

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



INSTITUT DE TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

MÉMOIRE

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

Intitulé :

**ETUDE D'ALIMENTATION ROTORIQUE PAR UNE SOURCE
CONTINUE APPLIQUE A LA GADA POUR L'INTEGRATION
DANS UN SYSTEME HYBRIDE A ENERGIE RENOUVELABLE**

Présenté par :

- Belkhir Widad
- Moussaoui Amel
- Mezrag Rania

Soutenu le : 21/06/2023.... Devant le Jury :

<i>M. SEKKAL Mohammed Chakib.</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. HABCHI Yassine</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>M.KENDZI Mohammed</i>	<i>Dr</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M. SOFI Naima</i>	<i>MCB</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

Remerciement

Je tiens à remercier tout premièrement Allah pour la volonté, la santé et la patience, qu'il m'a donné durant toutes ces longues années et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les participant qui ont contribué à la réalisation de ce projet de mémoire de Master, consacré leur temps et partagé leurs idées pour enrichi les résultats et les conclusions de cette étude.

Tout d'abord, je suis profondément reconnaissant envers M.Kendzi Mohammed et M Habchi Yassine ; pour son encadrement, son soutien et son expertise inestimable tout au long du processus de recherche. Ses commentaires judicieux et ses critiques constructives ont grandement façonné l'orientation de ce projet.

J'aimerais également exprimer ma reconnaissance envers les membres du corps professoral de l'institution des Science et Technologie du Centre Universitaire Salhi Ahmed Naama dont les cours, les discussions et les ressources académiques ont joué un rôle crucial dans l'élargissement de mes connaissances et de ma compréhension de ce thème.

Enfin, je tiens à reconnaître tous les auteurs, chercheurs dont les travaux j'ai consultés et cités dans cette thèse. Leurs contributions ont posé les bases de cette étude et ont contribué de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine.



Dédicace

*Je dédie notre Travail avant tous À l'âme de
ma chère grand-mère qui aspirait à entendre
la nouvelle de ma graduation.*

*A mes Chers Parents mon père qui ne cesse
pas de m'encourager, et qui m'a toujours
soutenu, ma jolie mère symbole de sacrifice et
qui est tout pour moi, pour Sa Tendresse
profonde « Que Dieux me les protègent ».*

A mes chers professeur N.MEDJADJI

M.BESSNOUSI et M.KENDZI.

*À Mon cher Frère et Sœurs et toutes ma
famille tous mes amis.*

*A mes collègues du Centre Universitaire Salhi
Ahmed*

*Et tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce
mémoire.*

Belkhir Widad





Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux chères mamans et papa je vous aime, qu'ils trouvent la source de leur fierté en moi et qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieu les protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

A ma sœur El Hadja et mes frères et mon cher mari Zineddine et ma belle-mère Samia.


A toute ma famille, et surtout ma seule tante et ma cousine hadjer et Khaled.

A mes amies Amel et Widad.

A tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'ont aidé et encouragé de près

Ou de loin, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

Mezrag Rania





Dédicace

À Cher Papa, tu as toujours été pour moi un exemple de père respectueux, honnête et une personne scrupuleuse, je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension et ton soutien qui ont fait de moi ce que je suis aujourd'hui. Merci d'être toujours là, papa.

À ma chère Maman, tu es la chose la plus précieuse au monde pour moi, il n'y a aucun dévouement qui puisse exprimer tout mon amour et ma gratitude, Merci pour tes encouragements, ton amour, ton soutien et tes sacrifices, merci d'être toujours à mes côtés Maman.

À mes chers frères, Abdeljalil Azzedine Abdou Sofiane, aucune langue ne peut exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et vos encouragements.

À ma belle-sœur fatna, tu as apporté du bonheur à ma vie, mon monde sans toi serait insipide.

À mes chères sœurs Rania et widad qui ont partagé avec moi les doux-amers et de nombreux souvenirs inoubliables de ce travail. Je ne trouve pas les mots justes et sincères pour exprimer mon amour et mes sentiments pour vous deux. Merci d'être mes sœurs sur lesquelles je vous peux compter

À mes chères amies Zahira. Rima, en signe de l'amitié qui nous unit et en souvenir de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dis merci et vous souhaite succès et bonheur.

À tous ceux que j'aime.

Moussaoui AMEL

Résumé

Ce mémoire présente l'étude d'alimentation rotorique par une source continue appliqué à la génératrice asynchrone double alimentation pour l'intégration dans un système hybride a énergie renouvelable. Les éléments de base qui composent notre système hybride sont : éolienne, batterie, Nous sommes présentés les différents types d'énergies renouvelables et les différents éoliens et leurs principes de fonctionnement, on a ajouté aussi une présentation de quelques systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone. Nous avons détaillé une modélisation simplifiée de la génératrice asynchrone à double alimentation avec la commande vectorielle indirect .On a consacré à onduleur, régulateur et batterie. On a alimenté le rotor par une source continue (fixe, variable, batterie) où la simulation a été effectué sous l'environnement Matlab /Simulink. Les résultats de Simulation obtenus par l'application de la commande vectorielle à la génératrice asynchrone à double alimentation sont considérablement acceptables.

Mots clés

Energie éolienne - Modélisation - GADA- Commande Vectorielle – Contrôle de puissance active et réactive - régulateur PI-onduleur- batterie.

Abstract

This thesis presents a study on the rotor power supply by a continuous source applied to the asynchronous double power supply generator, with a view to its integration into a hybrid system using renewable energies. The basic components of this hybrid system include a wind turbine, a battery, etc. The different renewable energy sources are discussed, as well as the operating principles of wind turbines and some wind energy conversion systems using the asynchronous machine. A simplified modeling of the asynchronous generator with dual power supply with indirect vector control is detailed, focusing on the inverter, the regulator and the battery. The rotor is powered by a continuous source (fixed, variable, battery), and simulations have been carried out under the Matlab/Simulink environment. The results of these simulations, obtained thanks to the application of the indirect vector control to the asynchronous generator with dual power supply, are considered to be significantly satisfactory.

Key words

Wind energy - Modeling - DFIG - Field oriented control- active and reactive control – PI regulator-inverter-battery.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة دراسة حول مصدر طاقة الدوار بواسطة مصدر مستمر مطبق على مولد إمداد الطاقة المزدوج غير المتزامن، بهدف دمجها في نظام هجين باستخدام الطاقات المتجددة. تشمل المكونات الأساسية لهذا النظام الهجين توربينات الرياح والبطارية وما إلى ذلك. تمت مناقشة مصادر الطاقة المتجددة المختلفة ، بالإضافة إلى مبادئ تشغيل توربينات الرياح وبعض أنظمة تحويل طاقة الرياح باستخدام الآلة غير المتزامنة. تم تفصيل نمذجة مبسطة للمولد غير المتزامن مع مصدر طاقة مزدوج مع تحكم غير مباشر في المتجهات ، مع التركيز على العاكس والمنظم والبطارية. يتم تشغيل الدوار بواسطة مصدر مستمر (ثابت ، متغير ، بطارية) ، وقد تم إجراء عمليات المحاكاة في ظل بيئة ماتلاب/سيمولينك. تعتبر نتائج هذه المحاكاة ، التي تم الحصول عليها بفضل تطبيق التحكم غير المباشر في المتجهات على المولد غير المتزامن مع مصدر طاقة مزدوج ، مرضية بشكل كبير.

كلمات مفتاحية

طاقة الرياح، مولد لا تزامني ثنائي التغذية ، التحكم الشعاعي، التحكم فالتاقة الفعالة و غير الفعالة ، محولة، البطارية.

Sommaire

RESUME	I
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX	V
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS:	V
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE I: GENERALITES SUR LES SYSTEMES DE GENERATION D'ENERGIE ELECTRIQUE

I.1 INTRODUCTION.....	3
I.2 ENERGIES RENOUVELABLES	5
I.3 POTENTIEL DES ENERGIES RENOUVELABLES.....	5
I.3.1 Dans le monde	5
I.3.2 En Algérie.....	6
I.4 LES DIFFERENTS TYPES D'ENERGIE RENOUVELABLES.....	7
I.4.1 L'Énergie hydraulique.....	7
I.4.2 L'énergie biomasse.....	8
I.4.3 L'énergie géothermie.....	9
I.4.4 L'énergie solaire.....	10
I.4.5 L'énergie éolienne	11
I.4.5.1 Historique.....	11
I.4.5.2 Définition d'éolienne	12
I.4.5.3 Direction et vitesse du vent.....	13
I.4.5.4 Composants clés des éoliennes	14
I.4.5.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	16
I.4.5.6 Classification des éoliennes	16
I.4.5.7 Différents types d'éoliennes	18
I.4.5.8 Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique	20
I.4.5.9 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	20
I.4.5.10 Loi de Betz	22
I.4.5.11 La vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)	23
I.4.5.12 Coefficient de puissance	23
I.4.5.13 Coefficient de couple	24
I.4.5.14 Types des éoliennes selon les types des générateurs utilisées	26

I.5 COMPARAISON DES ENERGIES RENOUVELABLES	27
I.5.1 Production électrique.....	27
I.5.2 Les avantages et les inconvénients	27
I.6 SYSTEMES HYBRIDES.....	31
I.6.2 Classification des systèmes hybrides.....	32
I.6.3 Combinaisons des systèmes hybrides à énergie renouvelable	32
I.6.4 Avantages et inconvénients d'un système hybride.....	33
I.7 CONCLUSION :	34

CHAPITRE II : MODELISATION DU SYSTEME ETUDIE

II.1 INTRODUCTION	36
II.2 LA MACHINE ASYNCHRONE (MAS)	38
II.3 CONSTITUTION DE LA MACHINE ASYNCHRONE.....	38
II.4 TYPES DES MACHINES ASYNCHRONES :	39
II.4.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	39
II.4.2 Machine asynchrone à double stator	40
II.4.3 La machine asynchrone à double alimentation	41
II.4.3 .1 La double alimentation	41
II.4.3.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation :	42
II.4.3.2 Classification :	42
II.4.4 Fonctionnement de la MADA	45
II.4.5 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	46
II.4.5 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone	46
II.4.6 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone.....	46
II.4.7 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone.....	46
II.5. MODELISATION DU SYSTEME	47
II.5.1 Modélisation de la partie mécanique.....	47
II.5.1.1 Modélisation de la turbine	48
II.5.1.2 Modélisation du multiplicateur.....	49
II.5.1.3 Modélisation de l'arbre.....	50
II.5.2 Modélisation de la partie électrique	51
II.5.2.1 Hypothèses simplificatrices	51
II.5.2.2 Modèle de la MADA dans le repère triphasé	52
II.5.2.3 Choix de repère de référentiel de Park	55
II.5.2.4 Passage d'un système triphasé au système biphasé.....	55
II.5.2.5 Equation électrique	58
II.5.2.6 Equation magnétique	58

II.5.2.7 Les puissances active et réactive du GADA.....	60
II.5.2.8 L'équation mécanique	60
II.6 PRINCIPE DE LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION	61
II.6.1 La commande vectorielle à flux statorique orienté	61
II.6.2 Commande vectorielle indirecte	64
II.6.2.1 Commande en boucle ouverte	64
II.6.2.2 Commande indirecte en boucle fermée	65
II.7 ETUDE DE LA REGULATION POUR LA COMMANDE	67
II.8 MODELISATION ONDULEUR :.....	68
II.8.1 Modélisation onduleur a deux niveaux :	68
II.8.2 Principe de MLI	70
II.9 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA GADA	71
II.9.1 Avantages de la GADA.....	71
II.9.2 Inconvénients de la GADA	71
II.10 MODELISATION D'UN SYSTEME DE STOCKAGE	72
II.10.1 Description des différents types de stockage	72
II.10.2 Description d'une Batterie	72
II.10.3 Modèle de batterie de SHEPHERD	73
II.10.4 Caractéristique de la batterie :	74
II.10.5 Batterie utilisé dans notre étude :	77
II.11 CONCLUSION	78

CHAPITRE III: SIMULATION ET RESULTAT DU SYSTEME ETUDIE

III.1. INTRODUCTION	80
III.2.MODELISATION GLOBALE D'ALIMENTATION ROTORIQUE PAR UNE SOURCE CONTINUE APPLIQUE A LA GADA	82
III.3. LES CAS DES SOURCES CONTINUES	83
III.3.1.la tension continue fixe	83
III.3.1.1.Schéma simulation	84
III.3.1.2. Résultats de simulation.....	84
III.3.1.3. Interprétation	86
III.3.2. La tension variable :.....	86
III.3.2.1.Schéma simulation	87
III.3.2.2. Résultats de simulation.....	87
III.3.2.3. Interprétations.....	90

Sommaire

III.3.3. Groupe batterie	90
III.3.3.1.Schéma simulation	91
III.3.3.2 Résultats de simulation (groupe batterie).....	91
III.3.3.3 Résultats de simulation (système globale)	93
III.3.3.4. Interprétation	95
III.4. CONCLUSION	96

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

LES REFERENCES

ANNEXE

Liste des figures

FIGURE I-1 : ÉNERGIES RENOUVELABLES DANS LE MONDE v^2 5

FIGURE I-2 : CONSISTANCE DU PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT 6

FIGURE I-3 : CYCLE DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE..... 8

FIGURE I-4 : CYCLE DE BIOMASSE. 9

FIGURE I-5 : CYCLE DE GEOTHERMIE. 10

FIGURE I-6 : PANNEAUX DE SOLAIRE PHOTOVOLTIQUE 12

FIGURE I-7: PANNEAUX DE SOLAIRE THERMIQUE.....11

FIGURE I-8 : SCHEMA D'EOLIENNE 13

FIGURE I-9 : STRUCTURE D'UNE EOLIENNE..... 14

FIGURE I-10 ÉOLIENNE DE SAVONIUS18

FIGURE I-11 : LES DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNE DE DARRIEUS 19

FIGURE I-12 : EOLIENNES A AXE..... 20

FIGURE I-13: COLONNE D'AIR ANIMEE D'UNE VITESSE 21

FIGURE I-14: TUBE DE COURANT AUTOUR D'UNE EOLIENNE. 22

FIGURE I-15: COEFFICIENT DE PUISSANCE POUR DIFFERENTS TYPES DES TURBINES EOLIENNES. 24

FIGURE I-16: RENDEMENT ENERGETIQUE POUR DIFFERENTS TYPES DES EOLIENNES. 25

FIGURE I-17: PART D'ENERGIE RENOUVELABLE DANS LA PRODUCTION D'ELECTRICITE. 27

FIGURE I-18: SYSTEME HYBRIDE A ENERGIES RENOUVELABLES..... 31

FIGURE II-1: LES CONSTITUTIONS D'UNE MACHINE ASYNCHRONE (4)[4]. 39

FIGURE II-2: CARACTERISTIQUE COUPLE/VITESSE D'UNE MAS A DEUX PAIRES DE POLE (5)[5]. 40

FIGURE II-3: MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE STATOR (6)[6]..... 41

FIGURE II-4: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION SIMPLE (8)..... 43

FIGURE II-5: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MADA EN CASCADE (8). 43

FIGURE II-6: SCHEMA DE PRINCIPE DE MADA EN CASCADE A UN REPERE. (8) 44

FIGURE II-7: SCHEMA DE PRINCIPE DE LA MACHINE A DOUBLE ALIMENTATION SANS BALAIS (8)45

FIGURE II-8: MODES OPERATIONNELS CARACTERISTIQUES DE LA MADA (13)[13]. 47

FIGURE II-9: LE SCHEMA GLOBAL DES ELEMENTS DE BASE D'UNE EOLIENNE CONNECTEE AU RESEAU (14)[14]. 48

FIGURE II-10: ALLURE DU COEFFICIENT DE PUISSANCE POUR UNE EOLIENNE REELLE (15). 49

FIGURE II-11: MODELE MECANIQUE SIMPLIFIE DU MULTIPLICATEUR (16). 50

Liste des figures

FIGURE II-12: SCHEMA BLOC INTRODUIT LA CONVERSION DE LA CHAINE EOLIENNE.....	51
FIGURE II-13: REPRESENTATION DE LA MADA DANS LES REPERES TRIPHASES (18)[18].	53
FIGURE II-14: MODELE CLARK CONCORDIA.....	56
FIGURE II-15: MODELE DE PARK.	57
FIGURE II-16: MODELE GLOBALE DE CLARK ET PARK.....	57
FIGURE II-17: ORIENTATION DE FLUX STATORIQUE DE LA MADA.....	62
FIGURE II-18: SCHEMA SIMPLIFIE POUR LA COMMANDE A FLUX ORIENTE.	63
FIGURE II-19: : SCHEMA DE LA COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE EN BOUCLE OUVERT.	65
FIGURE II-20: SCHEMA DE LA COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE EN BOUCLE FERMEE.	66
FIGURE II-21: SCHEMA BLOC DU SYSTEME DE REGULATION.....	67
FIGURE II-22: SCHEMA ELECTRIQUE DE RACCORDEMENT ENTRE LE ROTOR ET UN ONDULEUR A DEUX NIVEAUX.	69
FIGURE II-23: MODELE SIMPLIFIE DE LA BATTERIE.....	73
FIGURE III-1: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME GLOBAL A ENERGIES RENOUVELABLES.....	82
FIGURE III-2: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME SOURCE CONTINUE (LA TENSION CONTINUE FIXE)	84
FIGURE III-3: PUISSANCE ACTIVE.....	87
FIGURE III-4: PUISSANCE REACTIVE	85
FIGURE III-5: COURANT STATORIQUE (I_{AS} , I_{BS} , I_{CS}).....	85
FIGURE III-6: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME SOURCE CONTINUE (LA TENSION VARIABLE). 87	
FIGURE III-7: PUISSANCE ACTIVE.....	90
FIGURE III-8: PUISSANCE REACTIVE	88
FIGURE III-9 : COURANT STATORIQUE (I_{AS}).....	88
FIGURE III-10: COURANT STATORIQUE (I_{BS})	89
FIGURE III-11: COURANT STATORIQUE (I_{CS})	89
FIGURE III-12: SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME SOURCE CONTINUE (GROUPE BATTERIE)	91
FIGURE III-13: LA DECHARGE TOTAL DE GROUPE BATTERIE (V_{batt} , I_{batt} , P_b , SOC) EN FONCTION DE TEMPS.	92
FIGURE III-14: COMPORTEMENT DE GROUPE BATTERIE (V_{batt} , I_{batt} , P_b , SOC) EN MODE CHARGE DECHARGE EN FONCTION DE TEMPS.....	93
FIGURE III-15: PUISSANCE ACTIVE	93

Liste des figures

FIGURE III-16: PUISSANCE REACTIVE	94
FIGURE III-17: COURANT STATORIQUE (IAS)	94
FIGURE III-18: COURANT STATORIQUE (IBS)	94
FIGURE III-19: COURANT STATORIQUE (ICS)	95

Liste des tableaux

TABLEAU I-1 : TAILLE DES EOLIENNES	17
TABLEAU I-2: LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS DES ENERGIES RENOUVELABLE	31
TABLEAU II-1: CARACTERISTIQUES DES BATTERIES NI-MH.....	77

Liste des symboles et abréviations:

AIE : Agence internationale de l'énergie.

AC : courant alternatif.

CC : courant continu.

GAS : générateurs asynchrones à cage d'écureuil.

GSRB : générateurs synchrones à rotor bobiné.

GSAP : générateurs synchrones à aimants permanents.

GADA : générateurs asynchrones à rotor bobiné à double alimentation.

SHER : systèmes hybrides à énergie renouvelable.

MAS : Machine Asynchrone.

MADA : Machine Asynchrone A Double Alimentation.

DFIM : Doubly Fed Induction Machine

MADA.S : Machine Asynchrone A Double Alimentation Simple.

BDFIM : Brushless Doubly Fed Induction Machine.

DFIG : Doubly Fed Induction Generator.

PI : proportionnel integral

FBO : fonction de transfert en boucle ouvert

FBF : fonction de transfert en boucle fermé

MOSFET : Metal Oxyde Semiconductor Effect Transistor.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor .

MLI : modulation de largeur d'impulsion .

Notation :

Liste des symboles et abréviations

C_p : coefficient de puissance .

$C_{méc}$: couple d'entraînement de la GADA .

Ω_s : vitesse de synchronisme .

ω : pulsation des courants alternatifs .

p : nombre de paire pôles .

g : coefficient de glissement .

P_{vent} : puissance due au vent .

ρ : densité de l'air .

S : surface curculaire balayé par la turbine .

R : rayon du cercle déterminé par la longueur des pales .

v_{vent} : la vitesse du vent .

P_{aero} : puissance aérodynamique .

β : l'angle d'orientation des pales.

λ : la vitesse spécifique.

C_{aero} : couple aérodynamique

Ω_t : vitesse de rotation de la turbine .

$\Omega_{méc}$: vitesse d'entraînement de la GADA .

C_t : couple développée par la turbine .

G : gain du multiplicateur .

J : l'inertie totale .

f : le coefficient de frottement visqueux .

Liste des symboles et abréviations

s_a, s_b, s_c : les trois bobines statorique .

r_a, r_b, r_c : les trois bobines rotorique.

$[\psi_s] = [\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c du stator.

$[\psi_r] = [\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c du rotor.

$[I_s] = [I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}]^T$: Vecteurs des courants instantanés des phases a, b et c du stator.

$[I_r] = [I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}]^T$: Vecteurs des courants instantanés des phases a, b et c du rotor.

l_s Et l_r : Les inductances propres du stator et rotor

m_s Et m_r : Les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la MADA, respectivement ;

M : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique .

θ : L'angle électrique entre une phase statorique et une autre rotorique .

$[V_s]; [V_r]$: tension statorique et tension rotorique .

R_s Et R_r : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement.

$(\alpha; \beta)$: axes correspondants au référentiel lié au stator.

$(d; q)$: axes correspondants au référentiel lié au champ tournant.

$T_{abc \rightarrow \alpha\beta 0}$:matrice du transformation de Clarck-Concordia.

$T_{\alpha\beta 0 \rightarrow dq}$: matrice du transformation de PARK .

$V_{ds}; V_{qs}, V_{dr}; V_{qr}$: composantes des tensions statorique et rotoriques dans le repère (dq) .

Liste des symboles et abréviations

$I_{ds}; I_{qs}, I_{dr}; I_{qr}$: composantes des courants statorique et rotorique dans le repère (dq) .

$\Psi_{ds}; \Psi_{qs}, \Psi_{dr}; \Psi_{qr}$: composantes des flux statorique et rotoriques dans le repère (dq) .

ω_r : pulsation rotorique .

ω_m : pulsation mécanique .

$\theta_s; \theta_r$: Déphasage de l'axe directe par rapport au stator, rotor.

$P_s; Q_s$: puissance active et réactive statorique

$P_r; Q_r$: puissance active et réactive rotorique

$P_{ref}; Q_{ref}$: puissance active et réactive référentiel

$V_{dr_ref}; V_{qr_ref}$: composantes des tensions rotoriques dans le repère (dq) .

K_i : Gain intégral du régulateur.

K_p : Gain proportionnel du régulateur.

τ : temps de réponse

S_i : état de commutation des interrupteurs (groupe transistor-diode)

$W(t)$: signal triangulaire du MLI.

f_{por} : fréquence porteuse

V_A, V_B et V_C : tension souhaitées à appliquer sur chaque phase

m : L'indice de modulation

f_{ref} : La fréquence de la tension de référence

r : Le taux de modulation

Vb : Tension de batterie

Liste des symboles et abréviations

Ib : Courent de batterie

Pb : Puissance de batterie

SOC : state of charge

Introduction

générale

Introduction générale

La demande croissante d'énergie constitue un problème quotidien à l'échelle mondiale. L'activité industrielle en rapide expansion dans les pays développés, ainsi que les investissements des entreprises dans des pays offrant des coûts de production plus bas, ont engendré une augmentation significative de la demande énergétique mondiale. Cette augmentation a entraîné une hausse des prix du pétrole, qui demeure la principale source d'énergie. Toutefois, les réserves mondiales de pétrole diminuent continuellement, et il est prévu qu'à l'avenir, elles ne seront pas suffisantes pour répondre à la demande croissante. Parallèlement, le climat de la Terre se détériore, tandis que les sources naturelles d'eau se font de plus en plus rares.

L'énergie nucléaire, en raison de considérations politiques et financières, n'est pas accessible à tous. De plus, son installation engendre des coûts élevés et présente des risques écologiques. Ainsi, l'utilisation de sources d'énergie conventionnelles est limitée ou découragée en raison de préoccupations environnementales. C'est pourquoi le monde s'oriente de plus en plus vers l'utilisation de sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, les courants sous-marins, et autres, pour la production d'électricité [1].

Le développement technologique et l'évolution des techniques de conversion des énergies renouvelables en énergie électrique, également connues sous les appellations d'énergies vertes, alternatives ou propres, ont apporté de nombreuses solutions aux problèmes liés à l'exploitation des énergies fossiles, qui sont responsables des émissions de gaz à effet de serre. Ces émissions ont des conséquences néfastes sur la santé humaine, animale et végétale, notamment par le biais des pluies acides.

Les énergies renouvelables, quant à elles, présentent un impact écologique positif. De plus, elles se conforment aux normes internationales en matière de lutte contre la pollution. En effet, ces sources d'énergie renouvelables sont une solution adéquate pour répondre aux défis environnementaux actuels tout en fournissant de l'énergie propre et durable [2].

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne, solaire, hydraulique, biomasse, etc., offrent une disponibilité inépuisable. Elles peuvent être exploitées pour la production

d'électricité dans de nombreuses régions du monde, ce qui permet de diversifier les sources d'énergie électrique tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette transition favorise également le développement économique des régions qui n'ont pas encore accès à l'électricité, en créant des opportunités d'activités économiques génératrices de revenus.

De nos jours, après l'énergie hydraulique, les énergies éolienne et solaire sont considérées comme des sources d'énergie très prometteuses en raison de leur disponibilité dans la plupart des régions du monde. De plus, elles sont devenues compétitives en termes de coûts de production et jouent un rôle significatif dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre [3].

Chapitre 1 : Dans le premier chapitre, nous abordons l'analyse et les principes de fonctionnement de divers types de sources d'énergie utilisées dans les groupes motopropulseurs hybrides. Nous examinons également leurs caractéristiques physiques et électriques, leurs limites, leurs modèles, ainsi que leurs avantages et inconvénients. En outre, nous nous intéressons aux différentes composantes qui composent ces sources d'énergie.

Chapitre 2 : Ce chapitre présente une étude approfondie des machines asynchrones, en abordant leurs composants, leurs types et leur fonctionnement. Dans le cadre de la modélisation, nous prenons en compte la modélisation de la partie mécanique et électrique de la machine, ainsi que la modélisation de la deuxième alimentation, à savoir les batteries.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la modélisation et la commande d'un système de conversion éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (GADA). Notre objectif est de développer un modèle de simulation modulaire qui peut être adapté en fonction des besoins spécifiques des différentes simulations. Les chapitres précédents ont fourni les bases nécessaires pour le développement de ce modèle dans l'environnement MATLAB/Simulink. Dans cette étude, nous commençons par examiner le système éolien autonome basé sur la configuration GADA. Cette configuration permet d'intégrer efficacement l'énergie éolienne dans le système en utilisant la machine asynchrone à double alimentation.

