieur, Département d'électrotechnique, 2004.

[42] F. Kendouli*, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla

« Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation » Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 , Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, 'LEC' Département d'électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie, 25 Mars 2011.

[43] B.BELTRAN

« Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de Doctorat de l'université de Bretagne occidentale le 6 juillet 2010.

[44] B.MULTON

« Les Aérogénérateurs Electrique » , Lésir Antenne de Bretagne de l'École Normale Supérieure de Cachan 2004.

[45] ABDENOUR ABDELLI

« Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » , Thèse de Doctorat en genie electrique, L'institut national polytechnique de toulouse, 15 octobre 2007.

[46] MOUSSA SIDDO ABDOULAZIZ

« Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » ,Projet de fin d'études ingénieur d'état en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique Département de Génie Electrique Spécialité Electrotechnique, Année 2007.

[47] DENDOUGA ABDELHAKIM

« Contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) » ,Thèse doctorat en sciences en électrotechnique, option :électrotechnique ,Université de Batna, 10 fevrier 2010.

[48] DENDOUGA ABDELHAKIM

« Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation », Thèse de Doctorat en genie électrique, L'institut national polytechnique de toulouse, 13 mars 2007.

[49] AZEDDINE CHAIBA

« Commande De la Machine Asynchrone A Double Alimentation Par Des Techniques de l'intelligence Artificielle » Thèse de Doctorat en sciences en Electrotechnique, Université de Batna, 11 Juillet 2010.

[50] NAOUEL HAMDI

« Modélisation et commande des génératrices éoliennes » Mémoire de Magister en Electrotechnique Option: Machines électriques dans leurs environnements, Université Mentouri de Constantine Faculté des Sciences de l'Ingénieur Département d'Electrotechnique, 24 Janvier 2008.

[51] NESMAT ABU-TABAK

« Stabilité dynamique des systèmes électriques multi-machines :modélisation, commande, observation et simulation », Thèse de Doctorat à L'école doctorale électronique , électrotechnique ,automatique de Lyon, 19 Novembre 2008.

[52] D. Saheb Koussa, M. Belhamel et B. Kazed

« Système éolien pour l'alimentation d'une charge à usage domestique », Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°1 (2006) 127 – 138 , Centre de Développement des Energies Renouvelables B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger , 25 Mars 2007.

[53] SAKI ALI ET BELAIDI MOURAD

«Etude d'un Générateur Asynchrone dans la Production d'Energie Electrique par Eolienne »,Memoire de fin d'étude, d'Ingénieur d'Etat en Eléctrotechnique , Ecole Nationale Polytechnique, E.N.P.10, Avenue Hassen-Badi, EL-HARRACH, ALGER, juin 2006.

[54] S. El Aimani

« Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, ENSAM Lille, 2004.

[55] ABDESSAMED RACHID

«Modélisation et simulation des machines électriques», Ellipses Édition Marketing, ISBN 978-2-7298-6495-8, S.A., 2011.

[56] S.KHOJET EL KHIL

«Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA) »;Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse & école Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 04 Décembre 2006.

[57] L. KHETTACHE

« Étude et Commande d'un Système Éolien à Base d'une Machine Électrique Double Alimentée »; Mémoire de magistère en électrotechnique, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université de Batna, 2007..

[58] http://www.lesechos.fr/25/10/2006/LesEchos/19780-168-ECH_des-tours-solaires-en-espagne.htm

[59] <http://2e-so.fr/pages/produits/photovoltaique.php>

[60] Kaqeyoshi77.free.fr

[61] <http://www.intellego.fr/soutien-scolaire--/aide-scolaire-svt/4-schemas-sur-les-barrages-et-les-centrales-hydrauliques/54183>

[62] <http://energiespropres.e-monsite.com/pages/partie-b-1/d-les-autres-energies-propres.html>

[63] http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schema_eolienne.svg

[64] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne

[65] http://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne#mediaviewer/File:Puiss_install%C3%A9e_%C3%A9olienne_15pays.jpg

[66] <http://www.geni.org/globalenergy/library/renewable-energy-resources/world/africa/wind-africa/wind-algeria.shtml>

[67] http://www.memoireonline.com/08/13/7277/m_Dimensionnement-d-un-systeme-de-pompage-d-eau-potable-pour-les-sites-de-Tlemcen-et-Adrar11.html