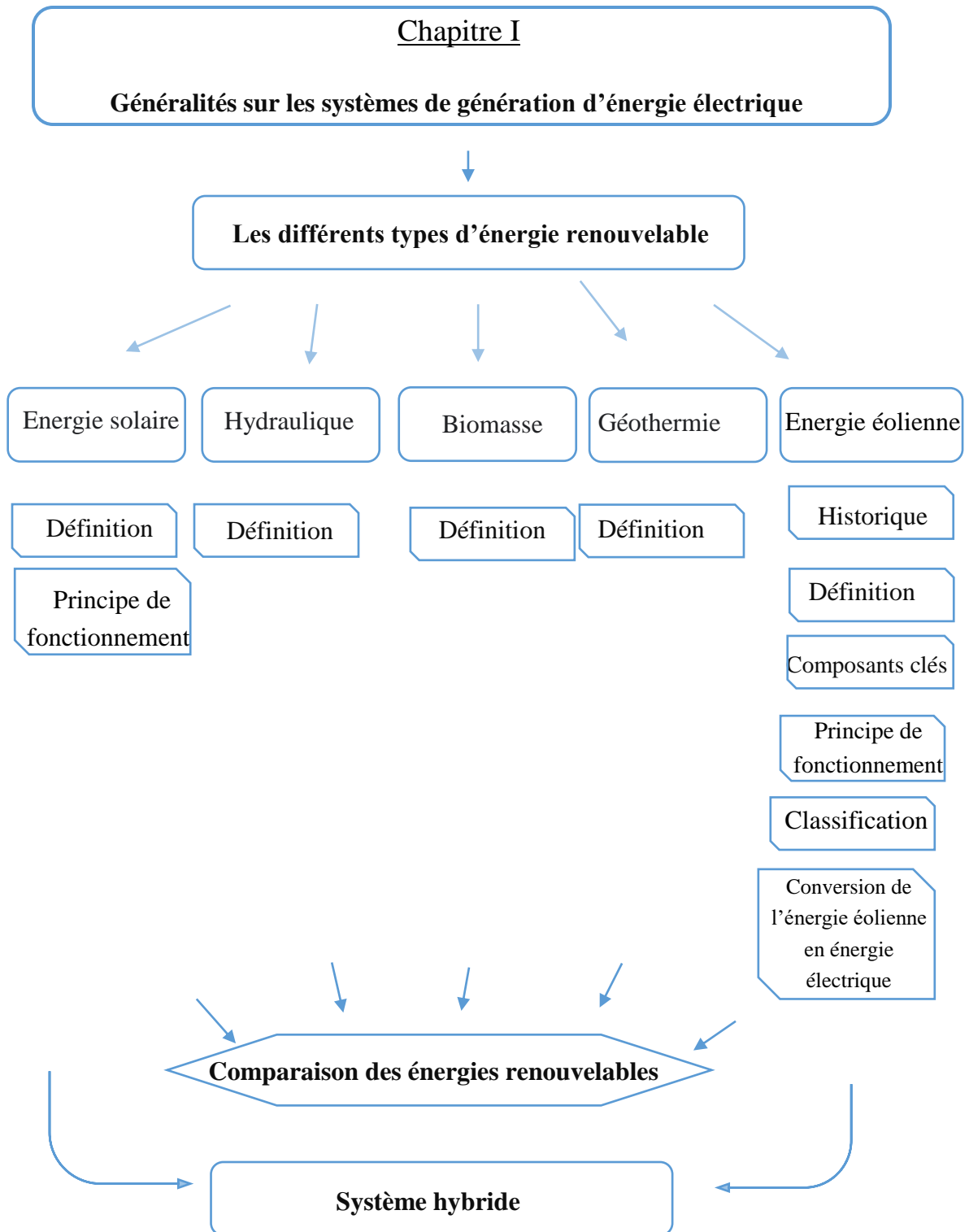
Chapitre I :

Généralités sur les
systèmes de génération
d'énergie électrique

I.1 Introduction

La combinaison de plusieurs sources d'énergie renouvelables permet de maximiser le système de production d'électricité, nous allons donc sélectionner une partie des sources d'énergie pouvant être combinées pour obtenir un système hybride (éoliennes et batteries) pour fournir une puissance permanente.

Dans le premier chapitre, nous présentons l'analyse et les principes de fonctionnement de différents types de sources d'énergie pour les groupes motopropulseurs hybrides. Nous analyserons également leurs caractéristiques physiques et électriques, leurs limites et modèles, leurs avantages et inconvénients. Enfin, les différentes composantes de ces ressources nous intéressent. Dans ce travail, les éléments de base qui composent notre système hybride sont : éolienne, batterie [4]



I.2 Energies renouvelables

Une source d'énergie est renouvelable si sa consommation ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des rivières, de la terre, de la biomasse humide ou sèche à des échelles de temps à la mesure de l'histoire humaine [5].

I.3 Potentiel des énergies renouvelables

I.3.1 Dans le monde

En 2022, les capacités mondiales d'énergie renouvelable ont connu une augmentation de plus de 8%. Cependant, malgré cette croissance, l'Agence internationale de l'énergie met en garde contre la dépendance des prévisions des marchés des énergies renouvelables pour 2023 et les années suivantes vis-à-vis de l'introduction et de la mise en œuvre de politiques nouvelles et plus robustes au cours des six prochains mois.

Comme le montre la Figure (I.1), la Chine à elle seule pourrait représenter 45% des installations mondiales de capacités renouvelables en 2022-2023, selon les projections de l'AIE. La Chine se concentre notamment sur un déploiement massif de l'énergie solaire photovoltaïque. [6].

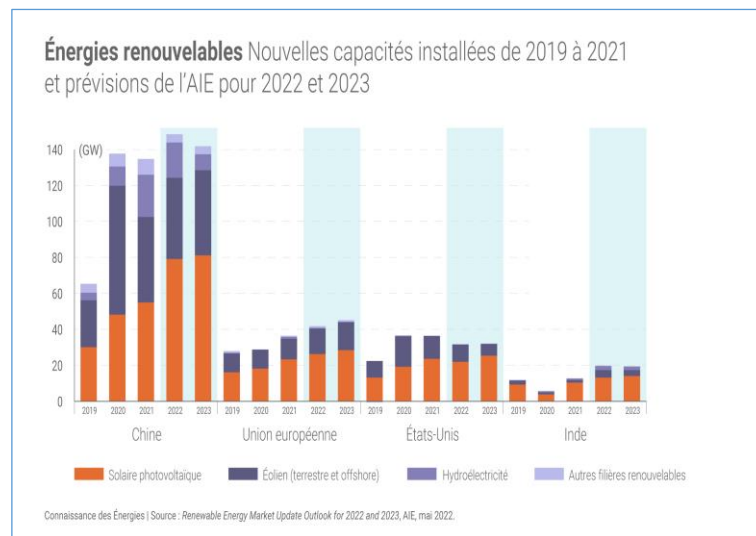


Figure I-1 : Énergies renouvelables dans le monde v² [6]

I.3.2 En Algérie

À travers ce programme ambitieux axé sur les énergies renouvelables, l'Algérie aspire à jouer un rôle prépondérant dans la production d'électricité à partir des sources d'énergie solaire et éolienne, tout en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie, et à partir de 2021, l'énergie solaire thermique. Ces filières énergétiques constituent les moteurs d'un développement économique durable, capable d'instaurer un nouveau modèle de croissance économique.

D'ici 2030, l'objectif est que 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale proviennent de sources renouvelables. Le potentiel national en énergies renouvelables étant principalement dominé par l'énergie solaire, l'Algérie considère cette forme d'énergie comme une opportunité et un catalyseur pour le développement économique et social, notamment par le biais de l'établissement d'industries génératrices de richesse et d'emplois. Cela n'exclut cependant pas la mise en place de nombreux projets de parcs éoliens et la réalisation de projets pilote dans les domaines de la biomasse, de la géothermie et de la cogénération.

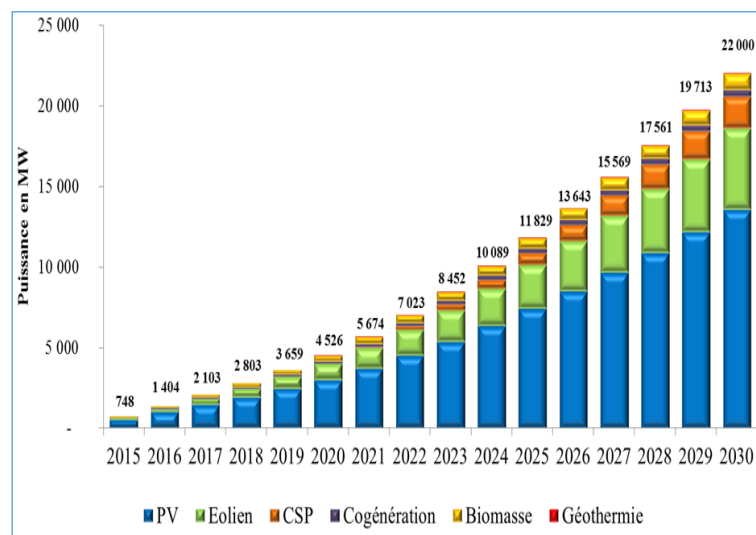


Figure I-2 : Consistance du programme de développement [7]

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de génération d'énergie électrique

Comme illustré dans la figure (I.2), la première phase du programme, qui s'étend de 2015 à 2020, se concentrera sur la réalisation d'une capacité de production totale de 4 010 MW, répartis entre l'énergie photovoltaïque et éolienne, ainsi que 515 MW provenant de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie.

La deuxième phase, prévue de 2021 à 2030, mettra l'accent sur le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar). Cela permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar, et leur intégration dans le système énergétique national. À cette étape, le solaire thermique pourrait devenir économiquement viable [7].

I.4 Les différents types d'énergie renouvelables

Il existe cinq principales familles d'énergies renouvelables, classées selon leur exploitation actuelle :

- L'énergie hydraulique
- L'énergie biomasse.
- L'énergie géothermie.
- L'énergie solaire.
- L'énergie éolienne [8].

I.4.1 L'Énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est une forme d'énergie dérivée du mouvement de l'eau, qu'il s'agisse de chutes d'eau, de cours d'eau, de courants marins, de marées ou de vagues. Ce mouvement peut être exploité directement, par exemple à l'aide d'un moulin à eau, ou plus fréquemment converti en énergie électrique dans une centrale hydroélectrique, comme illustré dans la figure(I.3) [9].

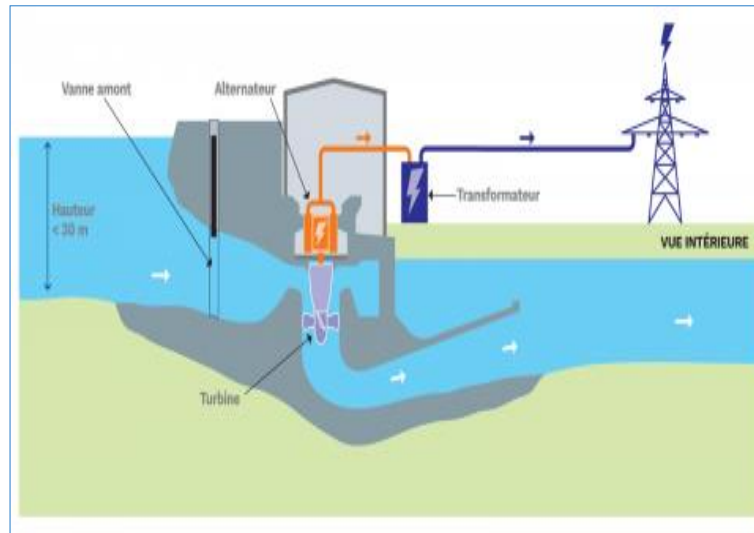


Figure I-3 : Cycle de l'énergie hydraulique.

I.4.2 L'énergie biomasse

Les énergies biomasse regroupent tous les matériaux d'origine biologique utilisés comme combustibles pour produire de la chaleur, de l'électricité, du gaz et des carburants. Les principales sources d'énergies biomasse sont le bois, le biogaz et les biocarburants (également appelés agro carburants). Ces énergies sont renouvelables, émettent moins de CO₂ dans l'atmosphère lors de leur utilisation et favorisent l'exploitation des ressources locales lorsque cela est possible.

La biomasse est en réalité de l'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est ensuite exploitée par combustion. Pour que cette énergie soit considérée comme renouvelable, il est important de ne pas brûler des quantités de biomasse supérieures à celles produites, bien que cette condition ne soit pas toujours remplie. Parmi les exemples d'énergies biomasse, on peut citer le bois, le biogaz et les biocarburants produits à partir de colza ou de betteraves (tels que le diester et le méthanol), comme illustré dans la figure (I.4) [10].

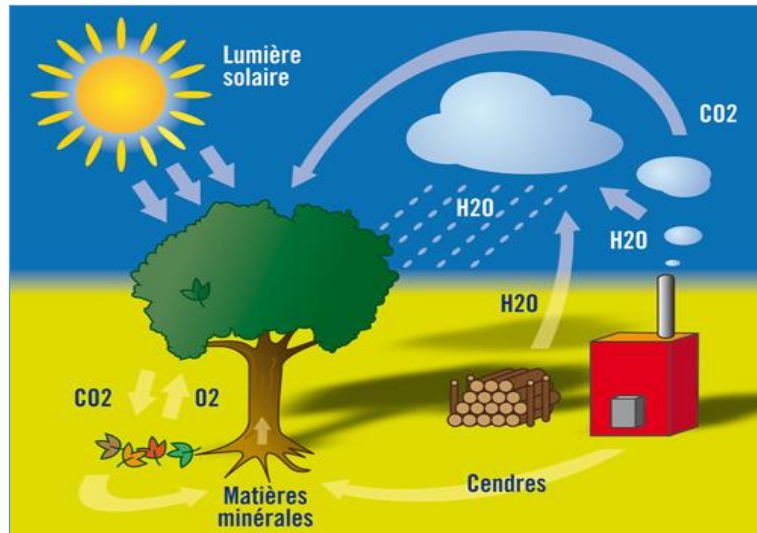


Figure I-4 : Cycle De Biomasse.

I.4.3 L'énergie géothermique

La géothermie, dérivée des mots grecs "Géo" (la terre) et "thermie" (la chaleur), est à la fois une science étudiant les phénomènes thermiques internes de la Terre et une technique visant à exploiter cette chaleur. Plus précisément, la géothermie désigne l'énergie géothermique qui provient de la chaleur interne de la Terre et qui est convertie en chaleur utilisable. Pour capter cette énergie géothermique, on fait circuler un fluide dans les profondeurs de la Terre. Ce fluide peut être l'eau d'une nappe souterraine naturellement chaude et captive, ou de l'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Dans les deux cas, le fluide se réchauffe au contact de la chaleur terrestre et remonte à la surface en transportant des calories, c'est-à-dire de l'énergie thermique. Ces calories peuvent être utilisées directement pour le chauffage, la climatisation ou la production d'eau chaude, ou elles peuvent être partiellement converties en électricité à l'aide d'un système de conversion, comme illustré dans la figure (I.5). [11].

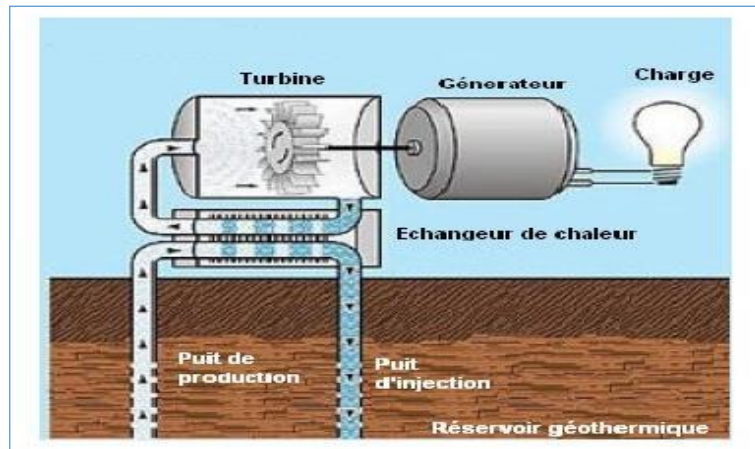


Figure I-5 : Cycle De géothermie.

I.4.4 L'énergie solaire

Cette forme d'énergie renouvelable est directement dérivée de la capture du rayonnement solaire. Des dispositifs spécifiques appelés capteurs sont utilisés pour absorber l'énergie des rayons solaires et la redistribuer selon deux principaux modes de fonctionnement [12] :

1. Solaire photovoltaïque : Les panneaux solaires photovoltaïques sont utilisés pour capter l'énergie solaire en vue de produire de l'électricité, comme illustré dans la figure (I.6).

2. Solaire thermique : Les chauffe-eaux solaires, les systèmes de chauffage et les panneaux solaires thermiques sont utilisés pour capter et redistribuer la chaleur des rayons solaires. Dans de rares cas, cette chaleur peut également être utilisée pour produire de l'électricité, comme le montre la figure (I.7).

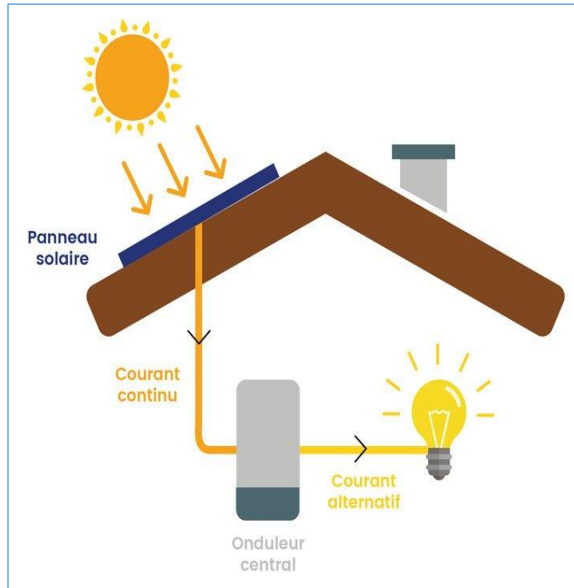


Figure I-6 : Panneaux de solaire photovoltaïque.

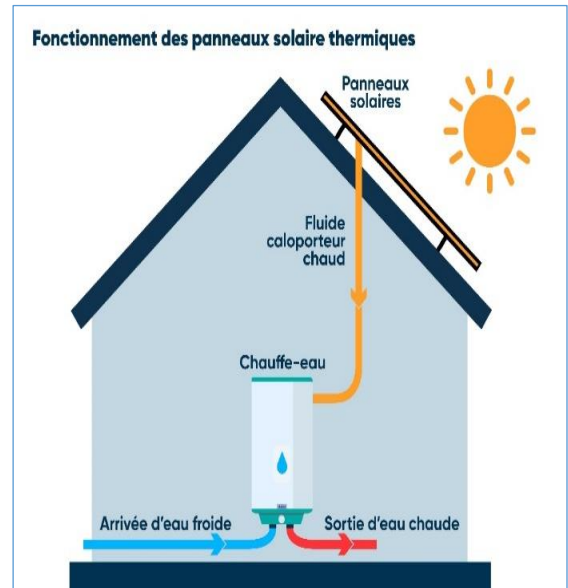


Figure I-7 : Panneaux de solaire Thermique.

I.4.5 L'énergie éolienne

I.4.5.1 Historique

1100 : Les premières éoliennes sont construites en Europe et sont utilisées pour pomper de l'eau et moudre du blé. Ces moulins à vent se composent de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal.

1887 : Charles F. Brush fabrique la première éolienne automatique à Cleveland. Mesurant 18 mètres de haut et pesant 3,6 tonnes, elle alimente une génératrice de 12 kW.

1887-1888 : Charles F. Brush construit la première éolienne entièrement automatisée, produisant du courant pour 12 batteries.

1890 : Le Danois Poul La Cour met au point la première éolienne "industrielle" capable de produire de l'électricité. Il utilise cette éolienne pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de génération d'énergie électrique

1891 : Poul La Cour conçoit plusieurs éoliennes expérimentales et effectue des recherches en soufflerie. Il découvre que les turbines à rotation rapide, avec un nombre réduit de pales, génèrent plus d'électricité que les turbines plus lentes avec un plus grand nombre de pales.

1920 : Georges J.M. Darrieus, inventeur français, développe le concept des éoliennes à rotor vertical, connues sous le nom d'éoliennes Darrieus. Albert Betz poursuit ses recherches sur la physique et l'aérodynamique des éoliennes, formulant la loi qui porte son nom, établissant que l'énergie cinétique du vent peut être exploitée au maximum à 59,3%.

Sa théorie sur la conception des pales est encore utilisée de nos jours.

2002 : Le plus grand parc éolien offshore au monde, HornsRev, est mis en service au Danemark.

2008 : Le Danemark devient le plus grand fabricant mondial d'éoliennes et compte 500 W éoliens par habitant.

2010 : Le déploiement des éoliennes offshore s'accélère avec des projets de plus en plus puissants.

2015 : L'énergie éolienne représente 42,1% de la consommation électrique du Danemark.

2019 : Trois régions, Grand-Est, Hauts-de-France et Occitanie, totalisent près de 60% de la production nationale d'électricité éolienne.

2021 : La capacité mondiale d'énergie éolienne dépasse les 752 GW [13].

I.4.5.2 Définition d'éolienne

L'énergie éolienne est générée par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Elle permet de produire deux types d'énergie. Tout d'abord, l'hélice peut être connectée à des systèmes mécaniques utilisés pour moulinier le grain ou pomper l'eau.

Il est également possible de relier l'hélice à un générateur qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend principalement de la vitesse du vent, élevée au carré, de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

Pour produire de l'électricité, une vitesse minimale du vent d'environ 12-14 km/h est nécessaire, tandis que des vents de 50-60 km/h sont nécessaires pour atteindre la pleine puissance. Afin de prévenir tout dommage à l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h.

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en :

- Énergie électrique, dans le cas d'une éolienne à générateur.
- Énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage [14].

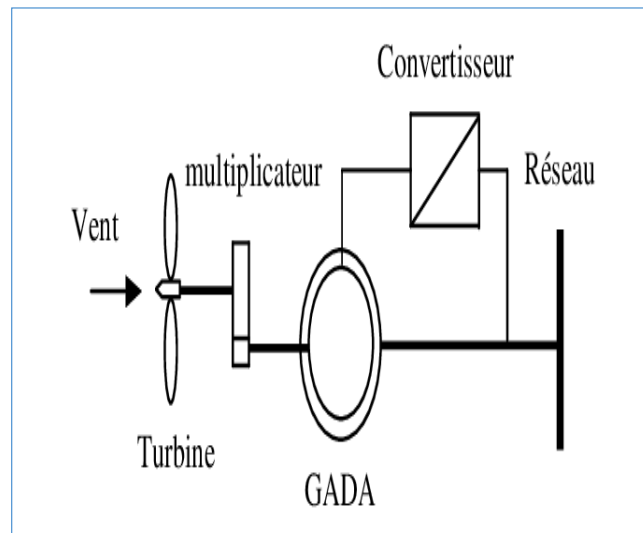


Figure I-8 : Schéma d'éolienne

I.4.5.3 Direction et vitesse du vent

Le vent se déplace des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Toutefois, aux latitudes moyennes et élevées, la rotation de la Terre influence la direction du vent. Dans l'hémisphère Nord, le vent circule dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des systèmes cycloniques et dans le sens des aiguilles d'une montre autour des systèmes anticycloniques. Dans l'hémisphère Sud, ces directions sont inversées par rapport à celles de l'hémisphère Nord. La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'anémomètres. Une échelle de référence, connue sous le nom d'échelle de Beaufort, a été établie pour classer les vents en 17 catégories en fonction de leur vitesse [15].

I.4.5.4 Composants clés des éoliennes

Le système éolien est généralement composé des éléments principaux représentés dans la figure (I.9) [16].

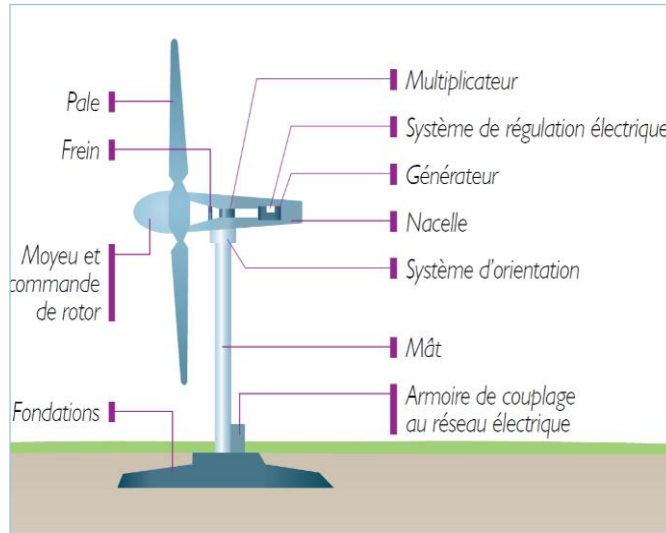


Figure I-9 : Structure d'une éolienne

- **Les pales** : constituent un dispositif aérodynamique, fait de matériaux composites tels que des fibres de verre, du plastique ou du bois. Leur conception est le résultat d'études aérodynamiques approfondies. Les pales sont fixées à un moyeu pour former le rotor et sont conçues pour tourner autour de l'axe du rotor lorsque le vent est suffisant.

- **La nacelle** : est une enveloppe qui protège la boîte d'engrenages, le générateur et les autres composants des éléments extérieurs et de la détérioration. Elle comprend plusieurs éléments, tels que :

- **Un moyeu équipé** : d'un système permettant d'orienter les pales pour réguler leur vitesse de rotation.

- **Un rotor** : qui convertit l'énergie cinétique transmise par les pales en énergie mécanique de rotation.

- **Des freins** : qui permettent d'arrêter les pales en cas de vents très forts susceptibles d'endommager l'éolienne ou de la rendre incontrôlable.

- **Un multiplicateur** : qui agit en tant qu'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire. Il réduit le couple et/ou augmente la vitesse de rotation.

- **Un générateur** : est responsable de la conversion de l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique dans le système éolien. Il peut fonctionner selon deux principaux types : l'alternateur qui produit du courant alternatif (CA) ou la dynamo qui produit du courant continu (CC). Actuellement, l'alternateur est largement utilisé dans les éoliennes en raison de ses avantages en termes de coût et de rendement. Il existe différentes technologies de générateurs qui peuvent être utilisées dans les éoliennes, notamment :

- ✚ Les générateurs asynchrones à cage d'écureuil « GAS ».
- ✚ Les générateurs synchrones à rotor bobiné « GSRB ».
- ✚ Les générateurs synchrones à aimants permanents « GSAP ».
- ✚ Les générateurs asynchrones à rotor bobiné à double alimentation « GADA ».

- **Un système de régulation électrique** : Ce système est utilisé pour ralentir le rotor du générateur en cas de surrégime, afin de protéger l'éolienne et de maintenir des conditions de fonctionnement sûres.

- **Un système de refroidissement** : Il peut prendre la forme d'un refroidissement à huile, à eau ou à air, et est destiné à assurer le refroidissement du multiplicateur et du générateur, qui peuvent générer de la chaleur lors de leur fonctionnement.

- **Le système d'orientation** : Il est composé d'une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter les pales de l'éolienne face au vent, dans l'axe du vent. Cela permet d'optimiser la capture de l'énergie éolienne. Le système d'orientation peut également verrouiller les pales dans une position donnée si nécessaire.