[68] <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/introduction-systemes-eoliens.html>

[69] <http://la-tour-solaire.e-monsite.com/pages/les-energies-renouvelables-1.html>

[70] <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/eoliennes-axe-horizontal.html>

[71] <http://kageyoshi77.free.fr/III%291%29.htm>

[72] <http://www.intertas.fr/Informations/actualiteschantiers4.htm>

[73] <http://energie.eelv.fr/la-transition-energetique/comment/leolien/>

[74] <http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=1665>

[75] <http://electronique1.blogspot.com/2011/02/systemes-de-regulation-de-la-vitesse-de.html>

[76] Unité de production d'électricité SONELGAZ d'Adrar.

ملخص

ان إنتاج الكهرباء من الوقود الأحفوري (الفحم والنفط أو الغاز) أو الانشطاري (اليورانيوم ...) تساهم إلى حد كبير في تدهور البيئة واستنزاف الموارد غير المتجددة. وبالتالي، واحدة من التدابير التي أعدت لتحقيق تطور أو تنمية مستدامة حقيقية هو زيادة حصة الموارد البديلة. فالبحث مستمر في مجال ما يسمى الطاقات المتجددة (الريحية ، الشمسية والحيوية)، التي لا تتضب وغير ملوثة، حيث أن هذه الأخيرة تمثل للجزائر احتياطي طاقي بديل جد مهم. فاليوم، من بين هذه الطاقات، أصبحت طاقة الرياح حل مستدام لإنتاج الطاقة، بالإضافة إلى غيرها من مصادر الطاقات المتجددة.

الهدف في هذه المذكرة هو دراسة ونمذجة نظام طاقة بالرياح على أساس المولد ثنائي التغذية غير المتزامن. سنجري تحليل وتقييم الأداء الديناميكي وجودة الطاقة مع نظام نمذجة بدلالة كمية الطاقة و مع بيانات طاقة الرياح بمنطقة أدرار و هذا عن طريق المحاكاة العددية باستخدام المعطيات من البيئة الصحراوية .

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، نظام طاقة بالرياح، المولد ثنائي التغذية غير المتزامن، نمذجة، حقل الرياح، تحويل طاقة الرياح

Résumé

La production d'électricité à partir des ressources fossiles (charbon, pétrole ou gaz) ou fissiles (uranium,...) participe très largement à la dégradation de l'environnement ainsi qu'à l'épuisement de ces ressources non renouvelables. C'est pourquoi, l'une des mesures est préparée pour un développement ou croissance réellement durable consiste à accroître la part de ressources alternatives. La recherche est en cours dans le domaine des énergies dites renouvelables (éolienne, solaire, bioénergie), inépuisables et non polluantes, telque elles pourraient constituer pour l'Algérie une réserve énergétique alternatives intéressante. De nos jours, parmi ces énergies, l'énergie éolienne est devenue une solution durable pour la production d'énergie, en complément des autres sources d'énergie renouvelables.

L'objectif dans ce mémoire est de faire une étude et modélisation d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Nous procéderons à l'analyse et l'évaluation des performances dynamiques et la qualité d'énergie avec modélisation du système en fonction de la charge proposée et les données du vent à Adrar de ce système par des simulations numériques en utilisant les paramètres du milieu saharien.

Mots clés : Energie renouvelable, système éolien , génératrice asynchrone à double alimentation, modélisation, gisement du vent et conversion d'énergie éolienne.

Abstract

The production of electricity from fossil fuels (coal, oil or gas) or fossils (uranium ...) largely involved in environmental degradation and the depletion of non-renewable resources. Therefore, one of the measures is prepared for a truly sustainable development or growth is to increase the share of alternative resources. The research is ongoing in the field of so-called renewable energy sources (wind, solar, bio-energy), inexhaustible and non-polluting, such as they could be for an interesting alternative Algeria energy reserve. Today, among these energies, wind energy has become a sustainable solution for energy production, in addition to other renewable energy sources.

The objective in this memoir is to study and modeling of a wind energy system based on an asynchronous generator (Doubly fed induction generator : DFIG) .We will proceed the analysis and evaluation of dynamic performance and quality with energy modeling system based on the proposed load and wind data at Adrar of this system by numerical simulations using the parameters of the Saharan environment.

Key words: Renewable energy, wind system, doubly fed induction generator , modeling, wind field and wind energy conversion.