- **Le mât (ou tour)** : Il s'agit d'un tube en acier qui constitue la structure principale de l'éolienne. Sa hauteur est importante car elle détermine la vitesse du vent à laquelle l'éolienne est exposée. Une hauteur plus élevée permet généralement de capter un vent plus fort, mais elle entraîne également des coûts de construction plus élevés. En général, la hauteur du mât est légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'éolienne.

I.4.5.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le fonctionnement d'une éolienne peut être expliqué en deux étapes principales [17] :

- **Au niveau de la turbine (rotor) :** La première étape consiste à convertir une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rotor de l'éolienne, composé de pales aérodynamiques, est exposé au vent qui crée une différence de pression entre la face avant et la face arrière des pales. Cette différence de pression génère une force aérodynamique appelée "poussée" qui fait tourner le rotor. Le mouvement de rotation du rotor est ensuite transmis à l'arbre de la turbine.
- **Au niveau de la génératrice :** La deuxième étape consiste à convertir l'énergie mécanique du mouvement de rotation de l'arbre de la turbine en énergie électrique. L'arbre de la turbine est relié à une génératrice, qui fonctionne comme un alternateur. Lorsque l'arbre tourne, il fait également tourner les aimants à l'intérieur de la génératrice. Ce mouvement crée un champ magnétique qui induit un courant électrique dans les bobines de la génératrice. Ce courant électrique produit ainsi de l'énergie électrique sous forme de courant alternatif.

I.4.5.6 Classification des éoliennes

Dans cette partie nous présentons les différentes éoliennes rencontrées dans la production de l'énergie électrique, pour cela on peut les classer selon les catégories suivantes [18] :

a)- Taille des aérogénérateurs

Les besoins en énergie électrique conduit les chercheurs et les constructeurs à usiner des éoliennes de plus en plus puissantes ; la puissance de l'éolienne va avec la longueur des hélices.

La classification des éoliennes selon leurs tailles se réduit à trois types, les éoliennes de petites tailles, de moyenne et de grande taille comme montré dans le tableau (I.1).

Tableau I-1 : Taille des éoliennes

<i>TAILLE</i>	<i>Diamètre de l'hélice</i>	<i>Puissance Délivrée</i>
<i>Petite</i>	<i>Moins de 12 m</i>	<i>Moins de 40 KW</i>
<i>Moyenne</i>	<i>12 m à 45 m</i>	<i>De 40KW à 1MW</i>
<i>Grande</i>	<i>45 m et plus</i>	<i>1MW et plus</i>

b)- L'organe capteur

L'organe capteur dans une éolienne joue un rôle essentiel dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il existe deux grandes catégories d'éoliennes en fonction de la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice :

- **Capteurs à axe horizontal** : Les éoliennes commerciales actuelles utilisent principalement un rotor de type hélice monté sur un axe horizontal, c'est-à-dire un arbre principal horizontal. Ce type d'éolienne est largement répandu en raison de son rendement élevé par rapport aux autres types. Les pales de l'éolienne sont conçues pour capturer le vent et le faire tourner autour de l'axe horizontal, générant ainsi un mouvement de rotation.
- **Capteurs à axe vertical** : Les éoliennes à axe vertical ont un rotor disposé perpendiculairement au sol, avec un axe vertical. Ces éoliennes ne peuvent pas démarrer spontanément et nécessitent un système de lancement pour commencer à tourner. L'un des avantages principaux des éoliennes à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ce qui facilite l'accès pour la maintenance et l'installation des composants électriques. Cependant, les éoliennes à axe vertical ont généralement un rendement légèrement inférieur aux éoliennes à axe horizontal.

I.4.5.7 Différents types d'éoliennes

Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [19].

✚ Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures développées pour la production d'électricité, ce qui les distingue du concept traditionnel des moulins à vent à axe horizontal.

✚ **Éolienne de Savonius** : Cette éolienne se compose d'au moins deux demi-cylindres installés légèrement décalés l'un par rapport à l'autre, comme illustré dans la figure (I.10). Lorsque le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres, il le pousse, puis continue son parcours vers l'autre demi-cylindre, où il exerce également une poussée. L'effet est renforcé par la circulation d'air entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur. Ce système a été breveté en 1929 par Sigurd Savonius, originaire de Finlande (1884-1931).

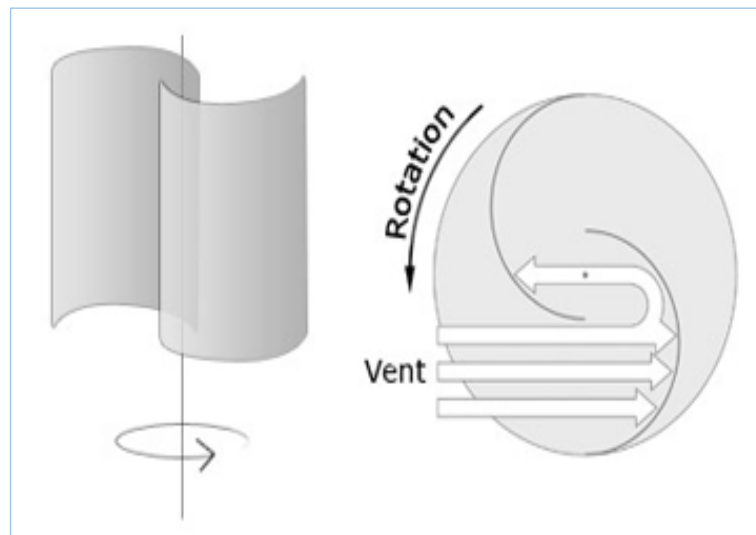


Figure I-10 : Éolienne de Savonius.

✚ **Éolienne de Darrieus** : Les éoliennes de type Darrieus sont caractérisées par une variation cyclique de leur incidence. La configuration la plus couramment utilisée est celle de l'éolienne de Darrieus, qui est une éolienne verticale capable de produire de l'électricité. Elle est composée d'un rotor, qui peut prendre différentes formes (hélicoïdale, en forme de H, cylindrique), comme illustré dans la figure (I.11). Ce rotor tourne autour d'une tige fixe appelée stator à ailettes. Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus ont été spécifiquement développées pour la production d'électricité dans des zones isolées. Elles sont généralement de faible puissance et sont conçues pour des utilisations permanentes. Elles peuvent être installées dans des zones où les vents sont très forts, atteignant parfois des vitesses supérieures à 220 km/h.

Ces éoliennes offrent donc une solution adaptée pour les régions éloignées où l'accès au réseau électrique traditionnel est limité. Leur conception robuste et leur capacité à résister à des conditions venteuses extrêmes en font un choix approprié pour ces environnements.

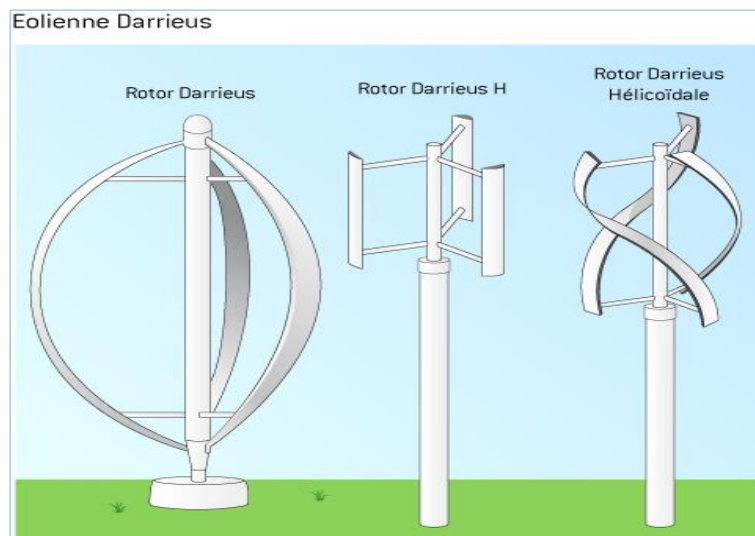


Figure I-10 : Les différents types d'Eolienne de Darrieus.

✚ **Eoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe de rotation horizontal sont conçues de manière à faire face directement au vent, tout comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elles sont généralement fixées au sommet d'une tour, ce qui leur permet de capter une quantité plus importante d'énergie

éolienne, comme illustré dans la figure (I.12). En raison de leur efficacité et de leur utilisation répandue, la plupart des éoliennes installées sont de ce type.



Figure I-11 : Eoliennes à axe.

I.4.5.8 Conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

L'éolienne est un système qui permet de convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Trois facteurs clés influencent cette conversion et déterminent à la fois l'énergie du vent disponible et l'énergie mécanique récupérée par le rotor de l'éolienne :

- la densité de l'air.
- la surface balayée par le rotor.
- la vitesse du vent [20].

I.4.5.9 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S et de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , (Figure I.13) s'écrit : $dE_c = \frac{1}{2} \rho S dx v_{vent}^2$

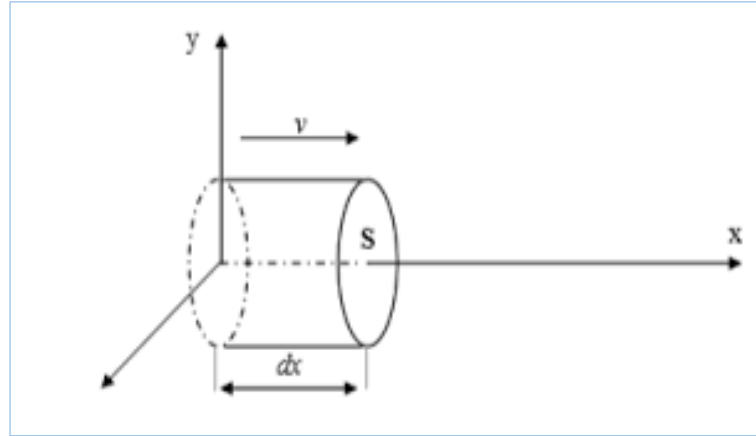


Figure I-12: Colonne d'air animée d'une vitesse.

La puissance P_{vent} extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. En supposant $dx = Vdt$ on déduit l'expression de P_{vent} [21] :

$$P_{vent} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S_0 v_{vent}^3 \quad (\text{I.1})$$

$$S = \pi * R^2$$

P_{vent} : Puissance extraite du volume d'air.

E_c : Énergie cinétique (en joules).

ρ : Masse volumique de l'air, 1,22 kg/m³ à la pression atmosphérique.

S : surface circulaire balayé par la turbine.

v_{vent} : vitesse instantanée du vent (en m/s).

R : Rayon de l'éolienne.

I.4.5.10 Loi de Betz

La loi de Betz, formulée par Albert Betz en 1929, établit qu'une éolienne ne peut jamais convertir en énergie mécanique plus de 59% ou $\frac{16}{27}$ de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Cette limite théorique est connue sous le nom de "limite de Betz" ou "limite de puissance maximale de Betz". Dans le système représenté dans la figure (I.14), qui présente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal, on observe les vitesses du vent en amont et en aval de l'aérogénérateur. La vitesse du vent en amont est représentée par v_{1vent} , tandis que la vitesse en aval v_{2vent} , est représentée par [22].

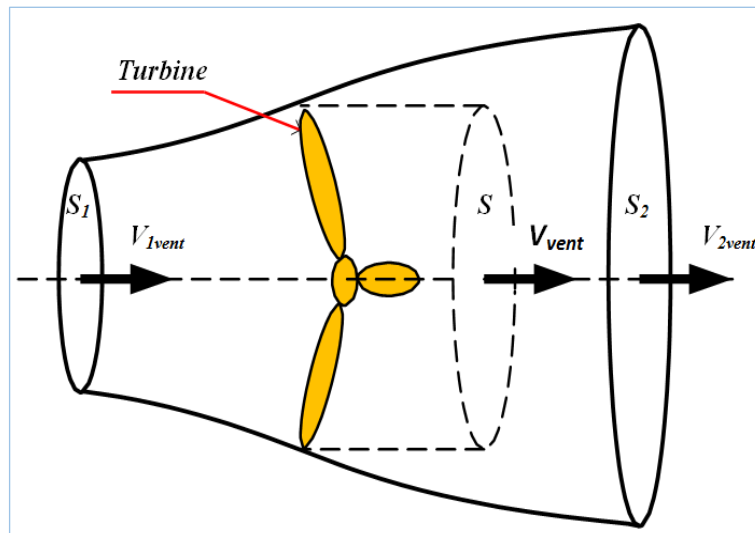


Figure I-13: Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$m_0 = \frac{\rho \cdot S (v_{1vent} + v_{2vent})}{2} \quad (\text{I.2})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval :

$$P_m = \frac{m_0 (v_{1vent}^2 - v_{2vent}^2)}{2} \quad (\text{I.3})$$

Soit en remplaçant m_0 par son expression dans (I.3) :

$$P_m = \frac{\rho \cdot S (v_{1vent} + v_{2vent}) (v_{1vent}^2 - v_{2vent}^2)}{4} \quad (\text{I.4})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface S est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant $v_{2vent} = 0$ dans l'expression (I.4)

$$P_{mt} = \frac{\rho \cdot S \cdot v_{1vent}^3}{2} \quad (\text{I.5})$$

I.4.5.11 La vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pale (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent [23].

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{v_{vent}} \quad (\text{I.6})$$

λ : La vitesse réduite. Ω_t : La vitesse de rotation.

I.4.5.12 Coefficient de puissance

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique récupérable de l'air passant sur une certaine surface ($S = \pi R^2$) où R est le rayon des pales ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse v_{vent} [m/s] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_{vent}^3 \quad (\text{I.7})$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée car l'air qui a travaillé dans les pales du rotor doit être évacué comme indiqué sur la figure (I.15). Puis on introduit le coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance aérodynamique :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} C_p \rho R^2 v_{vent}^3 \quad (\text{I.8})$$

Avec :

P_{aero} : Puissance aérodynamique (puissance fournie par l'éolienne).

C_p : Coefficient de puissance.

Ou : $\rho = 1,25 \text{ kg} / \text{m}^3$, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer. Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne (21)[21]. On peut le définir comme étant le rapport :

$$C_p = \frac{\text{puissance disponible sur l'arbre}}{\text{puissance disponible (récupérable)}}$$

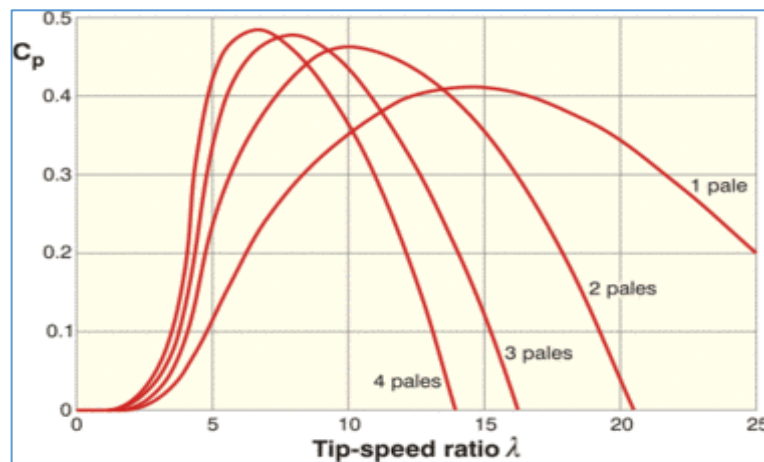


Figure I-14: Coefficient de puissance pour différents types des turbines éoliennes.

I.4.5.13 Coefficient de couple

Effectivement, le coefficient de couple (C_m) est étroitement lié au coefficient de puissance (C_p) dans le contexte des éoliennes. Le coefficient de couple est utile pour estimer les valeurs des couples à différents points de fonctionnement de l'éolienne, notamment à une vitesse de rotation (Ω_r) nulle. À cette vitesse de rotation, le coefficient de puissance (C_p) est nul, tandis que le coefficient de couple (C_m) peut être non nul [23]. L'expression du couple est la suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} = \frac{1}{2} C_p \frac{\rho \pi R^2 v^3}{\Omega_t} \quad (\text{I.9})$$

Avec :

C_{aero} : Couple aérodynamique

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{I.10})$$

Avec C_m : coefficient de couple.

Rendement énergétique d'une éolienne

Dans la figure ci-dessous, on remarque d'abord le meilleur rendement aérodynamique des éoliennes à axe horizontal et vertical de type Darius. De plus, leurs coefficients de puissance diminuent lentement avec l'augmentation de la vitesse. Les éoliennes "américaines" ont un grand nombre de pales car elles fonctionnent à de faibles vitesses de rotation. Ils génèrent des couples pneumatiques importants pour générer de l'énergie mécanique (applications de pompage).

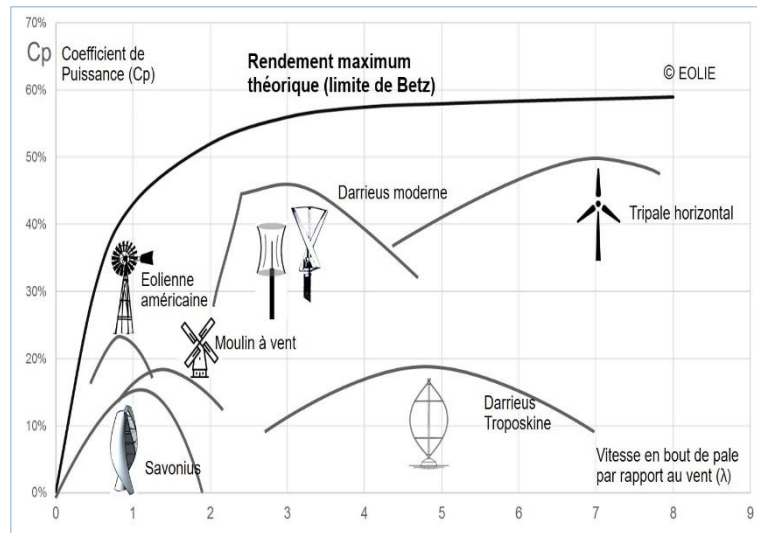


Figure I-15: Rendement énergétique pour différents types des éoliennes.

Comme montré dans la figure(I.16), Les éoliennes tri pales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent égale à 3m/s [24].

I.4.5.14 Types des éoliennes selon les types des générateurs utilisées

Les éoliennes peuvent être classées en fonction du type de générateur électrique utilisé pour convertir l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. On distingue principalement deux types de structures de systèmes éoliens raccordés au réseau électrique [25] :

- les systèmes éoliens à vitesse fixe.
- les systèmes éoliens à vitesse variable.

✚ Les systèmes éoliens à vitesse fixe :

Ces systèmes utilisent des générateurs électriques synchrones ou asynchrones à vitesse fixe pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. L'éolienne fonctionne à une vitesse de rotation constante, indépendamment de la vitesse du vent. Ce type de système est plus simple et moins coûteux à mettre en œuvre, mais il présente des limitations en termes d'efficacité énergétique, car l'éolienne ne peut pas ajuster sa vitesse de rotation pour optimiser la production d'électricité dans différentes conditions de vent.

✚ Les systèmes éoliens à vitesse variable :

Les structures à vitesse variable permettent d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne pour des vents faibles et moyens et augmente la capacité de production de la machine de 5 à 15%. Différentes structures sont proposées [26] :

- Machine asynchrone à double alimentation.
- Machine asynchrone à rotor bobine.
- Machine synchrone à inducteur bobine ou à aimant permanent.

I.5 Comparaison des énergies renouvelables

I.5.1 Production électrique

La figure (I.17) illustre que l'énergie éolienne est l'une des meilleures sources d'énergie pour la production d'électricité. L'énergie éolienne est obtenue en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en utilisant des générateurs électriques pour la transformer en énergie électrique [27].

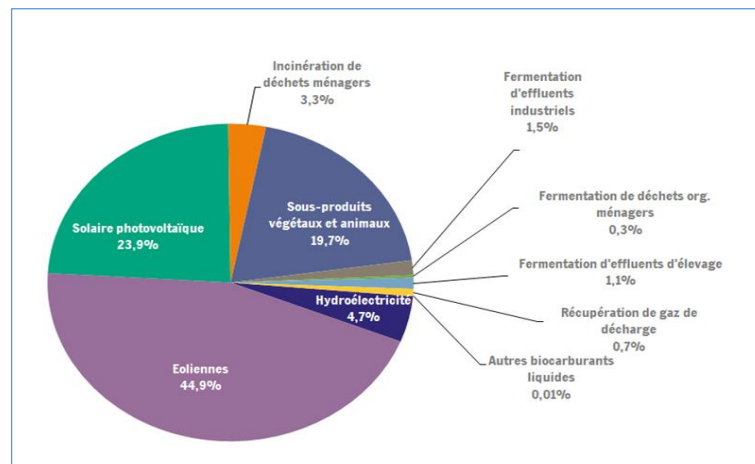


Figure I-16: Part d'énergie renouvelable dans la production d'électricité.

I.5.2 Les avantages et les inconvénients

Tableau I-2: Les avantages et les inconvénients des énergies renouvelable.

Les énergies renouvelables	Les applications	Les avantages	Les inconvénients
L'énergie hydraulique	<ul style="list-style-type: none"> -la production d'électricité à partir de la force de l'eau. -Les barrages hydroélectriques, les turbines à eau et les centrales 	<ul style="list-style-type: none"> -production d'énergie locale. -contrôle des inondations. -création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations 	<ul style="list-style-type: none"> -bloque les passes à poissons -modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température) -dégrade la qualité d'eau (accumulation de

	marémotrices sont quelques exemples d'applications de l'énergie hydraulique.	[28].	contaminants)
L'énergie biomasse	<p>-la production de chaleur et d'électricité dans des installations de combustion de biomasse.</p> <p>-Elle est également utilisée comme source de carburant dans les transports et pour la production de biogaz dans les installations de digestion anaérobie.</p>	<p>-La valorisation énergétique du bois, des résidus de coupe, des sous-produits de l'agriculture, des sous-produits de l'agro-industrie, etc.</p> <p>-Le coût d'investissement compétitif et peu coûteux.</p> <p>- Une énergie moins polluante que les énergies fossiles.</p> <p>- La participation au traitement et à la destruction des déchets organiques par la valorisation énergétique.</p>	<p>-Impact environnemental.</p> <p>- Utilisation des terres et concurrence alimentaire. Approvisionnement en biomasse.</p> <p>-Émissions de polluants.</p> <p>-Coûts.</p>

<p>L'énergie géothermie</p>	<ul style="list-style-type: none"> -la production d'électricité. -le chauffage et le refroidissement des bâtiments. -Les pompes à chaleur géothermiques utilisent la chaleur du sol pour chauffer ou refroidir les espaces intérieurs. 	<ul style="list-style-type: none"> -Durée de vie : supérieure à 30 ans. - Fonctionnement double : en Hiver, avec le chauffage. en Eté, avec le refroidissement. -Energie propre : aucune pollution n'est dégagée. Pas d'émission de CO2 [29]. 	<ul style="list-style-type: none"> -Prix d'installation relativement élevé. -Géothermie verticale : il faut se situer sur une zone propice à l'installation de tuyaux Pouvant descendre loin en profondeur. -N'est utilisable en domestique que pour le chauffage, l'électricité pouvant être Développée en centrale Géothermique
<p>L'énergie solaire</p>	<ul style="list-style-type: none"> -la production d'électricité. -Alimentation des systèmes de pompage et d'irrigation. -Alimentation d'antenne radio, télévision, matériel télécoms, appareils électroménagers. -Chauffe-eau 	<ul style="list-style-type: none"> -Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité. -Absence de bruit, de pollution et d'émissions. -Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans). -Rentabilité assurée 	<ul style="list-style-type: none"> - Le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé. -Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable. -Le faible rendement de conversion de module. -Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le

	<p>solaires.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Projets de comptage net (pay-as-you-go). -Pompage solaire de l'eau. -Éclairage public solaire. -Électrification rurale. 	<p>pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour) [30].</p>	<p>cout du</p> <p>Système photovoltaïque augmente.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Pollution à la fabrication.
<p>L'énergie éolienne</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Production d'électricité. -Pompage d'eau et d'air. 	<ul style="list-style-type: none"> -non polluante. - inépuisable (énergie du vent). - peut être rentable dans les régions éloignées et ventée (sites isolés). -peut-être complémentaire des filières traditionnelles. -La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison 	<ul style="list-style-type: none"> -aspect aléatoire (sujette aux variations des vitesses de vent). - bruit des pales. -impact visuel. -interférences électromagnétiques. -Les parcs éoliens besoin des grandes surfaces. -Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques [33].

		étant celle où la demande d'électricité est la plus forte [31][32].	
--	--	---	--

I.6 Systèmes hybrides

La figure (I.18) illustre l'utilisation de systèmes d'énergie hybrides pour résoudre le problème de la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables. Un système d'énergie hybride est un système qui combine deux ou plusieurs technologies de génération d'énergie, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne, l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, etc. Les sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire et l'éolien, peuvent présenter des variations dans leur production d'électricité en raison de la nature intermittente des conditions météorologiques. Cependant, en couplant ces sources avec d'autres sources complémentaires, il est possible d'obtenir une production électrique plus continue et fiable [34].

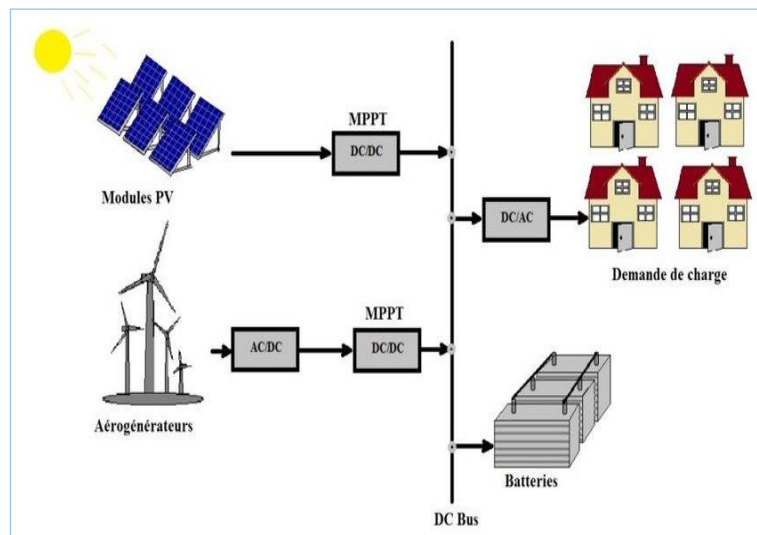
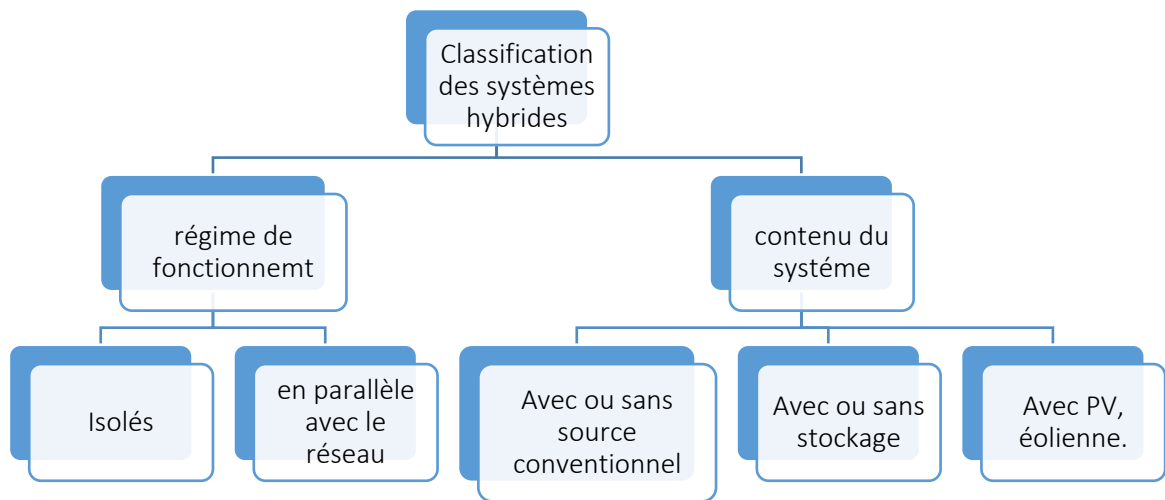


Figure I-17: système hybride à énergies renouvelables.

I.6.2 Classification des systèmes hybrides

Effectivement, il existe plusieurs classifications des systèmes hybrides en fonction du critère choisi. Voici quelques classifications courantes :



Il convient de noter que ces classifications ne sont pas exhaustives et qu'il existe d'autres critères possibles pour classer les systèmes hybrides. Chaque classification peut être utilisée en fonction des besoins spécifiques d'un projet ou d'une application donnée [35].

I.6.3 Combinaisons des systèmes hybrides à énergie renouvelable

En effet, les systèmes hybrides à énergies renouvelables peuvent adopter différentes structures ou configurations en fonction des technologies d'énergies renouvelables utilisées et des exigences spécifiques du système. L'électronique de puissance joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement et la gestion des différentes sources d'énergie. Les systèmes de stockage comme les batteries et le stockage d'hydrogène (piles à combustible) sont habituellement utilisés. Un système hybride à énergies renouvelables combine deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme les panneaux photovoltaïques, les éoliennes, les petites turbines hydroélectriques, etc. En outre, il comprend des équipements d'électronique de puissance et des systèmes de stockage. Voici trois architectures couramment utilisées dans les systèmes hybrides à énergies renouvelables [36]:

- Architecture à bus CC.
- Architecture à bus AC.
- Architecture mixte à bus CC-CA.

I.6.4 Avantages et inconvénients d'un système hybride

Les avantages :

- ❖ Assurer la continuité énergétique.
- ❖ Non dépendant d'une seule source d'énergie.
- ❖ Flexible, extensible et capable de satisfaire des charges évolutives.
- ❖ Exploitation simple, travaux de maintenance et de révision réduits [37].

Les inconvénients :

- ❖ Comparé aux générateurs diesel, le coût en capital est élevé.
- ❖ Plus complexe qu'un système électrique isolé, nécessite un stockage par batterie et un conditionnement d'alimentation.

I.7 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons abordé les différents types de systèmes de génération d'énergie électrique en Algérie et dans le monde, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous avons examiné en détail l'énergie éolienne, en expliquant son fonctionnement, ses composants et ses avantages en termes de production d'électricité renouvelable. Nous avons également discuté des systèmes hybrides, qui combinent plusieurs sources d'énergie renouvelable pour assurer une production continue et stable. En résumé, ce premier chapitre nous a permis d'explorer les différentes options de génération d'énergie électrique, en mettant l'accent sur l'énergie éolienne et les systèmes hybrides. Nous avons examiné leurs avantages et inconvénients respectifs, ce qui nous permet de mieux comprendre les défis et les opportunités associés à ces technologies.

Chapitre II :

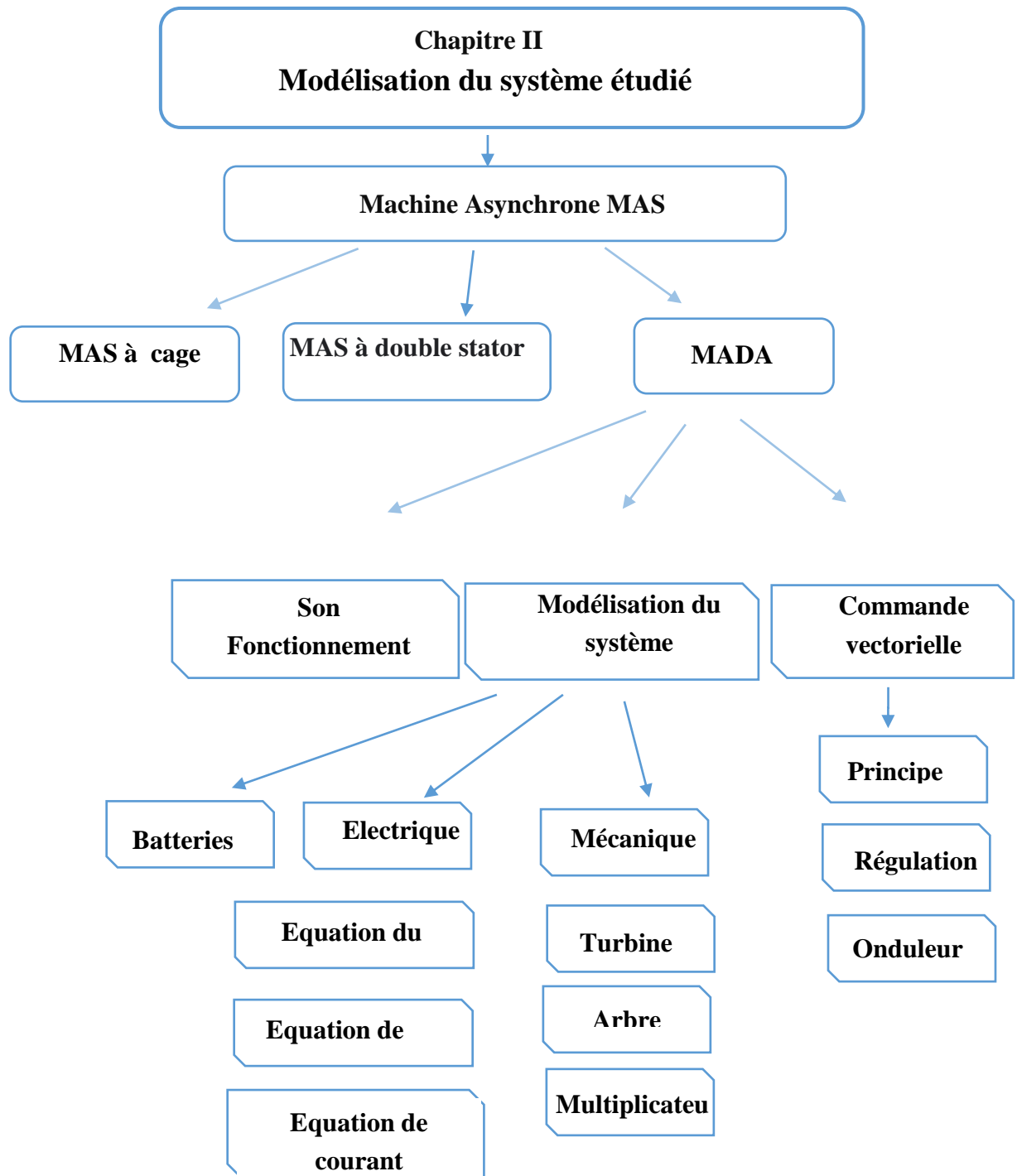
Modélisation du système étudié

II.1 Introduction

La modélisation est une étape indispensable dans la conception de systèmes de commande performants. Elle nous permet de simuler la machine et de déduire les lois de commande en manipulant les équations qui décrivent son comportement.

Le modèle mathématique d'une machine électrique est une représentation idéale de la machine, qui nous permet de reproduire ce que nous pouvons observer expérimentalement. Il offre une aide précieuse dans la résolution des problèmes techniques. [38]

Dans ce chapitre on a présenté une présentation sur les machine asynchrone, ces constituants, ces types, son fonctionnement. Pour la modélisation on prend compte sur la modélisation de la partie mécanique, électrique et la modélisation de la deuxième alimentation (batteries). A la fin en a parlé sur les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation.



II.2 La machine asynchrone (MAS)

Les « machines asynchrones » sont des convertisseurs électromécaniques qui se distinguent par la vitesse de rotation du rotor qui est inférieure à la vitesse synchrone, définie par :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

Ω_s : vitesse synchrone.

ω_s : est la pulsation des courant alternatif ;

p : est le nombre de paires de pôles ;

Lorsque les courants rotoriques de ces machines sont induits par les courants circulant dans les bobinages statoriques, elles sont souvent appelées « machines à induction ». Elles sont réputées pour leur robustesse, leur rusticité et leur faible coût. Autrefois limitées à des utilisations simples et peu performantes lorsqu'elles étaient couplées à des réseaux à fréquence et tension constants, les machines asynchrones se sont désormais généralisées dans tous les domaines de la motorisation industrielle. Elles peuvent également être commandées avec de bonnes performances dynamiques grâce à des applications de la commande numérique [39].

II.3 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, communément appelée moteur à induction, est composée d'un stator et d'un rotor, qui sont tous deux constitués de tôles d'acier au silicium et dotés d'encoches dans lesquelles les enroulements sont placés. Le stator est immobilisé et abrite les enroulements qui sont connectés à la source électrique. En revanche, le rotor est monté sur un axe de rotation et peut être de deux types selon la configuration de ses enroulements : un rotor bobiné avec des enroulements accessibles de l'extérieur, ou un rotor à cage d'écureuil, dont les enroulements sont fermés sur eux-mêmes en permanence. Cependant, dans ce travail, nous supposons que sa structure est équivalente à celle d'un rotor bobiné dont les enroulements seraient court-circuités. Notre étude se concentrera donc sur la machine asynchrone en tant que telle [40].

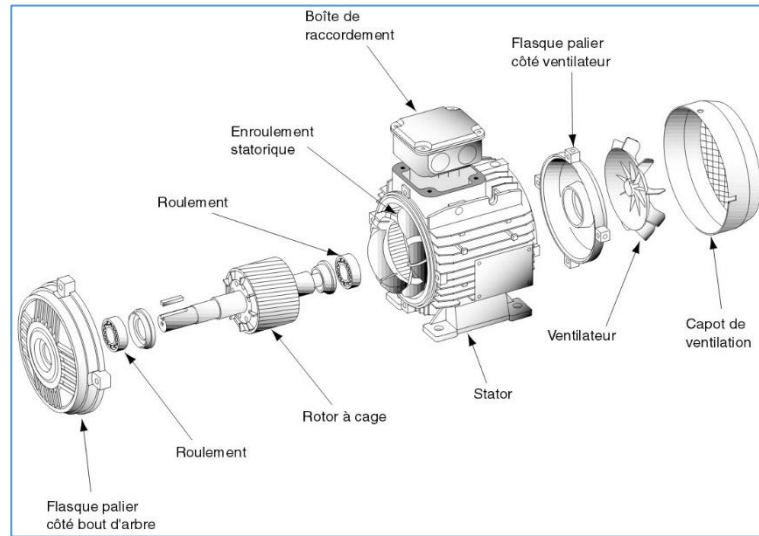


Figure II-1: les constitutions d'une machine asynchrone [41].

II.4 Types des machines asynchrones :

Il existe plusieurs types des machines asynchrone notamment que :

II.4.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil

Actuellement, une grande partie des éoliennes installées dans le monde sont équipées de génératrices asynchrones à cage d'écureuil. En effet, la machine asynchrone présente plusieurs avantages pour les applications éoliennes. En plus de sa robustesse et de son faible coût, elle ne nécessite pas de système de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues, ce qui réduit l'entretien et augmente la fiabilité. De plus, la machine asynchrone peut fonctionner avec un large éventail de vitesses de rotation, ce qui est un avantage dans les éoliennes, où la vitesse de rotation de l'éolienne peut varier considérablement en fonction de la force du vent.

Enfin, la machine asynchrone peut être contrôlée électroniquement pour améliorer son rendement, sa réponse dynamique et son comportement en cas de perturbation.

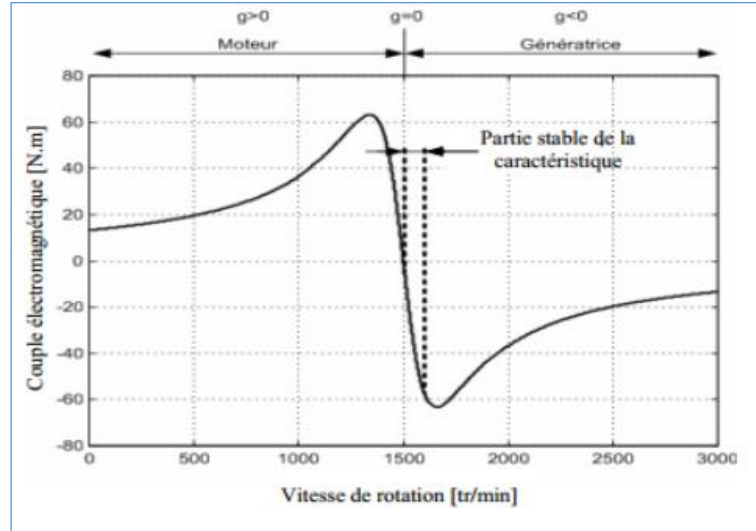


Figure II-2: caractéristique couple/vitesse d'une MAS à deux paires de pole [42].

Afin d'assurer un fonctionnement stable du dispositif, il est impératif que la génératrice maintienne une vitesse de rotation qui soit proche de la synchronisation. (Point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, Il est essentiel que la génératrice maintienne une vitesse de rotation comprise entre 1500 et 1600 tours /min. afin de garantir un fonctionnement stable du dispositif [5]. Il convient de noter que lorsqu'une génératrice fonctionne en tant que générateur (convertissant de l'énergie mécanique en énergie électrique), le glissement est généralement négligé car la génératrice fonctionne alors près de la vitesse de synchronisme et le glissement est très faible (proche de zéro).

II.4.2 Machine asynchrone à double stator

La machine en question présente tous les avantages de la cascade de MADA, sans toutefois présenter son principal inconvénient, à savoir le poids et l'encombrement. Cette machine est composée d'un unique rotor et de deux stators. En réalité, il s'agit d'un seul stator physique qui contient deux enroulements triphasés. Par conséquent, on utilise souvent l'expression "deux stators" de manière incorrecte pour la désigner.

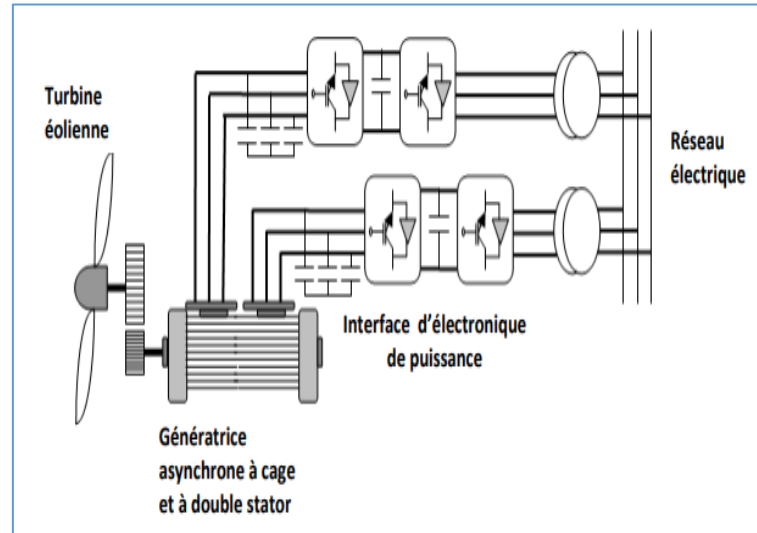


Figure II-3: machine asynchrone à double stator [43].

Afin d'améliorer l'efficacité du dispositif mentionné précédemment, certains fabricants ont recours à un système utilisant une machine asynchrone à double stator, comme illustré sur la figure. À une vitesse faible correspond un grand nombre de paires de pôles, tandis qu'à une vitesse élevée, le stator est de forte puissance et correspond à un faible nombre de paires de pôles. Pour les vitesses de vent élevées et la connexion au réseau, des commutateurs sont utilisés.

II.4.3 La machine asynchrone à double alimentation

II.4.3 .1 La double alimentation

La double alimentation concerne les machines à courant alternatif qui possèdent des enroulements statoriques et rotoriques biphasés ou triphasés. Dans ce contexte, le moteur asynchrone à rotor bobiné est couramment utilisé.

Dans les moteurs à double alimentation, l'alimentation électrique est appliquée (recueillie) à la fois aux enroulements du stator et du rotor. Les enroulements statoriques sont directement alimentés par le réseau électrique, tandis que ceux du rotor sont alimentés via un régulateur de fréquence.

Une des solutions permettant d'obtenir des vitesses variables en associant un convertisseur statique et une machine électrique est la machine asynchrone double alimentée, également appelée machine à induction double alimentée (DFIM : Doubly Fed Induction Machine en anglais). Dans ce système, le stator de la machine est connecté au réseau électrique à une fréquence fixe (par exemple, 50 Hz), tandis que le rotor est alimenté par le biais d'un convertisseur de fréquence. Cette configuration présente de nombreux avantages et constitue une solution intéressante [44].

II.4.3.1 Construction d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation :

Le stator de la MADA est constitué de tôles magnétiques empilées avec des encoches dans lesquelles les enroulements sont insérés. Ce qui rend cette machine originale, c'est que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais plutôt composé de trois bobinages connectés en étoile, dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices. Lorsque la machine tourne, des balais frottent sur les bagues conductrices. Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur. Le stator de la MADA est directement connecté au réseau, tandis que le rotor est connecté à un convertisseur. Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé semblable à celui du stator connecté en étoile, dont l'extrémité libre de chaque enroulement est reliée à une bague, permettant ainsi une connexion externe des bobinages au rotor [45].

II.4.3.2 Classification :

Les machines à double alimentation asynchrones les plus utilisées en industrie peuvent être classées selon la conception du rotor comme suivant :

a) Machine à double alimentation simple :

La machine à double alimentation simple (MADA.S) est une machine asynchrone à rotor bobiné équipée d'un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine).

Comme illustré sur la figure (II.4), le stator est alimenté directement par le réseau, tandis que le rotor est alimenté par un convertisseur alternatif-alternatif, permettant ainsi de contrôler le glissement de la machine. Il est à noter que le convertisseur indiqué dans la figure peut être

composé d'un redresseur et d'un onduleur (conversion indirecte) ou bien peut être un cyclo-convertisseur (conversion directe) [46]

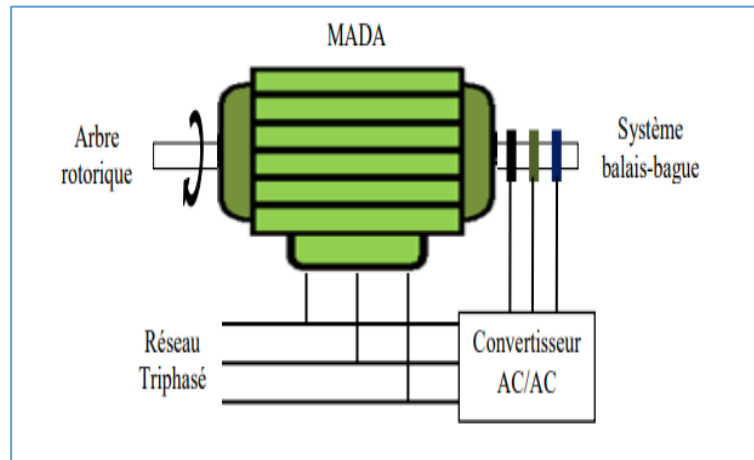


Figure II-4: Schéma de principe de la machine à double alimentation simple [47].

b) Machine à double alimentation en cascade :

La structure de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en cascade est définie par deux machines asynchrones dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement. Les enroulements statoriques sont reliés à deux sources de tension triphasées. La figure (II.5) ci-dessous représente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné, permettant de créer un système à double alimentation. Les enroulements statoriques de ces machines sont reliés à deux sources de tension triphasées [48].

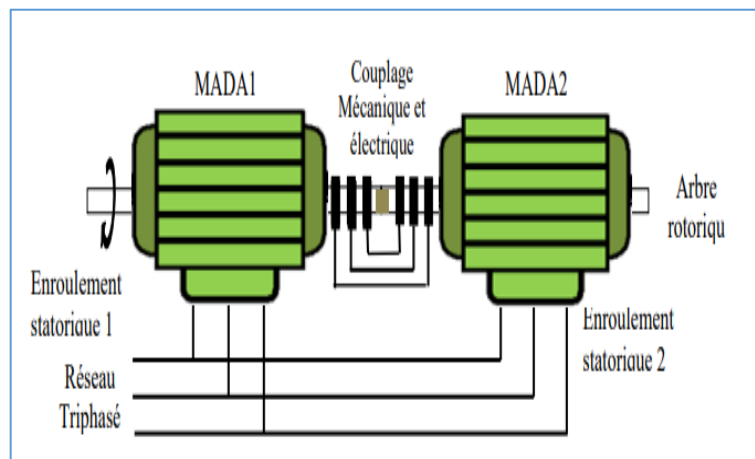


Figure II-5: Schéma de principe de la MADA en cascade [48].

c) Machine à double alimentation cascade à un repère :

La machine asynchrone à double alimentation en cascade à un repère est constituée de deux machines asynchrones à cage, connectées mécaniquement entre elles (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine en anglais). Cette configuration permet d'obtenir un système à double alimentation côté stator, tout en maintenant une seule alimentation côté rotor. Cela permet de réguler la vitesse et la puissance de la machine, ainsi que d'assurer un fonctionnement stable et efficace. La figure (II.6) représente une configuration, de sorte que le stator de l'une ou l'autre des machines soit connecté directement au secteur tandis que l'autre y est connectée via un adaptateur AC-AC l'une des deux est connectée directement au réseau tandis que l'autre est connectée à ce réseau via le convertisseur AC-AC l'une des machines est connectée directement à le réseau tandis que l'autre est connecté à ce réseau via un convertisseur AC-AC[48].

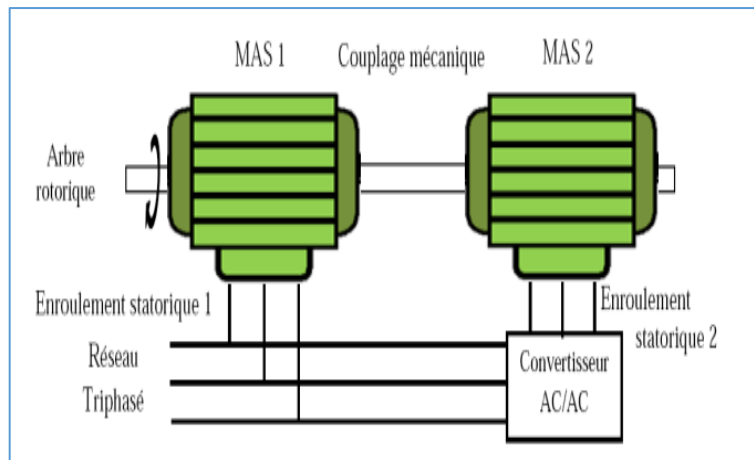


Figure II-6: Schéma de principe de MADA en cascade a un repère [48].

d) Machine à double alimentation sans balais (ou Brushless) :

L'idée de la machine à double alimentation sans balais BDFIM (Brushless Doubly Fed Induction Machine) développé pour la première fois par Steinmetz à la fin du 19ème siècle. La figure (II.7) illustre le schéma de montage d'un système dans lequel deux machines à rotor bobiné sont alignées sur un même axe. Les enroulements statiques des deux machines sont connectés au réseau électrique, tandis que les enroulements rotatifs sont interconnectés, ce qui élimine l'utilisation de bagues. En conséquence, la puissance de glissement générée par la première machine est utilisée pour exciter la deuxième machine. Ce concept, considéré comme

une solution efficace pour les applications à grande puissance, a été longtemps envisagé par les concepteurs. [48]

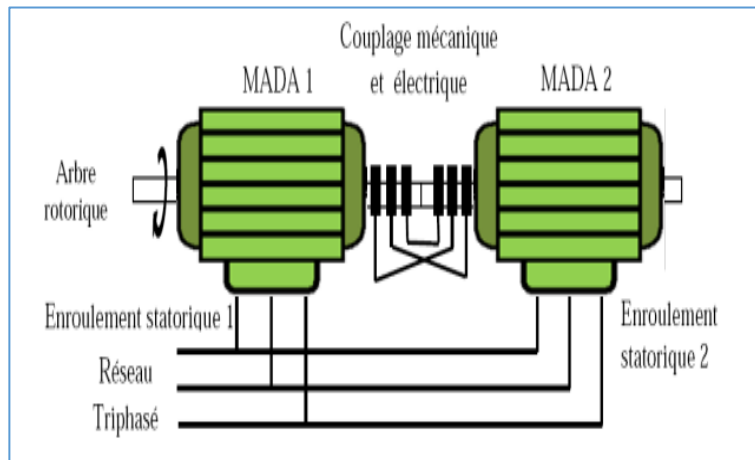


Figure II-7: Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balais [48]

II.4.4 Fonctionnement de la MADA

En général, la MADA (Machine Asynchrone à Double Alimentation) peut fonctionner en tant que moteur et en tant que générateur. Toutefois, contrairement aux autres types de machines, la vitesse de rotation ne détermine plus le mode de fonctionnement moteur ou générateur de la MADA. En effet, contrairement à une machine asynchrone à cage, qui doit tourner à une vitesse inférieure à la vitesse de synchronisme pour fonctionner en mode moteur, et à une vitesse supérieure pour fonctionner en mode générateur, la MADA permet de fonctionner en hyper-synchronisme (vitesse de rotation du rotor inférieure à la vitesse de synchronisme) ou en hypo-synchronisme (vitesse de rotation du rotor supérieure à la vitesse de synchronisme), que ce soit en mode moteur ou en mode générateur. Cela est possible grâce à la commande des tensions rotoriques, qui permet de contrôler le champ magnétique à l'intérieur de la machine [49]. Dans notre travail, nous étudierons la machine asynchrone à double alimentation.

Lorsque l'enroulement statorique de la machine à double alimentation est directement connecté au réseau et que l'enroulement rotorique triphasé est relié à un convertisseur de puissance bidirectionnel via un système balais-bagues, et que les nombres de pôles du stator et du rotor sont identiques, la vitesse angulaire de rotation du rotor sera déterminée par [50] :

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (\text{I.12})$$

Avec **N** : vitesse de rotation (tr/min)

II.4.5 Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

- ✚ L'énergie électrique est fournie par le réseau au stator de la machine.
- ✚ La puissance résultant du glissement est renvoyée vers le réseau.
- ✚ La vitesse de rotation de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, ce qui signifie que le glissement (représenté par $g > 0$) est présent.
- ✚ Dans le cas d'une machine asynchrone à cage, cela est possible, mais la puissance résultant du glissement est dissipée sous forme de pertes Joule dans le rotor.

II.4.5 Fonctionnement en Mode Moteur Hyper-Synchrone

- ✚ À la fois le rotor et le stator de la machine reçoivent de l'énergie électrique fournie par le réseau.
- ✚ Dans ce cas, la vitesse de rotation de la machine est supérieure à la vitesse de synchronisme, ce qui implique un glissement négatif (représenté par $g < 0$) [51].

II.4.6 Fonctionnement en Mode Générateur Hypo-Synchrone

- ✚ La puissance est fournie par le stator de la machine au réseau électrique. Une partie de cette puissance, qui transite par le stator, est réabsorbée par le rotor.
- ✚ Dans ce mode de fonctionnement, la vitesse de rotation de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme.
- ✚ Cependant, il est important de noter que la machine asynchrone à cage ne peut pas fonctionner de cette manière.

II.4.7 Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone

- ✚ La puissance est fournie par le stator de la machine au réseau électrique.
- ✚ Dans ce mode de fonctionnement, la puissance de glissement, qui est générée, est récupérée à travers le rotor et réinjectée dans le réseau.

- ✚ La vitesse de rotation de la machine est supérieure à la vitesse de synchronisme.
- ✚ Il est important de noter que la machine asynchrone à cage peut fonctionner dans ces mêmes conditions [52].

La figure ci-dessous explique tout ce qui précède ;

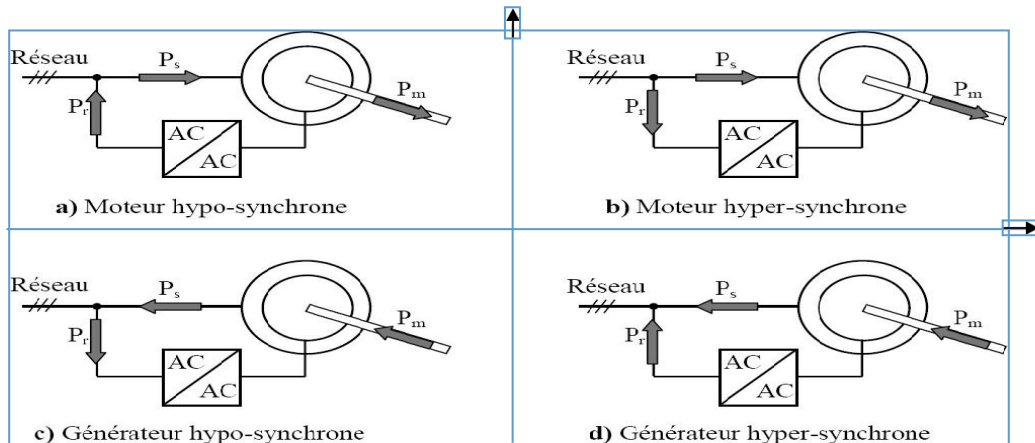


Figure II-8: Modes opérationnels caractéristiques de la MADA [53].

II.5. Modélisation du système

II.5.1 Modélisation de la partie mécanique

La modélisation de la partie mécanique comprend la modélisation de la turbine, multiplicateur, l'arbre, la figure ci-dessous représente les différentes parties de la conversion éolienne ;

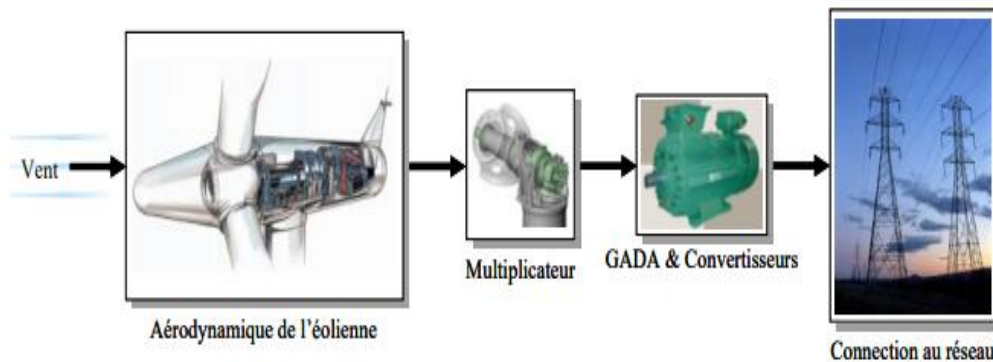


Figure II-9: Le schéma global des éléments de base d'une éolienne connectée au réseau [54].

II.5.1.1 Modélisation de la turbine

D'après le théorème de Bernoulli, on peut exprimer la puissance due au vent :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S v_{vent}^3 \quad (\text{II.13})$$

$$S = \pi * R^2. \quad (\text{II.14})$$

La quantité de puissance produite par une éolienne, appelée puissance aérodynamique P_{aero} est directement liée au coefficient de puissance C_p . Elle est donnée par :

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot P_{vent} \quad (\text{II.15})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. Une approximation par interpolation de l'expression de C_p pour une éolienne réelle d'un angle de calage $\beta = 2^\circ$, donne :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18}\right) \quad (\text{II.16})$$

$C_p(\lambda, \beta)$: Est le coefficient de puissance, également connu sous le nom de rendement aérodynamique de la turbine, est une mesure spécifique à chaque éolienne et dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β .

Dans le cadre de notre étude, le coefficient de puissance de la turbine est déterminé par l'expression suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0,5 - 0,0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)}\right] - 0,00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.17})$$

Il est possible de représenter graphiquement la variation du coefficient de performance C_p en fonction de la vitesse de rotation de la turbine, comme illustré dans la figure(II.10) La courbe obtenue montre un pic en correspondance d'une valeur maximale de C_p égale à 0,5. Cette valeur est atteinte lorsque les paramètres de la turbine sont optimisés avec $\lambda = 9$ et $\beta = 2$.

En d'autres termes, si la turbine est conçue pour fonctionner avec ces valeurs de λ et β , elle sera capable de produire une puissance mécanique optimale tout en fonctionnant avec un rendement maximal. Il est important de souligner que la valeur de C_p est fortement influencée par la vitesse de rotation de la turbine. Par conséquent, pour obtenir les performances optimales de la turbine, il est crucial de concevoir la turbine pour fonctionner à une vitesse de rotation spécifique correspondant au point de maximum de C_p .

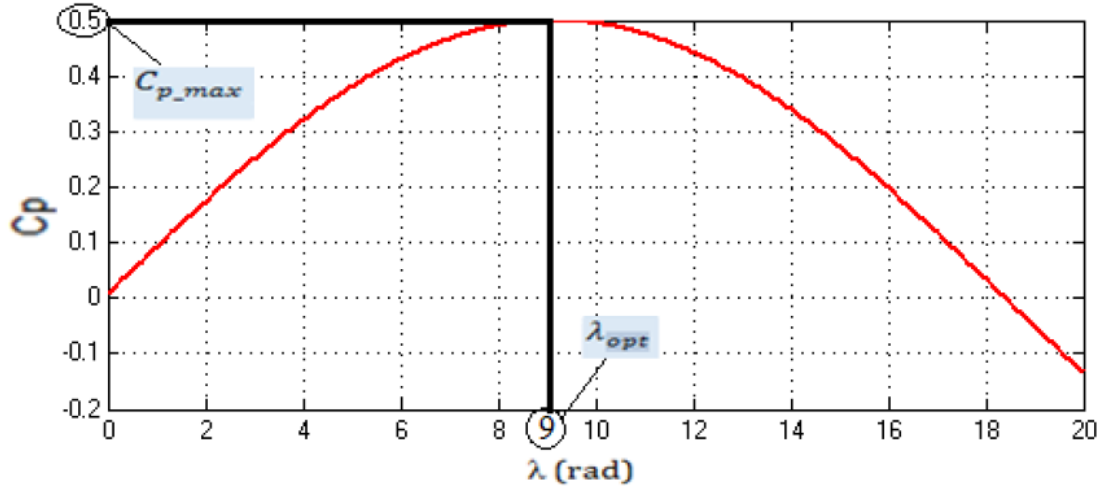


Figure II-10: Allure du coefficient de puissance pour une éolienne réelle [55].

Le couple aérodynamique C_{aero} est le rapport de la puissance aérodynamique à la vitesse de rotation de la turbine Ω_t [55] :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_t} \quad (\text{II.18})$$

II.5.1.2 Modélisation du multiplicateur

La figure (II.11) représente le multiplicateur de gain G qui est utilisé pour adapter les grandeurs mécaniques de la turbine et de la génératrice. Ce multiplicateur permet d'augmenter la vitesse de rotation de la génératrice par rapport à celle de la turbine, ce qui est souvent nécessaire pour optimiser la production d'énergie électrique.

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II.19})$$

Et la vitesse :

$$\Omega_{méc} = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$C_{méc}, \Omega_{méc}$: couple et la vitesse d'entraînement de la GADA respectivement (Couple issu du multiplicateur). ;

G : Gain de multiplicateur de vitesse.

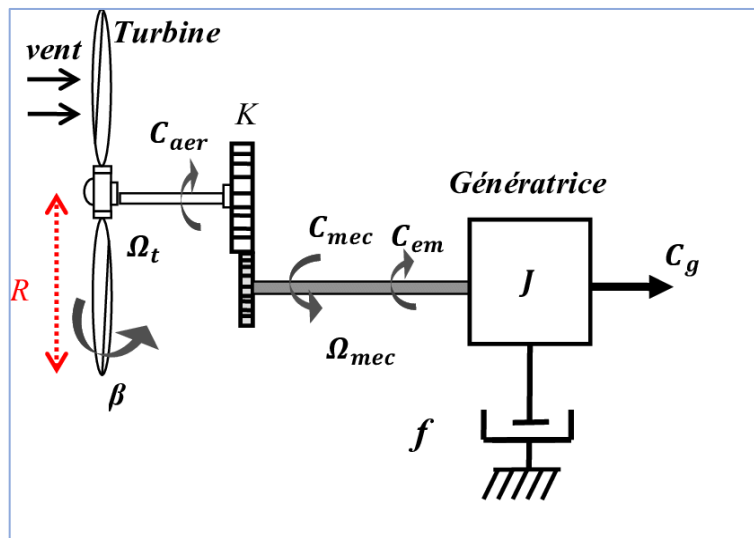


Figure II-11: Modèle mécanique simplifié du multiplicateur [56].

II.5.1.3 Modélisation de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique de la turbine à l'arbre de la machine asynchrone se résume donc comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{aéro} - f \Omega_{méc} \quad (\text{II.21})$$

$$C_{aéro} = C_{méc} - C_{em} \quad (\text{II.22})$$

En fonctionnement générateur le couple électromagnétique a un signe négatif [57].

Avec :

f : Le coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad) ;

J : L'inertie totale (Kg.m²).

Le modèle de la turbine éolienne représentée dans la figure suivante peut être déduit de la manière suivante :

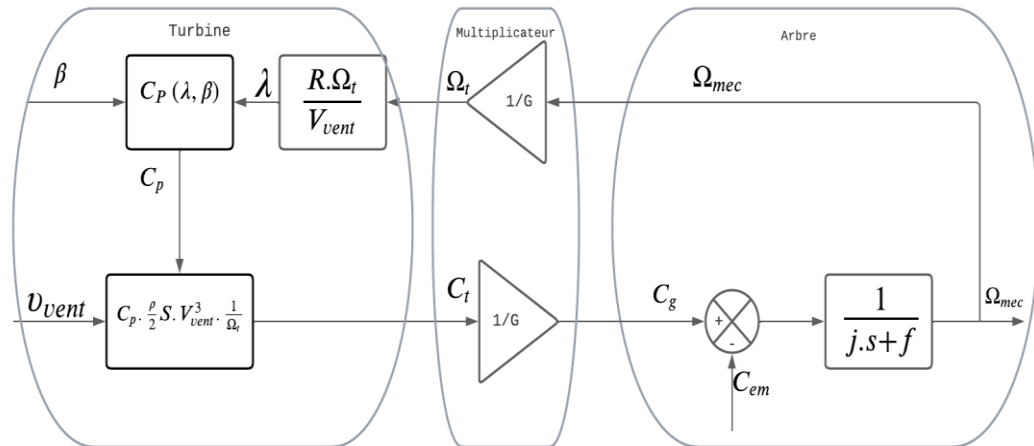


Figure II-12: schéma bloc introduit la conversion de la chaîne éolienne.

II.5.2 Modélisation de la partie électrique

La modélisation de la partie électrique sera consacrée sur la modélisation de la génératrice asynchrone à double alimentation ainsi que les équations de tension, flux ...etc.

II.5.2.1 Hypothèses simplificatrices

Pour faciliter notre étude de la machine asynchrone idéalisée, on adopte les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ la machine est symétrique et l'entrefer constant.
- ✓ L'effet des encoches négligé.
- ✓ Trois bobines statorique (s_a, s_b, s_c) décalées entre elles par un angle de $(2\pi/3)$.
- ✓ L'influence de l'effet de peau n'est pas prise en compte.

- ✓ Trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, (r_a, r_b, r_c).
- ✓ Nous négligeons la saturation du circuit magnétique ainsi que son hystérésis, ce qui permet de définir des inductances constantes.
- ✓ On néglige les pertes fer, les courants de Foucault, et l'échauffement.
- ✓ On suppose que le bobinage soit reparti de manière à donner une force magnétomotrice sinusoïdale.
- ✓ On considère que la perméabilité constante.

II.5.2.2 Modèle de la MADA dans le repère triphasé

La machine asynchrone à double alimentation est composée principalement de deux parties: le stator et le rotor. Le rotor est situé à l'intérieur de la cavité de la machine et est séparé du stator par un entrefer. Le stator et le rotor sont tous deux équipés de circuits électriques composés de trois enroulements identiques, couplés en étoile ou en triangle. La différence réside dans le fait que les enroulements du rotor sont reliés à trois ou quatre bagues sur lesquelles glissent des balais. La machine asynchrone à double alimentation est particulièrement utile pour les applications nécessitant un contrôle de vitesse précis et une haute efficacité énergétique. C'est pourquoi elle est couramment utilisée dans les industries telles que l'éolien, l'hydroélectricité, l'automobile et les systèmes ferroviaires. Les trois enroulements statorique sont présentés dans le schéma sur leurs axes magnétiques respectifs s_a, s_b, s_c , de cette manière les trois enroulements rotorique sont présentés sur leurs axes magnétiques respectifs r_a, r_b, r_c . La description schématique de cette machine dans un repère triphasé est donnée par la figure (II.13) :

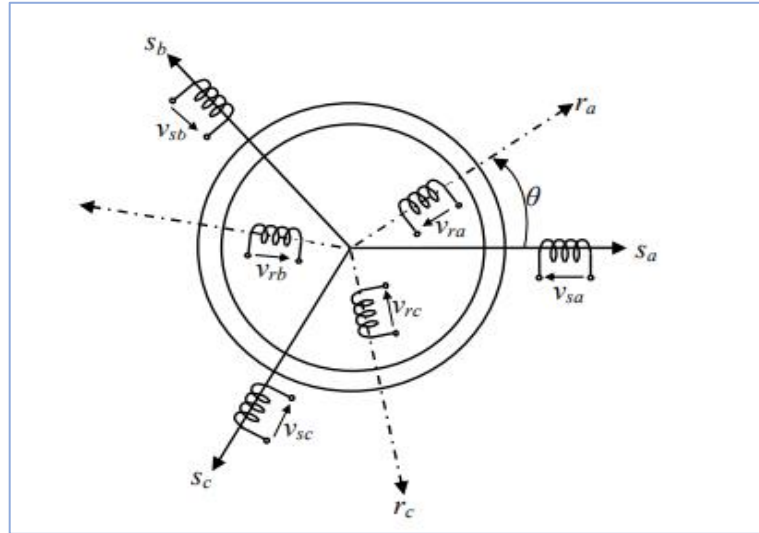


Figure II-13: représentation de la MADA dans les repères triphasés [58].

Les flux statorique et rotorique, sont donnés par :

Au stator :

$$[\psi_s] = [L_s][I_s] + [L_m][I_r] \quad (\text{II.23})$$

Au rotor :

$$[\psi_r] = [L_r][I_r] + [L_m][I_s] \quad (\text{II.24})$$

Où :

$$[L_s] = \begin{pmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{pmatrix} ; [L_r] = \begin{pmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{pmatrix}$$

$$[L_m] = [M_{rs}]^T = [M_{sr}] = M \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{pmatrix}$$

Avec :

$[\psi_s] = [\psi_{sa}, \psi_{sb}, \psi_{sc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c du stator ;

$[\psi_r] = [\psi_{ra}, \psi_{rb}, \psi_{rc}]^T$: Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c du rotor ;

$[I_s] = [I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}]^T$: Vecteurs des courants instantanés des phases a, b et c du stator ;

$[I_r] = [I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}]^T$: Vecteurs des courants instantanés des phases a, et c du rotor ;

l_s Et l_r : Les inductances propres du stator et rotor ;

m_s Et m_r : Les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la MADA, respectivement ;

M : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique ;

θ : L'angle électrique entre une phase statorique et une autre rotorique ;

D'après les équations (II.12) et (II.13) ; on peut écrire Les équations des tensions statoriques et rotoriques (Loi de Faraday) (18)[18]:

Au stator :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\psi_s] \quad (\text{II.25})$$

Au rotor :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\psi_r] \quad (\text{II.26})$$

Où :

$$[R_s] = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \quad ; \quad [R_r] = \begin{pmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{pmatrix}$$

Avec :

R_s Et R_r : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement.

$[V_s]$; $[V_r]$: Tension statorique et tension rotorique.

II.5.2.3 Choix de repère de référentiel de Park

Le choix de la référence de Park repose avant tout sur l'objectif de modélisation et la compatibilité de la machine en cours de réalisation. Il existe trois références de Park disponibles, à savoir :

🚦 Le repère fixe au stator connu par référentiel stationnaire où $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$. Ce système de coordonnées a été conçu pour adapter les grandeurs instantanées.

🚦 Le repère fixe au rotor connu par référentiel tournant où $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$ ce repère de référence a été conçu pour adapter les cas dans les régimes transitoires où la vitesse de rotation est considérée constante.

🚦 Le repère fixe aux champs tournant connu par référentiel tournant à la vitesse de pulsation synchrone, $\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt}$. ce repère de référence a été conçu adapté pour l'utilité dans le domaine des commandes des machines asynchrones [59]

II.5.2.4 Passage d'un système triphasé au système biphasé

Cette conversion maintient le calcul des grandeurs de puissance active et réactive.

a) Transformation de Clark-Concordia ($\alpha\beta 0$ transformation)

$$T_{abc \rightarrow \alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (\text{II.27})$$

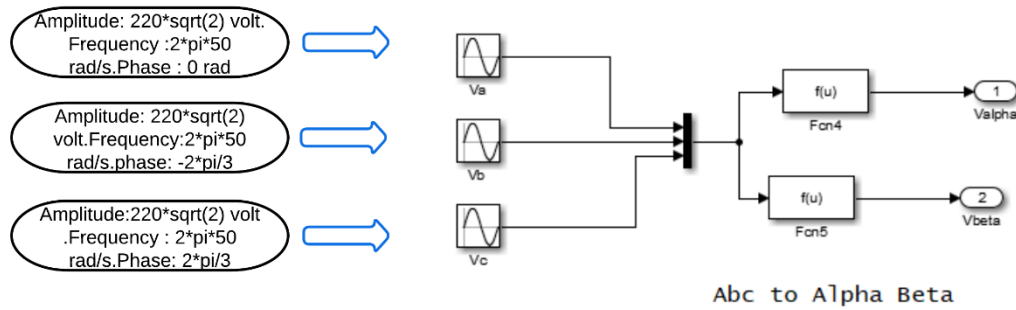


Figure II-14: Modèle Clark Concordia.

b) Transformation de Park (dq0 transformation)

Il existe deux types de transformations dq : basée sur le cosinus (Cosinus-based transformation) et basée sur le sinus. (Sinus-based transformation). La transformation basée sur le cosinus aligne le repère dq rotatif avec l'axe à $t = 0$ et donne le résultat $d = 0, q = -1, zero = 0$. La transformation basée sur le sinus aligne le repère dq rotatif de 90 degrés derrière l'axe à $t = 0$ et donne le résultat $d = 1, q = 0, zero = 0$. Dans notre travail nous avons utilisé la méthode de Cosinus-based :

Cosinus-based :

$$T_{\alpha\beta 0 \rightarrow dq} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{(II.28)}$$

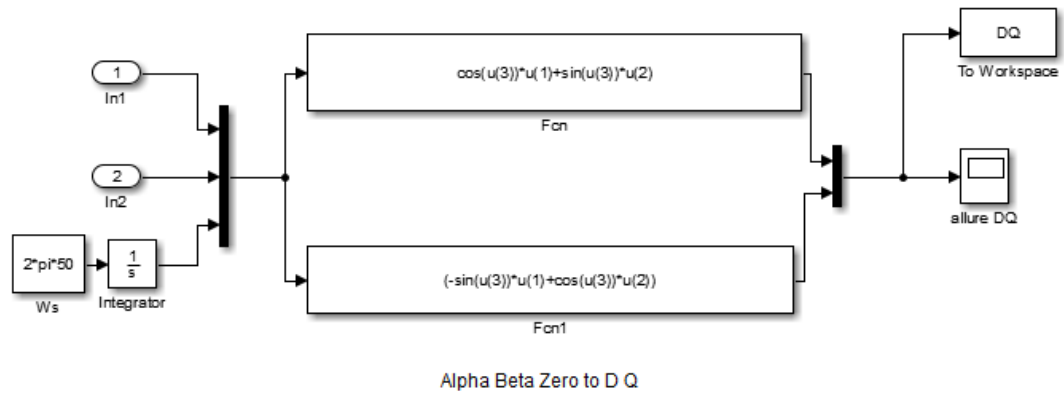


Figure II-15: Modèle de Park.

Par la multiplication des deux matrices précédentes on obtient la matrice globale [60] :

$$T_{abc \rightarrow dq} = T_{\alpha\beta \rightarrow dq} \times T_{abc \rightarrow \alpha\beta} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

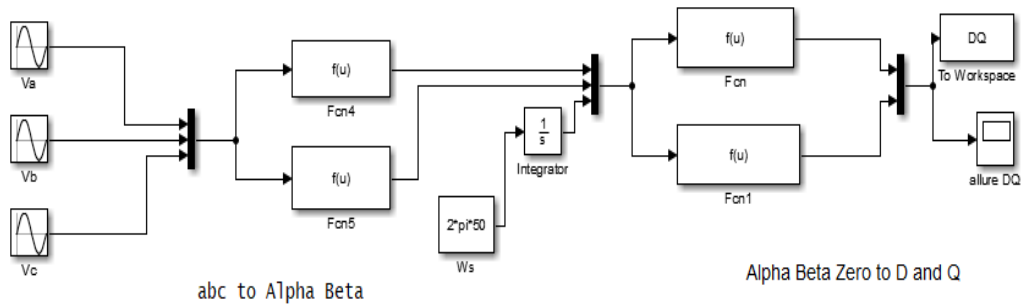


Figure II-16: Modèle globale de Clark et Park.

Après ces transformations, Les tensions statorique et rotorique de la GADA deviennent les suivantes :

II.5.2.5 Equation électrique

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega_s \psi_{qs}$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega_s \psi_{ds} \quad (\text{II.29})$$

$$V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr}$$

$$V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr}$$

Avec :

$V_{ds}; V_{qs}$: Composantes des tensions statorique dans le repère (dq).

$V_{dr}; V_{qr}$: Composantes des tensions rotorique dans le repère (dq).

$I_{ds}; I_{qs}$: Composantes des courants statorique dans le repère (dq).

$I_{dr}; I_{qr}$: Composantes des courants rotorique dans le repère (dq).

II.5.2.6 Equation magnétique

$$\psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr}$$

$$\psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \quad (\text{II.30})$$

$$\psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds}$$

$$\psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs}$$

Avec :

$\psi_{ds}; \psi_{qs}$: Composantes des flux statorique dans le repère (dq).

Chapitre II : Modélisation du système étudié

$\psi_{dr}; \psi_{qr}$: Composantes des flux rotorique dans le repère (dq).

La fréquence de la tension statorique est imposée à cause de réseau électrique, la pulsation du courant rotorique, donné par la relation [61] :

$$\omega_m = \omega_s - \omega_r \quad \longleftrightarrow \quad \omega_r = \omega_s - p\Omega$$

Avec :

ω_r : Pulsation rotorique.

ω_m : Pulsation mécanique.

Les angles θ_s et θ_r sont obtenus respectivement par intégration de ω_s et ω_r :

$$\begin{cases} \theta_r = \int_0^t \omega_r dt \\ \theta_s = \int_0^t \omega_s dt \end{cases}$$

Avec :

$\theta_s; \theta_r$: Déphasage de l'axe directe par rapport au stator, rotor.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} - \omega_s (L_s I_{qs} + M I_{qr}) \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} + \omega_s (L_s I_{ds} + M I_{dr}) \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(L_r I_{qr} + M I_{qs}) \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + (\omega_s - \omega_r)(L_r I_{dr} + M I_{ds}) \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

Une forme compacte du système d'équations précédent est [62] :

$$\begin{pmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 & -L_s & 0 & -M \\ L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ + (\omega_s - \omega_r) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & L_r \\ M & L_r & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Alors que :

$$\begin{aligned} [V] &= [R][I] + [L] \frac{d[I]}{dt} + \omega_s [C] + (\omega_s - \omega) [D] \iff \\ \frac{d[I]}{dt} &= -[V][L]^{-1} + [R][I][L]^{-1} + \omega_s [C][L]^{-1} + (\omega_s - \omega) [D][L]^{-1} \end{aligned} \quad (\text{II.32})$$

II.5.2.7 Les puissances active et réactive du GADA

Statorique :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs} \\ Q_s = V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Rotorique :

$$P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}$$

$$Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \quad (\text{II.34})$$

II.5.2.8 L'équation mécanique

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + f \Omega_{méc} = C_{méc} - C_{em} \quad (\text{II.35})$$

Le couple électromotrice est donné par l'expression électromagnétique peut être exprimé sous ces deux formes [63] :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (\psi_{qs} I_{dr} - \psi_{ds} I_{qr})$$

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\psi_{dr} \dot{i}_{qs} - \psi_{qr} \dot{i}_{ds})$$
(II.36)

II.6 Principe de La commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation

Dans le cadre de la commande vectorielle, l'objectif est de rechercher un modèle simplifié de la machine asynchrone qui permette d'assurer un contrôle indépendant des flux et du couple en mode moteur, ainsi que des puissances active et réactive en mode générateur (de la même manière que la machine à courant continu à excitation séparée). Pour atteindre cet objectif, l'axe "d" du repère de Park est aligné selon le flux ψ_s, ψ_r de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [64].

- le flux statorique avec les conditions :

$$\psi = \psi_{ds} = \psi_s \text{ Et } \psi_{qs} = 0$$

- le flux rotorique avec les conditions :

$$\psi = \psi_{dr} = \psi_r \text{ Et } \psi_{qr} = 0$$

- le flux de l'entrefer avec les conditions :

$$\psi = \psi_{dg} = \psi_g \text{ Et } \psi_{dg} = 0$$

II.6.1 La commande vectorielle à flux statorique orienté

Afin de faciliter le contrôle de la production d'électricité de l'éolienne, il est envisagé d'établir un contrôle indépendant des puissances actives et réactives. Pour ce faire, des équations seront utilisées pour relier les tensions rotoriques, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques. Cette approche permettra un contrôle précis de la production d'énergie de l'éolienne :

$$\psi_{ds} = \psi_s \text{ Et } \psi_{qs} = 0$$

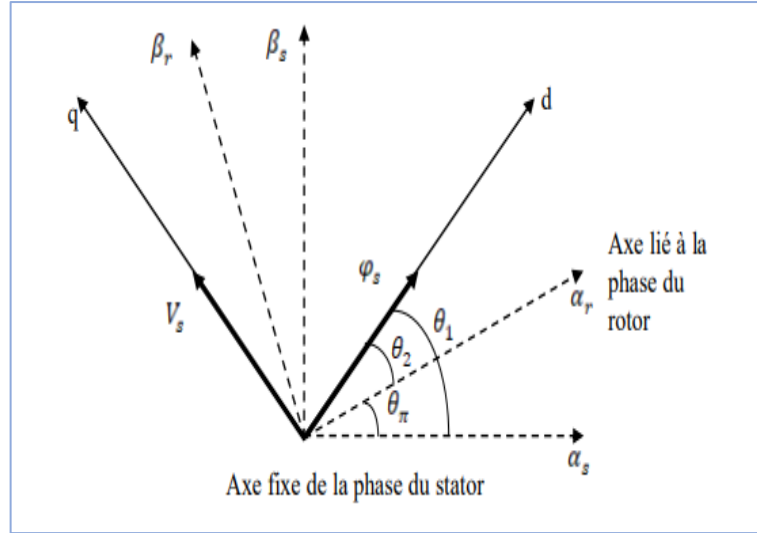


Figure II-17: Orientation de flux statorique de la MADA

Le couple électromagnétique C_{em} s'écrit :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} I_{qr} \psi_{ds} \quad (\text{II.37})$$

L'équation du flux s'exprime comme suit :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \psi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Si on considère le flux statorique ψ_s constant. Il est possible de constater que le couple électromagnétique (C_{em}) généré par la machine, et par conséquent la puissance active, dépendent uniquement du courant rotorique. Cette observation met en évidence l'importance du contrôle du courant rotorique dans le contrôle de la production d'énergie de la machine.

En plus les résistances R_s statoriques négligeables étant donné que c'est une hypothèse réaliste pour les génératrices de moyenne et forte puissance utilisées dans les éoliennes ; les équations de tensions statoriques soit :

Avec l'hypothèse du flux statorique constant les dérivés sont nuls :

$$\begin{cases} V_{ds} = \frac{d\psi_s}{dt} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \psi_s = V_s \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

La relation entre les courants statoriques et les courants rotoriques est donnée par :

$$\begin{cases} I_{ds} = -\frac{M}{L_s} I_{dr} + \frac{\psi_s}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

En remplaçant les courants du stator par ces expressions dans l'expression des flux rotorique, on aura :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \psi_{qr} = (L_r - \frac{M^2}{L_s}) I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Il convient de rappeler que l'objectif principal de ce chapitre est de commander les puissances statoriques en fonction des tensions et des courants rotoriques. Les puissances peuvent être exprimées dans le repère (d, q) selon les équations suivantes :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{qs} \\ Q_s = V_s I_{ds} \end{cases} \iff \begin{cases} P_s = -\frac{M}{L_s} V_s I_{qr} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - \frac{M}{L_s} V_s I_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

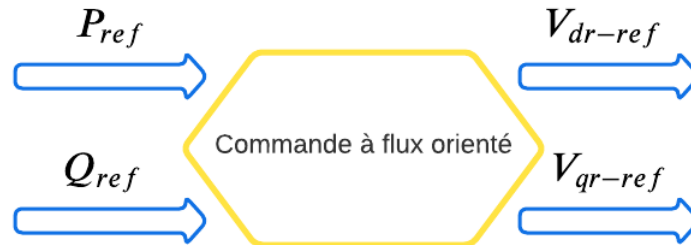


Figure II-18: schéma simplifié pour la commande à flux orienté.

Pour trouver les relations entre les courants et les tensions du rotor, on doit exprimer les flux rotoriques en fonction des courants rotoriques. Remplacent les équations (II.40) dans l'expression du flux rotorique, alors en obtient l'équation (II.43) :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + L_r \sigma \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + L_r \sigma \frac{dI_{qr}}{dt} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

$$\text{Avec : } \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r}$$

Les termes de couplage entre les deux axes ; selon ces deux équations obtenues est :

$$- g \omega_s L_r I_{qr} \text{ et } g \omega_s (L_r \sigma I_{dr} + \frac{M V_s}{L_s}).$$

- Les tensions statorique ce sont des entrées.
- Les courants statoriques ainsi les puissances actives et réactives ce sont les sorties.

Finalement on obtient [65]:

$$\begin{cases} I_{dr} = \left(\frac{-1}{R_r + PL_r \sigma} \right) [V_{dr} + (g \omega_s L_r \sigma) I_{qr}] \\ I_{qr} = \left(\frac{-1}{R_r + PL_r \sigma} \right) [V_{qr} (g \omega_s L_r \sigma) I_{dr} - g \omega_s \frac{M}{L_s} \psi_s] \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

II.6.2 Commande vectorielle indirecte

II.6.2.1 Commande en boucle ouverte

Les courants rotoriques I_{dr}, I_{qr} sont les courants de référence correspondants à la puissance active statorique et à la puissance réactive statorique ‘(P_s, Q_s respectivement). Ils doivent suivre ces courants de référence. À partir des expressions des puissances actives et réactive statoriques du système, on peut déduire les références des courants rotoriques direct et quadrature selon les relations de l'équation (II.34):

$$\begin{cases} I_{dr} = \left(\frac{-1}{R_r + PL_r\sigma} \right) \left[V_{dr} + (g\omega_s L_r \sigma) I_{qr} \right] \\ I_{qr} = \left(\frac{-1}{R_r + PL_r\sigma} \right) \left[V_{qr} - (g\omega_s L_r \sigma) I_{dr} - g\omega_s \frac{M}{L_s} \psi_s \right] \end{cases}$$

La Figure (II.19) consiste à contrôler ces puissances indirectement par le réglage des deux composantes directes et en quadrature du courant rotorique par des régulateurs PI dont les consignes sont directement déduites des valeurs des puissances que l'on veut imposer à la GADA.

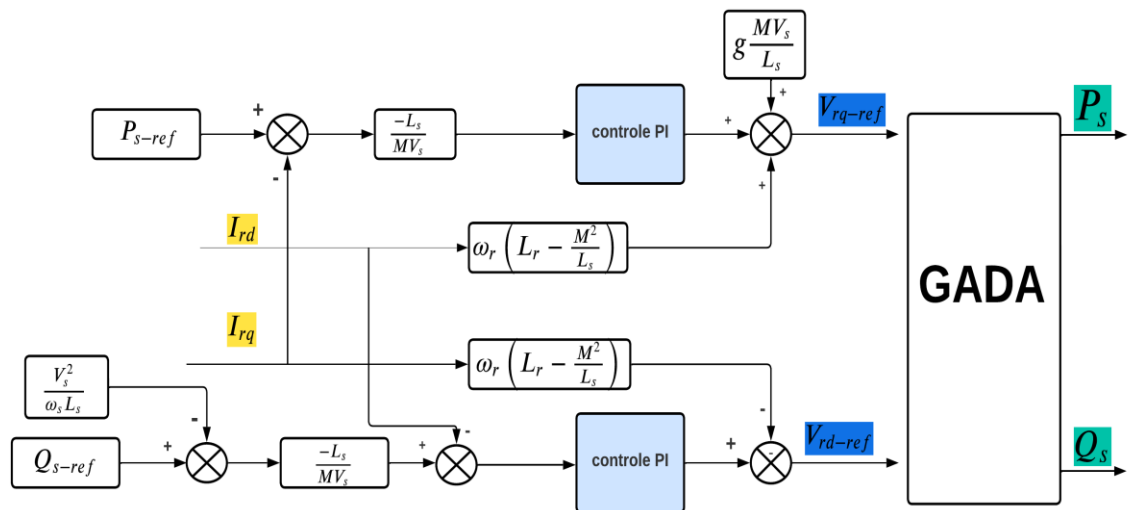


Figure II-19: schéma de la commande vectorielle indirecte en boucle ouverte.

II.6.2.2 Commande indirecte en boucle fermée

Pour améliorer la commande, nous proposons d'introduire une boucle de régulation supplémentaire au niveau des puissances. Cette boucle a pour objectif d'éliminer l'erreur statique tout en préservant la dynamique du système. Le schéma simplifié de l'ensemble de la commande est représenté sur la figure (II.20), où l'on peut observer une boucle de contrôle pour la puissance.

Dans le scénario du contrôle indirect, le processus de calcul des régulateurs est adapté et diffère de celui du mode direct, étant donné que la régulation est effectuée sur les courants

rotoriques. Le régulateur utilisé est de type proportionnel-intégral, et il est utilisé pour l'asservissement des courants et des puissances. Cette méthode présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables pour l'application de la GADA. C'est cette structure spécifique que nous allons aborder dans notre étude [66].

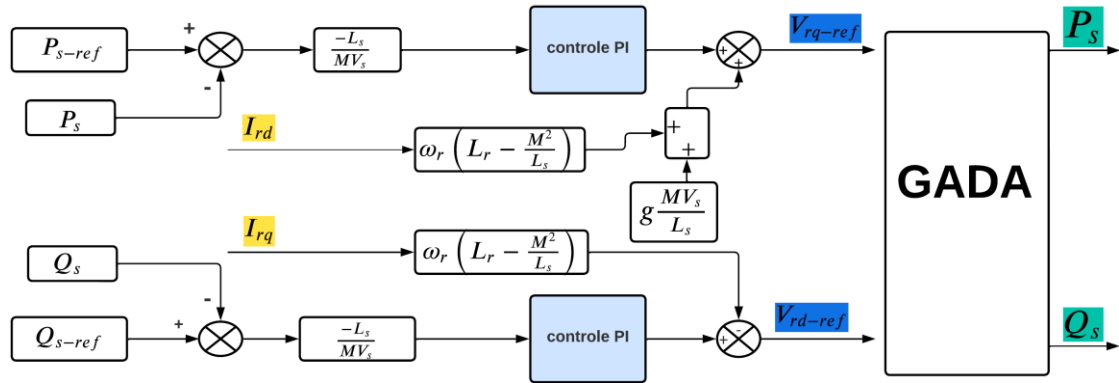


Figure II-20: Schéma de la commande vectorielle indirecte en boucle fermée.

Avantages et inconvénients de la commande vectorielle :

Les avantages

La commande vectorielle présente les avantages suivants :

- ✚ La commande vectorielle repose sur le modèle transitoire du système.
- ✚ Elle offre une précision et une rapidité élevées.
- ✚ Le contrôle des grandeurs se fait à la fois en amplitude et en phase.
- ✚ Elle permet de contrôler le couple même à l'arrêt du système.

Les inconvénients

La commande vectorielle présente également certains inconvénients :

- ✚ Elle est faiblement robuste aux variations des paramètres, notamment à celles de la constante de temps rotorique.
- ✚ Des paramètres mal réglés peuvent entraîner des erreurs de couple.
- ✚ Elle implique l'utilisation de transformations de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé.

- ✚ La vitesse de rotation est explicitement prise en compte dans l'algorithme de commande.
- ✚ La mise en œuvre de la commande vectorielle peut être coûteuse et onéreuse [67].

II.7 Etude de la régulation pour la commande

Le PI « Contrôleur Proportionnel Intégral » est une méthode utilisée pour contrôler la génératrice asynchrone à double alimentation (DFIG). Il présente l'avantage d'être simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. L'action proportionnelle du contrôleur est utilisée pour réguler la vitesse de la dynamique du système, tandis que l'action intégrale est utilisée pour éliminer l'écart entre la valeur de référence et la valeur à contrôler. C'est pourquoi cette approche a été retenue pour une étude globale du système. Calcul des régulateurs [68] :

$$C(s) = K_p + \frac{1}{s}K_i \quad (\text{II.45})$$

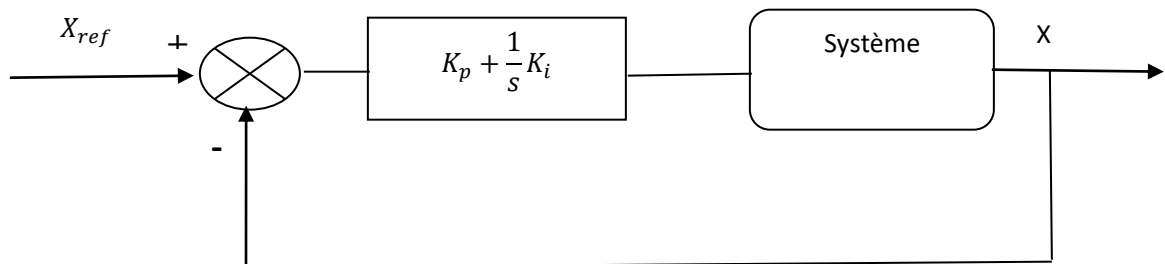


Figure II-21: schéma bloc du système de régulation.

La figure (II.21) montre le système de régulation de chaque puissance de la GADA en boucle fermée par un régulateur PI. La fonction de transfert en boucle ouverte FBO du système de réglage s'écrit comme suit :

$$FBO = \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{s}{K_p}} \cdot \frac{MV_s}{\frac{L_s L_r \sigma}{R_r + s} + s} \quad (\text{II.46})$$

La méthode de compensation des pôles comporte d'éliminer le zéro de la fonction de transfert et ceci nous ramène à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_r}{L_r \sigma} \quad (\text{II.47})$$

Après la compensation des pôles ; on obtient la fonction de transfert FBO suivante :

$$FBO = \frac{K_p M V_s}{L_s L_r \sigma s} \quad (\text{II.48})$$

En boucle fermé, la fonction de transfert s'exprime comme suit :

$$FBF = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (\text{II.49})$$

$$\text{Avec : } \tau = \frac{L_s L_r s \sigma}{K_p M V_s}$$

τ Est le temps de la réponse du système que l'on fixe .en ce cas les gains de régulateurs PI sont donné par [69] :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1 L_s \cdot L_r \cdot \sigma}{\tau M \cdot V_s} \\ K_i = \frac{1 R_r \cdot L_s}{\tau M \cdot V_s} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

II.8 Modélisation onduleur :

II.8.1 Modélisation onduleur a deux niveaux :

Le rotor de la GADA (Générateur Asynchrone à Double Alimentation) est alimenté par un onduleur de tension à deux niveaux qui utilise des dispositifs semi-conducteurs commandés pour ouvrir et fermer le circuit. Dans ce système, nous supposons l'utilisation de six interrupteurs électroniques idéaux. Ces interrupteurs peuvent être des transistors (bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes antiparallèles, ou bien des thyristors équipés de circuits d'extinction et d'amorçage. La tension de sortie de l'onduleur est contrôlée à l'aide de la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) triangulo-sinusoïdale. Cette technique permet de régler simultanément la fréquence et la valeur efficace de la tension de sortie.

En remplaçant chaque groupe transistor-diode par des interrupteurs S_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$), nous obtenons un schéma simplifié pour chaque onduleur, comme illustré dans la figure (II.22) :

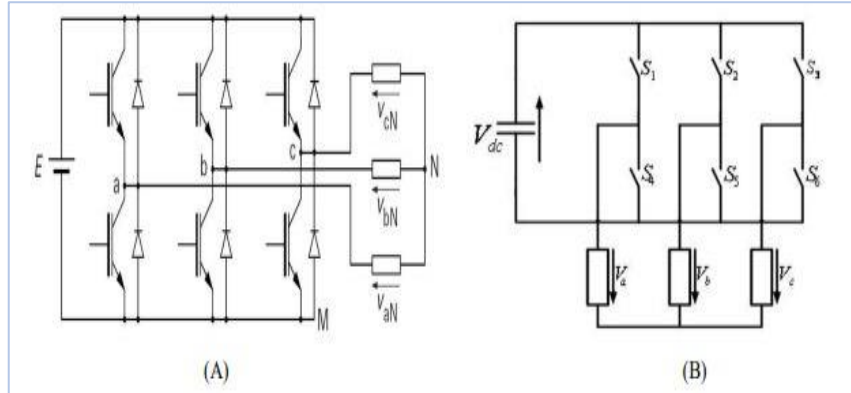


Figure II-22: schéma électrique de raccordement entre le rotor et un onduleur à deux niveaux.

On peut exprimer les tensions en ligne en fonction de la tension dans l'étape continue et de l'état des commutateurs. On définit pour ça les variables $S_A S_B S_C$ en fonction de l'état des commutations dans les branches du convertisseur.

- **Branche A**

$S_A = 0$ Si T_1 est ouvert et T_4 est fermé.

$S_A = 1$ Si T_1 est fermé et T_4 est ouvert.

- **Branche B**

$S_B = 0$ Si T_2 est ouvert et T_5 est fermé.

$S_B = 1$ Si T_2 est fermé et T_5 est ouvert.

- **Branche C**

$S_C = 0$ Si T_3 est ouvert et T_6 est fermé.

$S_C = 1$ Si T_3 est fermé et T_6 est ouvert.

Les tensions composées à la sortie s'expriment par :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{dc} (S_A - S_B) \\ U_{BC} = V_{dc} (S_B - S_C) \\ U_{CA} = V_{dc} (S_C - S_A) \end{cases} \quad (\text{II.51})$$

Si on suppose que les tensions sont équilibrées ; on peut déduire les expressions des tensions en lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_A = \frac{1}{3}(U_{AB} - U_{CA}) \\ V_B = \frac{1}{3}(U_{BC} - U_{CB}) \\ V_C = \frac{1}{3}(U_{CA} - U_{BC}) \end{cases} \quad (\text{II.52})$$

L'équation classique de l'onduleur pris en compte dans la simulation est :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.53})$$

II.8.2 Principe de MLI

La technique de modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoidale repose sur la comparaison, à chaque instant, entre un signal triangulaire $W(t)$ de fréquence f_{por} (appelé porteuse) et trois signaux de commande, notés V_A, V_B et V_C . Ces signaux représentent les tensions souhaitées à appliquer sur chaque phase. Les commutations des interrupteurs se produisent lorsqu'il y a une égalité de la forme suivante :

$$V_i(t) = W(t) \quad (\text{II.54})$$

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation « m » représente le rapport entre la fréquence de la porteuse f_{por} et la fréquence de la tension de référence f_{ref} .

$$m = \frac{f_{por}}{f_{ref}} \quad (\text{II.55})$$

➤ Le taux de modulation « r » est défini comme le rapport entre l'amplitude de la tension de référence et celle de la porteuse. [70].

$$r = \frac{V_{ref}}{U_{por}} \quad (\text{II.56})$$

II.9 Avantages Et Inconvénients De La Gada

II.9.1 Avantages de la GADA

Les éoliennes à base de la GADA présentent de nombreux avantages :

- Les convertisseurs statiques utilisés sont moins encombrants, moins coûteux et nécessitent un système de refroidissement moins lourd. En outre, ils génèrent moins de perturbations que les convertisseurs utilisés dans les éoliennes à base de machines asynchrones à cage ou à aimants permanents.
- la réduction des pertes liées aux convertisseurs statiques, ce qui améliore le rendement global du système de génération.
- la génératrice peut être contrôlée pour fonctionner de façon similaire à un alternateur synchrone, permettant ainsi de régler le facteur de puissance. Les puissances active et réactive peuvent également être contrôlées de manière indépendante grâce au convertisseur connecté au rotor de la GADA.

II.9.2 Inconvénients de la GADA

- Les pertes par effet joule sont plus importantes dans la GADA que dans la machine à cage en raison des courants élevés dans les enroulements du rotor ;
- La GADA peut produire des harmoniques de courant plus élevées en raison de sa structure non linéaire et de l'utilisation de convertisseurs statiques.
- La présence des balais dans la GADA entraîne une usure plus rapide et nécessite un entretien régulier [71].

II.10 Modélisation d'un système de stockage

II.10.1 Description des différents types de stockage

Le stockage d'énergie consiste à mettre en réserve une quantité d'énergie provenant d'une source, afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement. Ce système de stockage agit comme un réservoir d'énergie, permettant d'accumuler l'excédent d'énergie produit par les sources et de la restituer lorsque ces sources ne fournissent pas suffisamment d'énergie. Dans notre étude, nous nous concentrerons exclusivement sur les batteries en tant que moyen de stockage à long terme, en excluant les super-condensateurs qui sont utilisés pour le stockage à court terme [72].

II.10.2 Description d'une Batterie

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus relevée aux bornes du dispositif. Une cellule est constituée de trois éléments de base :

- une électrode positive (cathode),
- une électrode négative (anode),
- un électrolyte.

Globalement, l'objectif d'une cellule est de créer une différence de potentiel entre les deux électrodes liées à leurs matériaux constituants. L'électrolyte permet la migration des ions entre l'anode et la cathode tout en interdisant le transfert des électrons. Ceux-ci devront transiter au travers d'un circuit électrique qui est la charge. En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes. Au besoin, le type d'électrolyte peut également être précisé.

Il est bien connu que les batteries permettent de stocker l'électricité, ce qui est particulièrement utile pour les systèmes isolés. Dans notre étude, nous avons utilisé des

batteries comme deuxième source d'alimentation pour notre système GADA (Générateur d'Alimentation à Demande Automatique). Il existe différents types de batteries, notamment :

- ✚ La batterie plomb-acide.
- ✚ La batterie nickel-cadmium.
- ✚ La batterie sodium-chlorure de nickel.
- ✚ La batterie lithium-ion.
- ✚ La batterie zinc-air.

Ces différents types de batteries présentent des caractéristiques et des performances spécifiques, ce qui les rend adaptées à différents contextes d'utilisation [73].

II.10.3 Modèle de batterie de SHEPHERD

Le modèle électrique le plus simple comporte une source de tension idéale en série avec une résistance interne. Néanmoins il ne prend pas en compte l'état de charge de la batterie. La résistance est supposée constante durant les cycles de charge et de décharge, et elle ne varie pas avec la magnitude du courant [74].

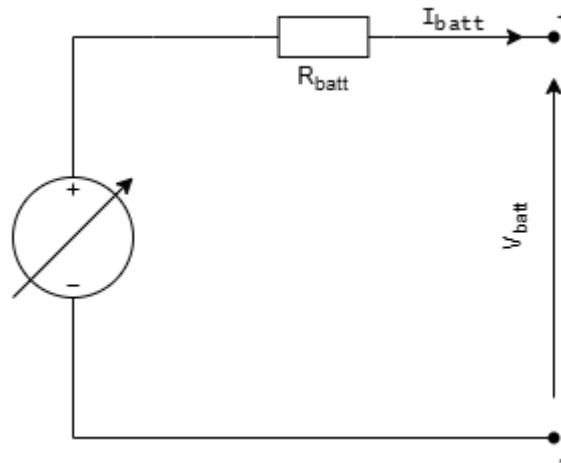


Figure II-23: modèle simplifié de la batterie.

II.10.4 Caractéristique de la batterie :

✚ La tension de la batterie est exprimée par la relation suivante :

$$V_{batt} = E_0 - (R_s * i) - V_{cbatt} \quad (\text{II.57})$$

✚ L'état de charge EDC (*SOC : state of charge en anglais*) de la batterie est exprimé par :

$$\text{SOC} = 1 - \frac{Q_m}{C_{batt}} \quad (\text{II.58})$$

Où :

C_{batt} : Capacité nominale de la batterie ;

Q_m : correspond à la quantité de charge manquante par rapport à C_{batt} ;

La capacité de la batterie est :

$$Q_{batt} = I * t_{batt} \quad (\text{II.59})$$

$$C = \frac{Q_{batt}}{V} \quad (\text{II.60})$$

Avec :

Q_{batt} : La quantité de charge électrique en coulombs,

I : Est le courant à travers la capacité,

t : Le temps de fonctionnement de la batterie

C : est la valeur de la capacité en Farads,

V : est la différence de potentiel correspondant à une plage d'état de charge (SOC) allant de 0% à 100%, pour un N_b en série.

La tension de batterie : la tension de batterie s'exprime par [75]:

$$V_{batt} = N_b E_{batt} + N_b R_i I_{batt} \quad (\text{II.61})$$


Avec :

V_{batt} : La tension de la batterie

I_{batt} : Le courant de la batterie

E_{batt} : est la force électromotrice en fonction de l'état de charge (SOC).

R_i : La résistance interne de l'élément.

 Capacité de batterie :

Le modèle de capacité est obtenu à partir de l'expression du courant de décharge en 10 heures (I_{10}). Il correspond au mode de fonctionnement de la capacité de décharge en 10 h (C_{10}).

$$C_{batt} = C_{10} \frac{1.67}{1+0.67\left(\frac{I_{battmoy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (\text{II.62})$$

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10I_{10}$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie. L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{batt} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par :

$$Q_m = I_{batt} * t$$

t la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{batt} .

Tension de batterie en régime de décharge :

$$V_{batt_déch} = N_b E_{batt_déch} - N_{batt} R_{batt_déch} |I_{batt}| \quad (\text{II.63})$$

$$E_{batt_déch} = 1.965 + 0.12EDC \quad (\text{II.64})$$

$$R_{batt_déch} = R_{batt} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1+|I_{batt}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007\Delta T) \quad (\text{II.65})$$

Tension de batterie en régime de charge En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par :

$$E_{batt_ch} = 2 + 0.16EDC \quad (\text{II.66})$$

$$R_{batt_ch} = R_{ch} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+|I_{batt}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (\text{II.67})$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la charge :

$$V_{batt_ch} = N_b E_{batt_ch} + N_b R_{batt_ch} I_{batt} \quad (\text{II.68})$$

Tension de batterie en régime de surcharge :

En régime de surcharge, l'expression de la tension de la batterie tient compte de deux phénomènes physiques qui sont, le "Gassing" dont la tension est V_g et la saturation qui exprime le repos de la batterie, lorsque son état de charge ne varie plus entraînant la tension de batterie appelée tension de fin de charge V_{ec} . Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par [76].

$$V_{batt_surch} = N_b V_g + N_b (V_{ec} - V_g) \left[1 - e^{-\frac{t-t_g}{\tau_g}} \right] \quad (\text{II.69})$$

Avec :

t_g : L'instant au bout duquel $V_{batt_ch} = V_g$;

V_g : Tension de "Gassing" ;

V_{ec} : Tension de fin de charge ;

τ_g : Constante de temps.

Où


$$\begin{cases} V_g = [2.24 + 1.97 \ln(1 + \frac{I_{batt}}{C_{10}})](1 - 0.002\Delta T) \\ V_{ec} = [2.45 + 2.011 \ln(1 + \frac{I_{batt}}{C_{10}})](1 - 0.002\Delta T) \\ \tau_g = \frac{1.73}{1 + 852(\frac{I_{batt}}{C_{10}})^{1.67}} \end{cases} \quad (\text{II.70})$$

II.10.5 Batterie utilisé dans notre étude :

Un accumulateur nickel-hydrure métallique, également connu sous le nom de Ni-MH (abréviation de l'anglais nickel-metal hydrude), est une batterie électrique rechargeable qui utilise de l'hydrure métallique, un composé capable de stocker de l'hydrogène, ainsi que de l'oxyhydroxyde de nickel en tant qu'électrode. Ce type de batterie présente des avantages tels qu'une densité d'énergie plus élevée que les batteries au plomb-acide, une capacité de charge plus importante et une durée de vie plus longue.

Ce type de batteries Ni-MH a été introduit sur le marché il y a seulement quelques années. Elles offrent des caractéristiques particulièrement intéressantes en termes de densité de puissance et de densité d'énergie, comme le démontre le tableau ci-dessous [77].

Tableau II-1: Caractéristiques des batteries Ni-MH.

batteries Ni-MH	
Température de fonctionnement [°C]	0 à 50 °C
Densité d'énergie [Wh/kg]	55 à 80 Wh/kg
Densité d'énergie volumique [Wh/dm ³]	140 à 160 Wh/dm ³
Temps de charge[h]	6 à 12 h
Coefficient de surcharge admissible[%]	5 à 12 %
Rendement énergétique [%]	75 à 85 %
Tension par cellule chargée [V]	1.2 V

II.11 Conclusion

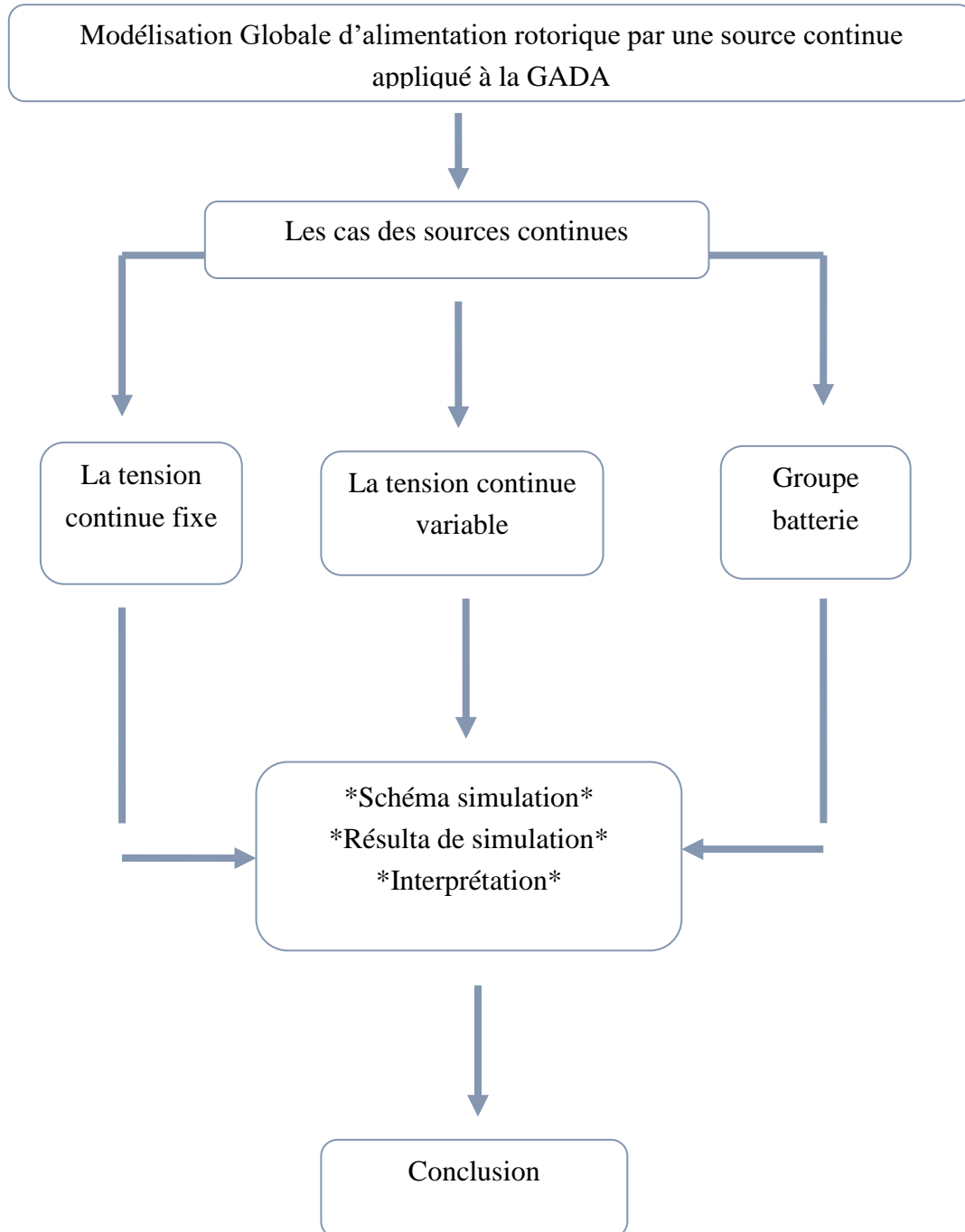
Le deuxième chapitre de notre étude se concentre sur la modélisation de la machine asynchrone double alimentée (MADA) ainsi que la modélisation de la turbine, du multiplicateur et de l'arbre. De plus, nous avons abordé la commande de la MADA en utilisant un convertisseur électronique à modulation de largeur d'impulsion (MLI). Nous avons également inclus une modélisation pour la deuxième source d'alimentation, à savoir les batteries. La stratégie de commande utilisée est la commande vectorielle par orientation du flux statorique. Cette stratégie vise à réguler à la fois la puissance active et réactive, en recherchant automatiquement un rendement de puissance proche de celui du maximum. L'objectif est d'optimiser les performances de la MADA en termes de régulation de puissance et d'efficacité énergétique.

Chapitre III :

Simulation et résultat du système étudié

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, l'accent est mis sur la modélisation et la commande d'un système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (GADA). Le modèle de simulation proposé offre une approche modulaire, ce qui permet d'adapter le modèle en fonction des objectifs spécifiques des simulations. Les chapitres précédents ont présenté les fondements nécessaires pour développer ce modèle dans l'environnement MATLAB/Simulink. Nous commençons par étudier le système éolien autonome basé sur la configuration GADA. Ensuite, nous intégrons une source continue pour alimenter l'onduleur. Cela permet de garantir une alimentation constante et stable, même lorsque la production éolienne est intermittente. L'inclusion d'une source continue améliore la fiabilité et les performances globales du système



III.2.Modélisation Globale d'alimentation rotorique par une source continue appliqué à la GADA

Dans cette section, nous proposons la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne qui est directement connectée au réseau de distribution via le stator. Le système est alimenté par le rotor grâce à un convertisseur de puissance utilisant la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI). Le système éolien autonome basé sur la configuration GADA fonctionne selon la stratégie de commande vectorielle indirecte avec des boucles de puissance. Pour alimenter l'onduleur, nous avons intégré une source continue (voir Figure(III.1)). Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) en mode générateur, utilisés dans la simulation, sont répertoriés en annexe.

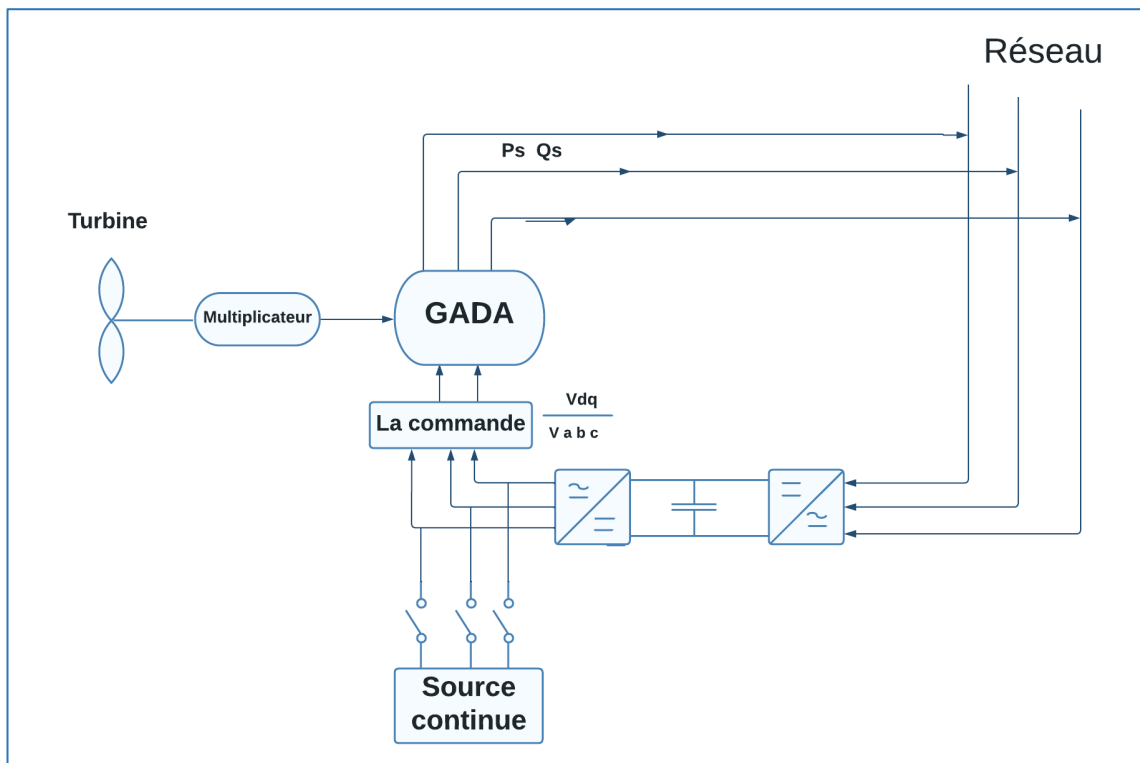


Figure (III-1): Schéma synoptique du système global à énergies renouvelables.

Chapitre III : Simulation et résultat du système étudié

Dans la suite de notre étude, nous allons présenter les deux chaînes du système hybride, ainsi que le système global.

La première chaîne est une chaîne de conversion éolienne qui a été développée dans le chapitre un. Elle est directement connectée au réseau de distribution.

La deuxième chaîne est une chaîne de conversion utilisant une source continue, qui a été développée dans le chapitre deux. Elle est utilisée pour alimenter l'onduleur.

III.3. les cas des sources continues

III.3.1.la tension continue fixe

Dans le cas de la source continue, nous examinons le scénario de tension continue fixe Le système étudié dans la première partie consiste en la connexion directe du stator GADA au réseau de distribution, tandis que le rotor est connecté via un onduleur de tension à deux niveaux.

Cette configuration est représentée dans la figure (III.2).

La tension de sortie de cet onduleur, avec une valeur fixe de 300 V, est contrôlée à l'aide de la technique de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

Cette technique permet de régler simultanément la fréquence et la tension de sortie de l'onduleur.

III.3.1.1. Schéma de simulation

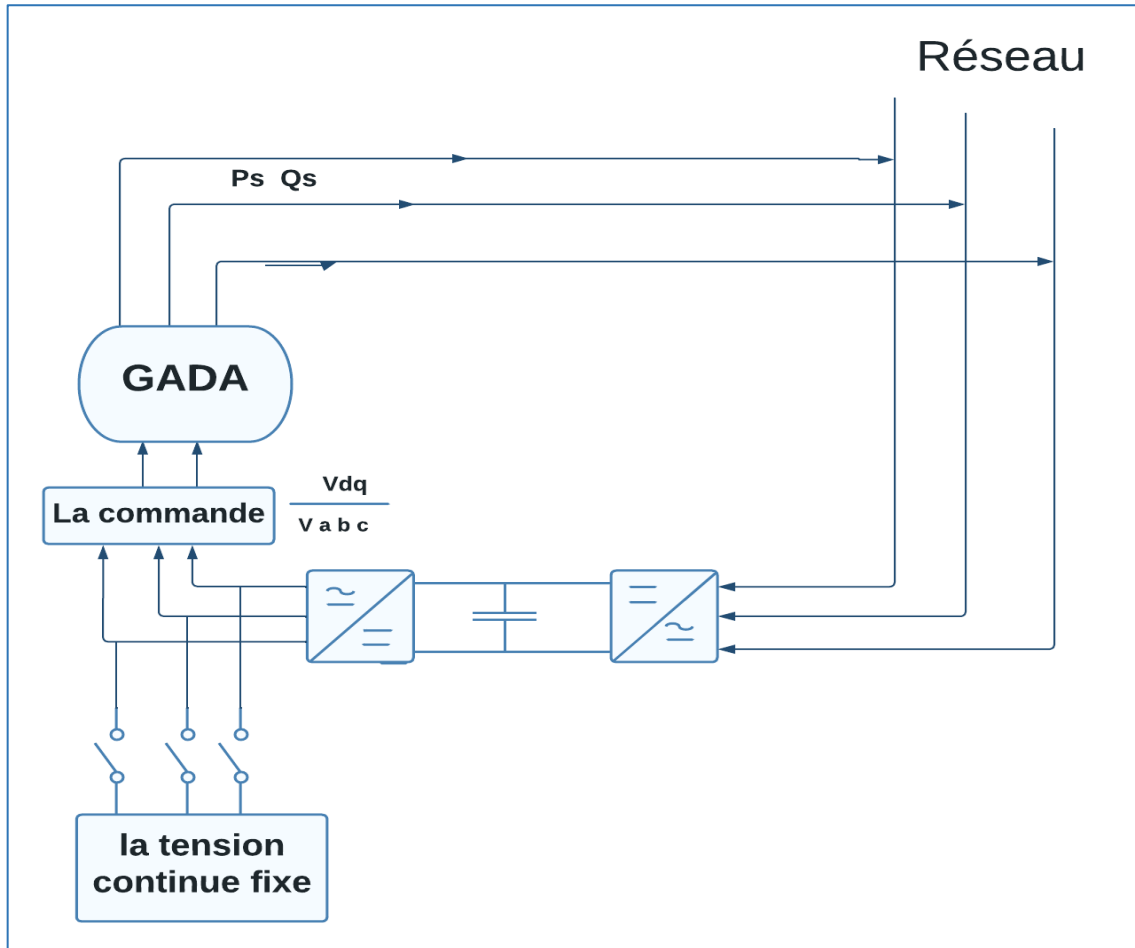


Figure (III-2) : Schéma synoptique du système source continue (la tension continue fixe).

III.3.1.2. Résultats de simulation

Les figures (III.3 ; III.4 ; III.5) ci-dessous présentent les résultats obtenus à partir du modèle d'une machine de puissance de 7,5 kW. Cette machine est entraînée à une vitesse fixe de 290 tr/min et est alimentée par deux sources de tension.

La première source est située au niveau du stator et a une fréquence de réseau de 50 Hz et une amplitude de 220 V. La deuxième source est située au niveau du rotor et a une amplitude de tension fixe en source continu.

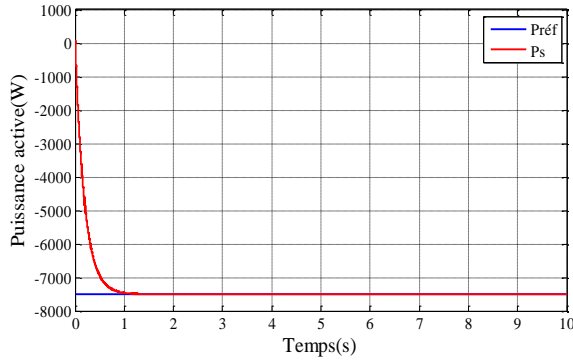


Figure (III-3): Puissance active .

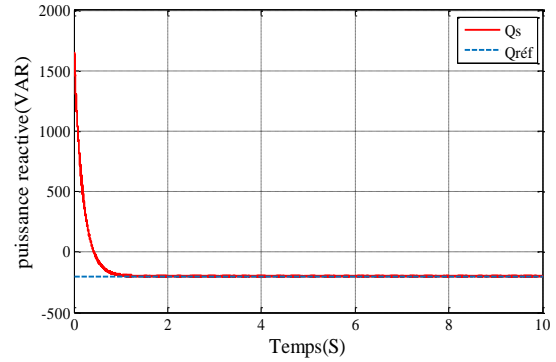


Figure (III-4): Puissance réactive.

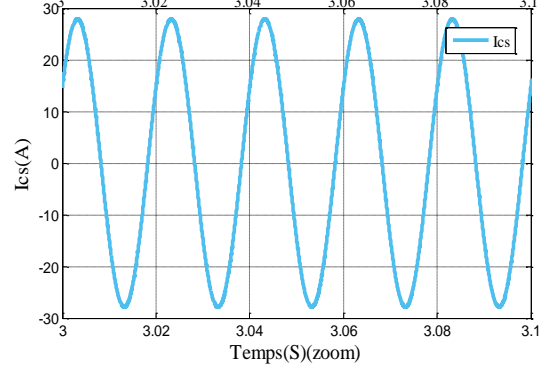
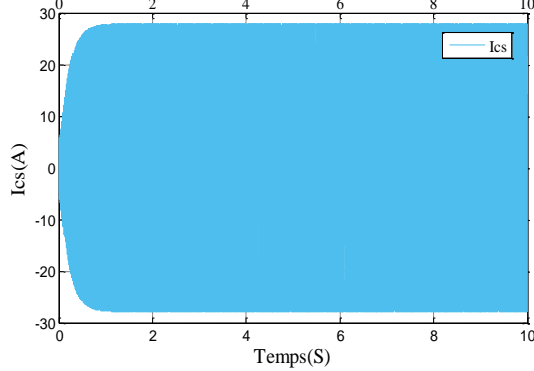
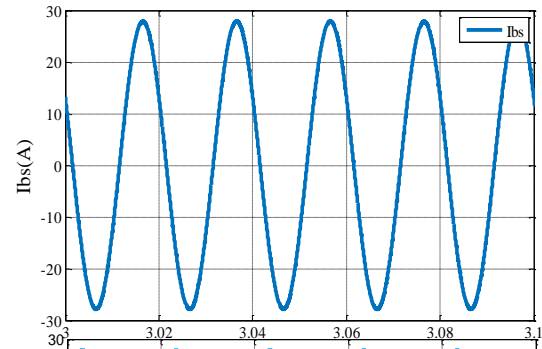
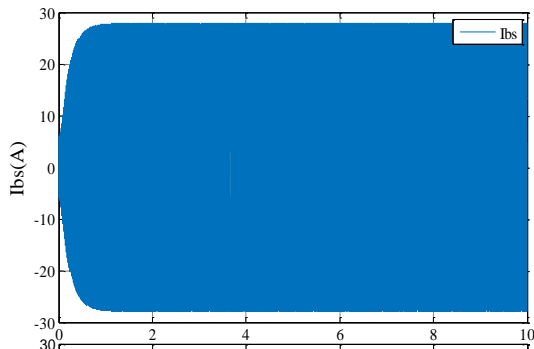
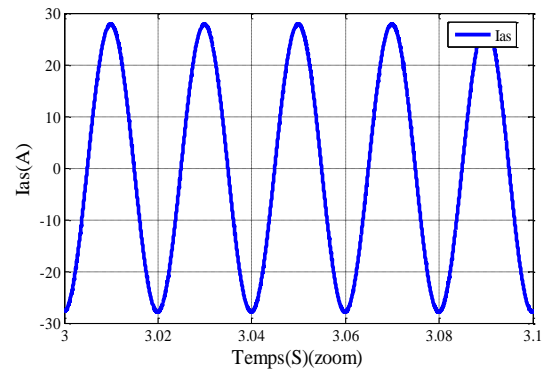
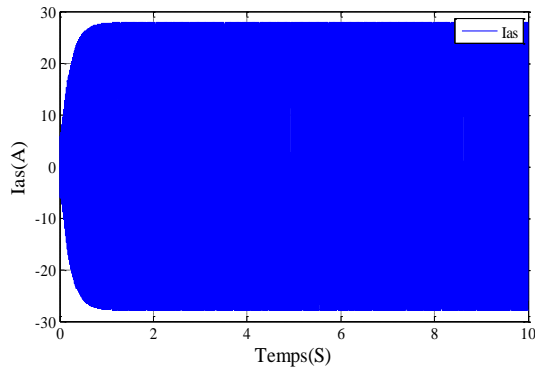


Figure (III-5) : Courants statorique (Ias, Ibs, Ics).

III.3.1.3. Interprétations

A partir des résultats de simulation présentant les différentes caractéristiques de la génératrice asynchrone à double alimentation, nous pouvons observer les éléments suivants :

- Les échelons de la puissance active et réactive au niveau du stator sont bien suivis par le générateur, sans dépassement et de manière rapide. Cette observation est clairement démontrée dans les figures III.3 et III.4. $P_s = -7500W$; $Q_s = -200VAR$.

- Les courants statoriques demeurent stables et présentent une forme sinusoïdale, comme le montrent les figures (III.5, III.6, III.7 et III.8) avec I_{sa} , I_{sb} , $I_{sc} = 29A$. Cela indique que le GADA assure une alimentation en énergie propre, sans générer ni absorber des harmoniques significatifs.

III.3.2. La tension variable :

Dans le cas de la source continue variable, nous examinons le scénario où le stator GADA est directement connecté au réseau, tandis que le rotor est connecté à travers un onduleur de tension avec une tension continue variable.

Nous disposons de trois options pour la tension de sortie de l'onduleur : 300 V, 400 V et 150V. Ces tensions peuvent être ajustées en fonction des besoins spécifiques du système dans la figure (III.6).

III.3.2.1 Schéma de simulation

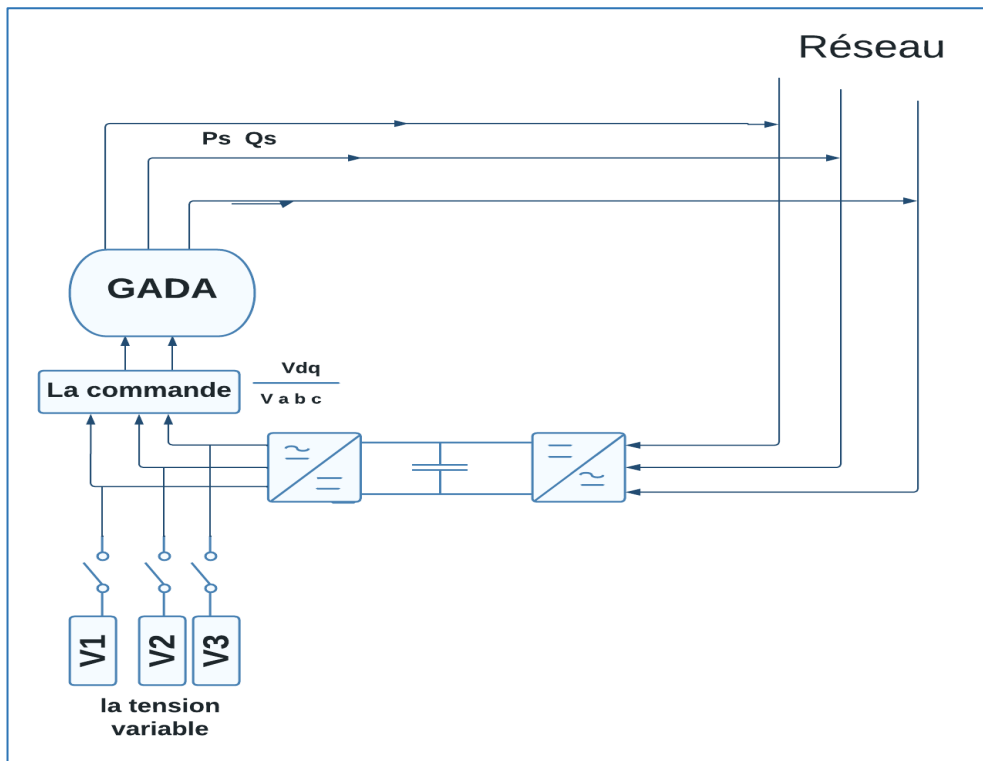


Figure (III-6) : Schéma synoptique du système source continue (la tension variable).

III.3.2.2 Résultats de simulation

Les résultats de simulation présentés dans les figures ci-dessous permettent d'évaluer les performances de la commande de la GADA alimentée par un onduleur à deux niveaux, utilisant la stratégie sinusoïdale. Dans cette simulation, la tension continue de l'onduleur varie selon les conditions suivantes :

- Entre $t=0s$ et $t=3s$: $V1=300V$
- Entre $t=3s$ et $t=5s$: $V2=400V$
- Entre $t=5s$ et $t=10s$: $V3=150V$

Chapitre III : Simulation et résultat du système étudié

La génératrice est entraînée à une vitesse fixe de 290 tr/min, avec une puissance active de référence de $P=-7500\text{W}$ aux instants $t=0\text{s}$ et $t=10\text{s}$, ainsi qu'une puissance réactive de référence de $Q=-200\text{ VAR}$ aux mêmes instants.

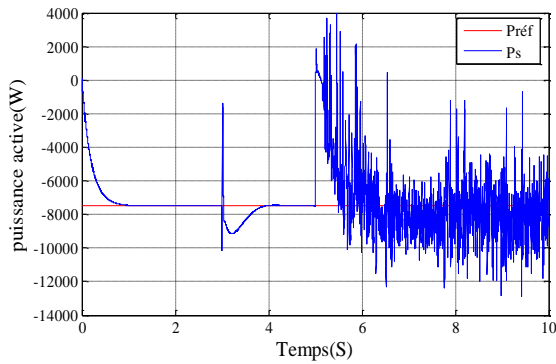


Figure (III-7) : Puissance active.

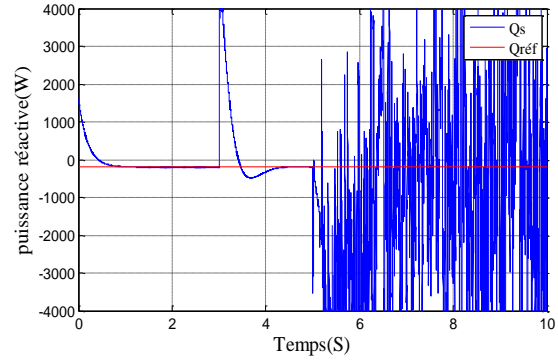


Figure (III-8) : Puissance réactive.

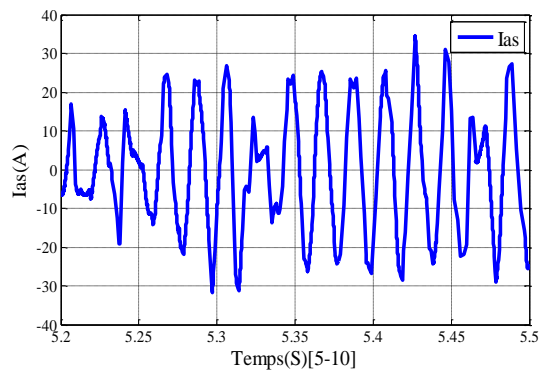
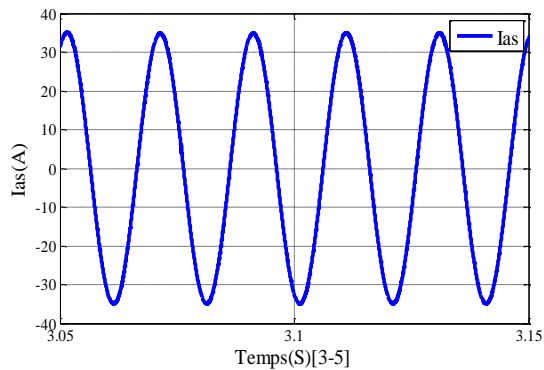
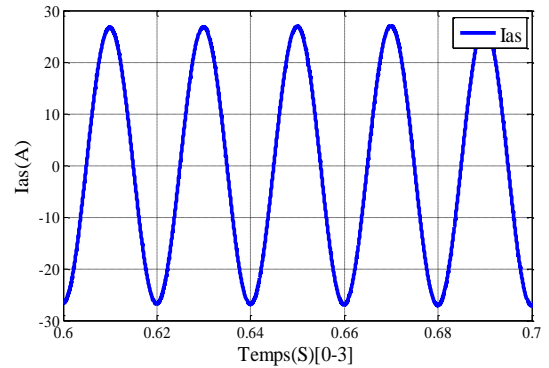
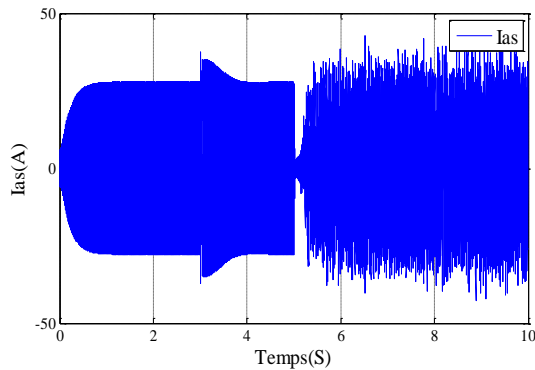


Figure (III-9) : Courant statorique (I_{as}).

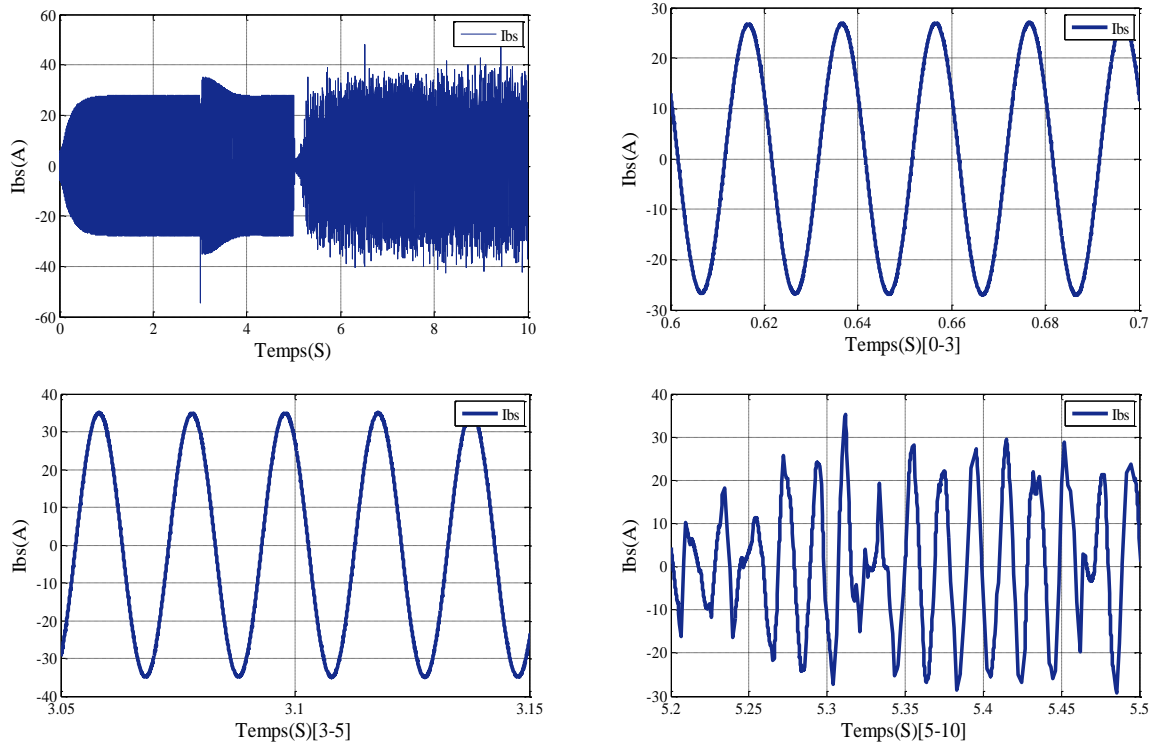


Figure (III-10) : Courant statorique (I_{bs}).

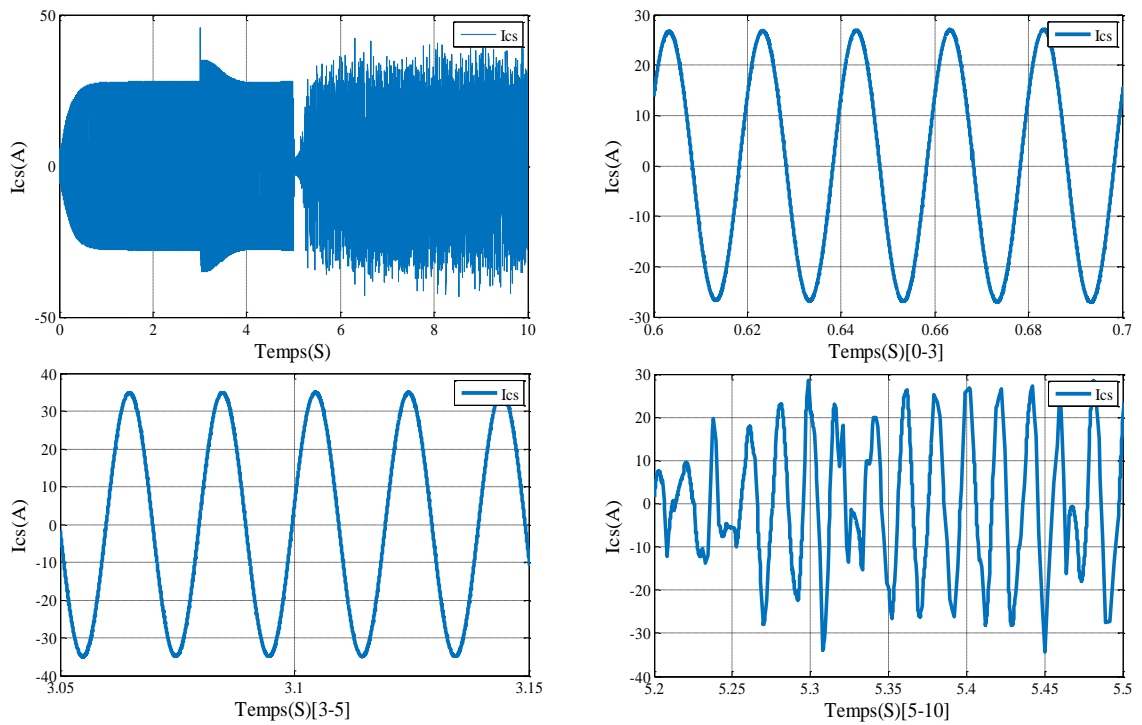


Figure (III-11) : Courant statorique (I_{cs}).

III.3.2.3 Interprétations

À partir de ces résultats de simulation, nous pouvons observer les éléments suivants :

- Les échelons de la puissance active et réactive au niveau du stator sont bien suivis par les générateurs dans l'intervalle de $t=0s$ à $t=5s$, $P_s=-7500W$, $Q_s=-200VAR$. sans dépassement et de manière rapide. Cela est illustré dans les figures (III.7) et (III.8). Cependant, dans l'intervalle de $t=5s$ à $t=10s$, des perturbations dans les puissances active et réactive sont observées.

- Les courants statoriques restent stables et présentent une forme sinusoïdale dans l'intervalle de $t=0s$ à $t=5s$, I_{as} , I_{bs} , $I_{cs}=29A$. Comme le montrent les figures (III.9), (III.10), (III.11) Cette caractéristique indique que le GADA fournit une énergie propre, sans générer ni absorber d'harmoniques. Cependant, dans l'intervalle de $t=5s$ à $t=10s$, les courants statoriques présentent des variations. Nous avons pu voir que la tension injectée dans l'onduleur, il fut adaptée entre 300 et 350V pour un système stable.

III.3.3 Système avec un groupe batterie

Dans le cadre du système étudié dans la troisième partie, nous avons le stator GADA connecté directement au réseau de distribution, tandis que le rotor est connecté à travers un onduleur de tension utilisant un groupe batterie. La tension de sortie de cet onduleur est maintenue à 340V dans la figure (III.12).

III.3.3.1 Schéma de simulation

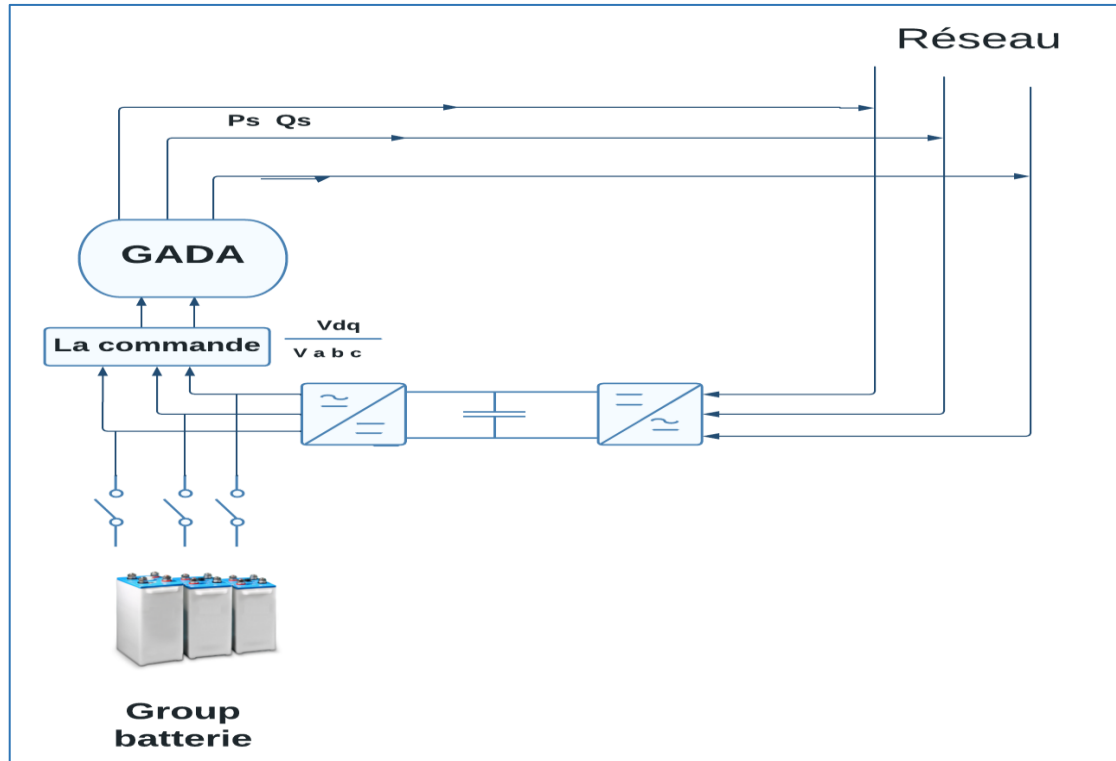


Figure (III-12): Schéma synoptique du système source continue (groupe batterie)

III.3.3.2 Résultats de simulation (groupe batterie)

L'objectif de cet essai est d'observer les réactions des divers modèles de groupes de batteries lors de la décharge totale d'un groupe de batteries à courant constant (DCC). Cette décharge vise à obtenir une détermination plus précise des paramètres dans le cadre de nos applications. Les résultats de la simulation comprennent la décharge totale ainsi que la charge et la décharge du groupe de batteries, qui sont analysées séparément dans le système d'étude global.

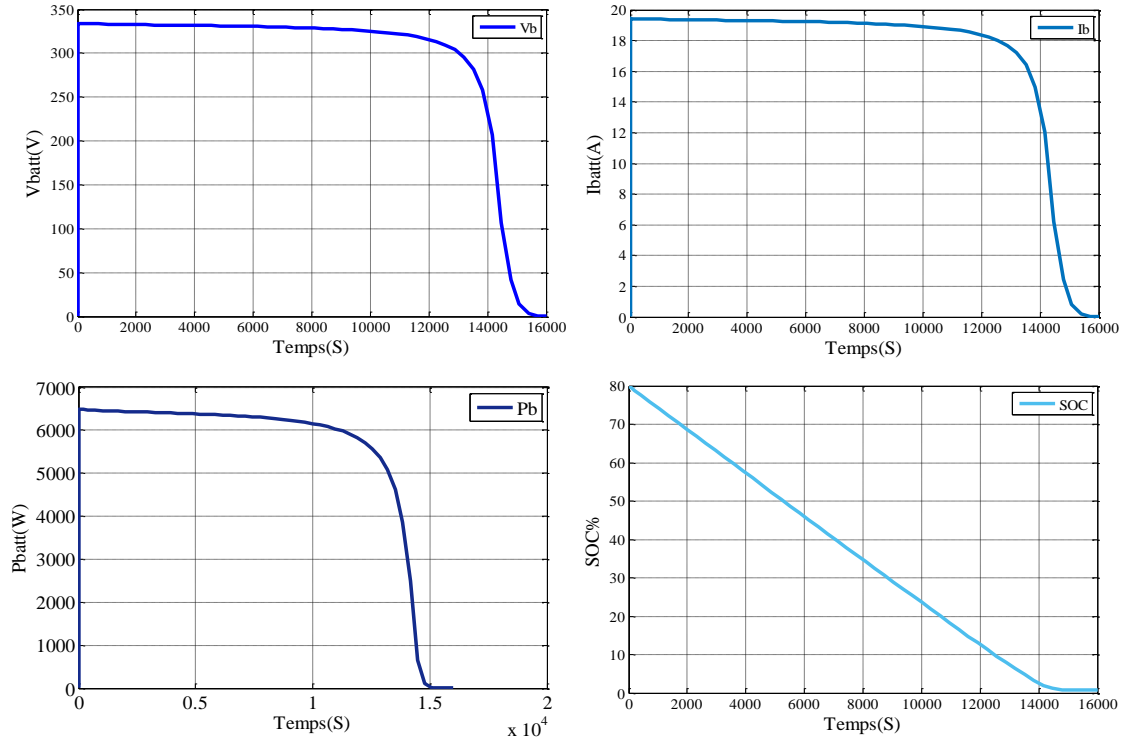


Figure (III-13) : La décharge total de groupe batterie ($V_{batt}, I_{batt}, P_b, SOC$) en fonction de temps.

La Figure (III.13) illustre l'évolution des paramètres ($V_{batt}, I_{batt}, P_b, SOC$) pendant le processus de décharge totale d'un groupe de batteries d'une durée de 5 heures.

En examinant la figure en haut à gauche, on observe clairement trois zones distinctes. La première zone correspond à la mise en service de la batterie, où l'on observe une chute de tension exponentielle de courte durée à partir d'une batterie complètement chargée. La largeur de cette zone varie en fonction du type de batterie. La deuxième zone, représentée par une courbe plus ou moins affine, correspond à la charge pouvant être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension descende en dessous de la tension nominale de la batterie. Enfin, la troisième zone représente la décharge totale de la batterie, caractérisée par une chute rapide de tension.

L'objectif à présent est d'extraire les paramètres du modèle à partir de cette courbe de décharge et de certaines informations fournies dans la description technique de la batterie.

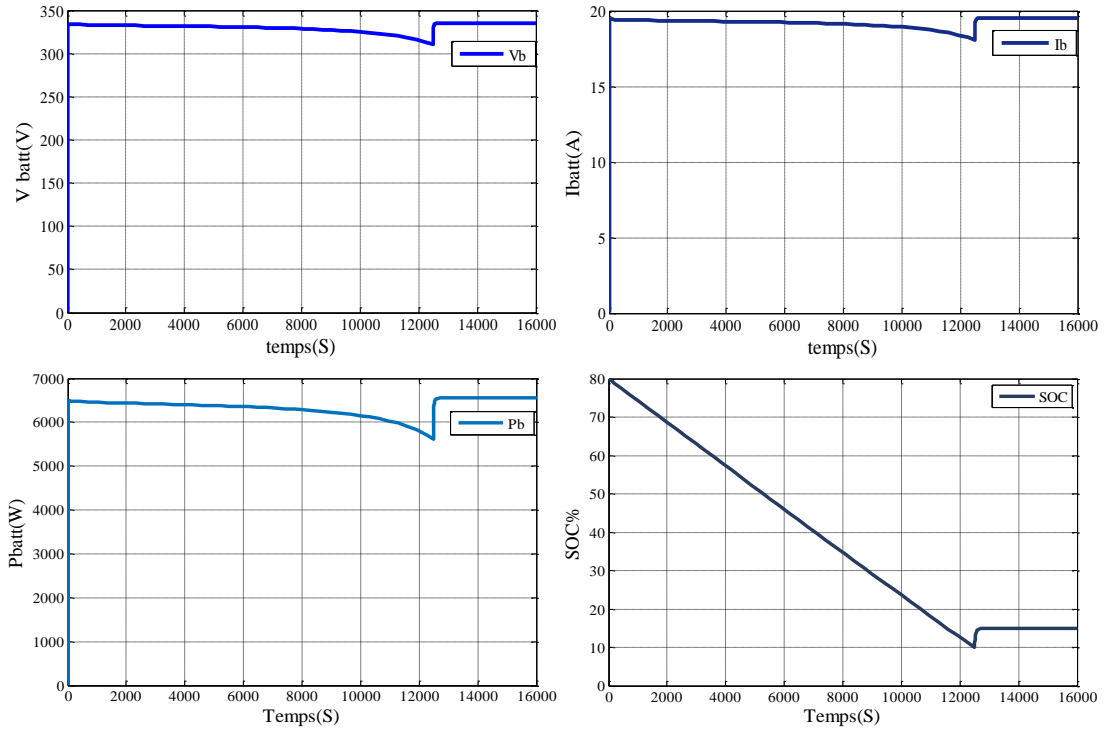


Figure (III-14) : Comportement de groupe batterie ($V_{batt}, I_{batt}, P_b, SOC$) en mode charge décharge en fonction de temps.

III.3.3.3 Résultats de simulation (système globale)

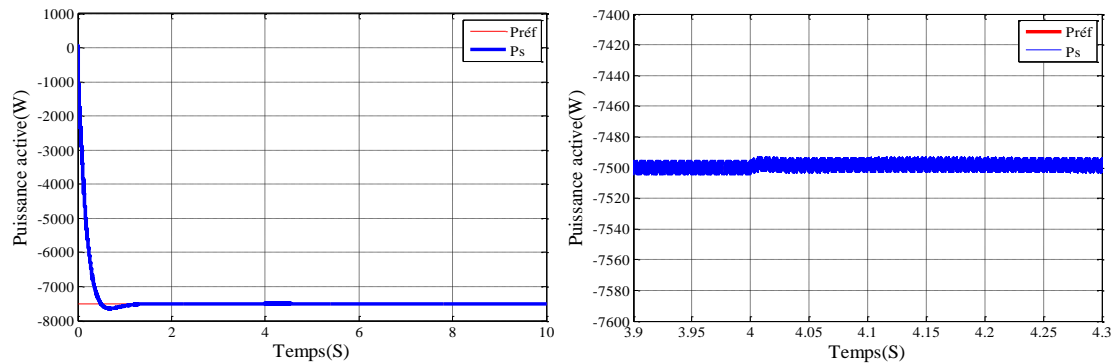


Figure (III-15) : Puissance active.

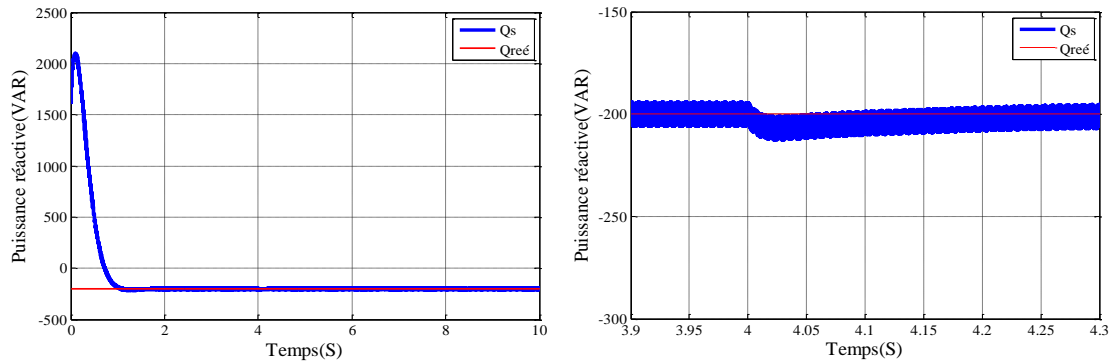


Figure (III-16) : Puissance réactive.

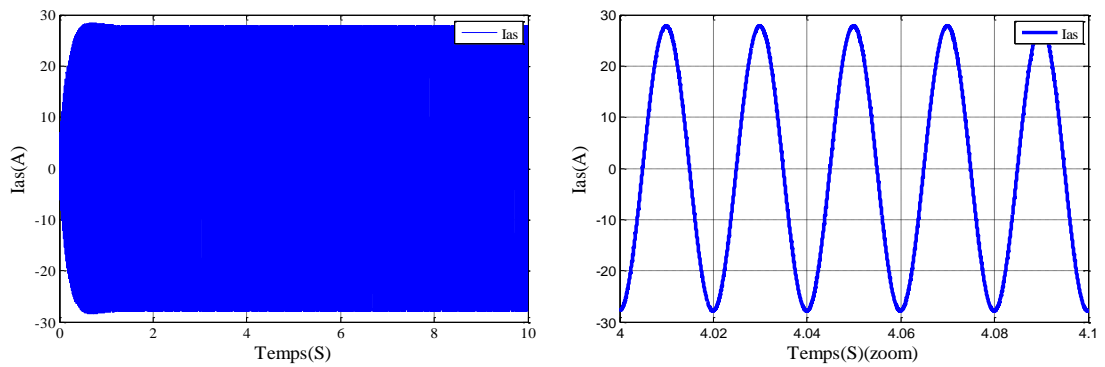


Figure (III-17) : Courant statorique (I_{as}).

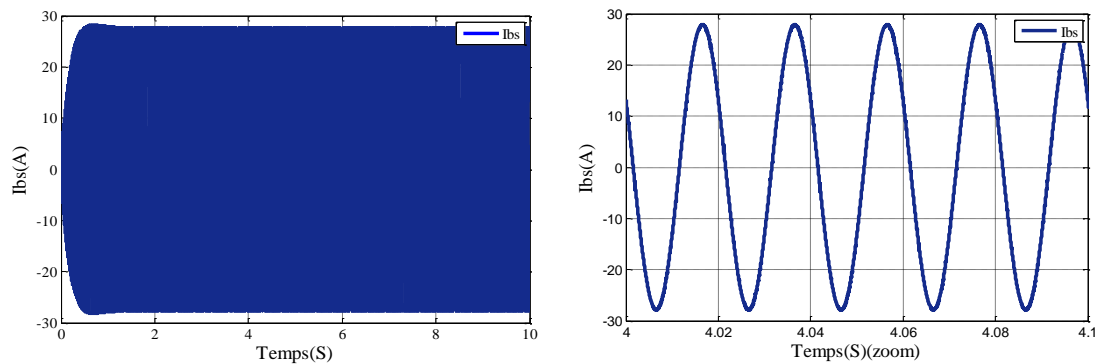


Figure (III-18): Courant statorique (I_{bs}).

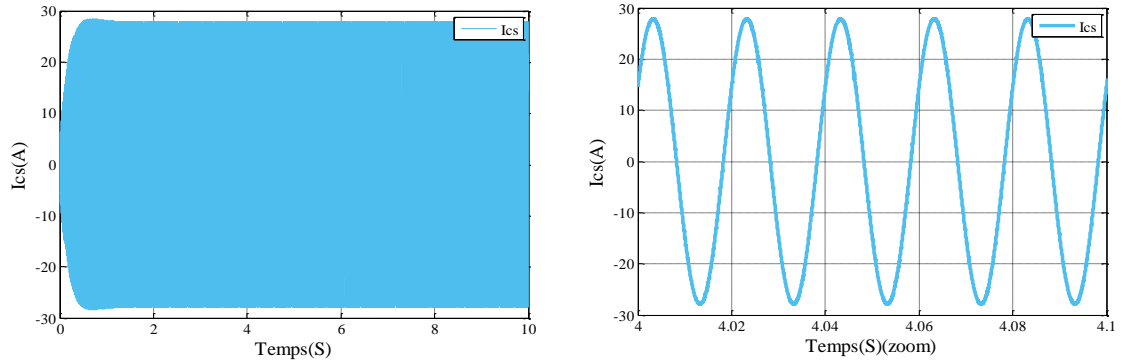


Figure (III-19): Courant statorique (I_{cs}).

III.3.3.4. Interprétations

Les résultats de la simulation mettent en évidence les éléments suivants : Les résultats obtenus illustrent clairement les performances remarquables du contrôle indirect de la puissance active et réactive en utilisant des boucles de puissance. Cette conclusion est appuyée par le parfait découplage observé et la réponse satisfaisante, comme le montrent les figures (III.15) et I(II.16) à une valeur de $P_s = -7500$ W ; $Q_s = -200$ VAR. De plus, on constate une réduction significative des ondulations au niveau de la puissance active et réactive statorique, ce qui entraîne une minimisation des harmoniques. Les figures (III.17, III.18 et III.19) démontrent que les courants au niveau du stator suivent des formes sinusoïdales, avec une nette amélioration avec les valeurs I_{sa} , I_{sb} , $I_{sc} = 29$ A de leur qualité par rapport à ceux obtenus avec la commande directe et l'utilisation d'une source continue telle qu'un groupe de batteries. Il est à noter que la batterie se décharge et se charge rapidement, permettant ainsi de maintenir la tension requise dans Le système.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation et la commande d'un système de conversion éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation (MADA) fonctionnant en mode générateur pour réguler la puissance active et réactive au niveau statorique. Nous avons effectué des simulations du système en ajoutant trois sources continues à travers la sortie de l'onduleur dans l'environnement MATLAB/Simulink.

Il est observé que les résultats obtenus pour le système complet, avec un onduleur alimenté par une source continue, présentent une bonne qualité de signal. Cette expérience démontre que la stabilité de la tension d'un onduleur permet d'obtenir une meilleure qualité de signal grâce à la réduction des harmoniques.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Cette étude présente une analyse détaillée de l'utilisation d'une source d'énergie continue pour alimenter un générateur double alimentation asynchrone dans un système hybride basé sur les énergies renouvelables. De plus, dans ce système hybride, nous avons utilisé l'approvisionnement de la génératrice double alimentation en courant à la fois à partir des éoliennes et des batteries.

Dans **le premier chapitre**, une vue d'ensemble a été donnée sur les différentes sources d'énergie renouvelable utilisées actuellement dans le monde. Une part importante a été consacrée à expliquer les principes de fonctionnement des éoliennes et certains systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisant des générateurs asynchrones. De plus, dans ce chapitre, nous avons abordé les systèmes hybrides d'énergies renouvelables.

Dans **le deuxième chapitre**, nous avons réalisé une modélisation mathématique de la machine double alimentation asynchrone et nous avons appliqué une commande vectorielle pour régler les puissances active et réactive produites par la machine. Ce contrôle permet d'améliorer la production d'énergie électrique en contrôlant de manière indépendante les quantités d'énergie active et réactive. Pour obtenir un système de contrôle efficace, nous avons utilisé les éléments suivants :

- Un régulateur PI (proportionnel-intégral) pour régler les puissances actives et réactives de référence du système.
- Un onduleur MLI triphasé à deux niveaux pour fournir les tensions et les courants nécessaires au fonctionnement de la machine.

Nous avons aussi faire une description sur les batteries et parler aussi sur le type de batteries Ni-MH.

Conclusion générale

Dans le **troisième chapitre**, Le générateur d'une puissance de 7,5 kilowatts a été alimenté par une source d'énergie continue pour la deuxième alimentation. Trois expériences différentes ont été réalisées :

- Alimenter le générateur avec une tension constante,
- Alimenter le générateur avec une tension variable,
- Utiliser une batterie comme source d'alimentation.

Après avoir conçu une simulation simple de la machine sur la plateforme MATLAB/Simulink et appliqué la commande vectorielle, nous avons constaté que le générateur asynchrone fonctionne toujours en adaptation avec la puissance active de référence et la puissance réactive de référence, à condition que la tension absorbée par l'onduleur se situe entre 300 et 350 volts.

Les résultats obtenus après la simulation sont très satisfaisants. De plus, l'idée de fournir une alimentation à une machine à double alimentation à partir de sources d'énergie renouvelables, telles que les batteries dans cette étude, est considérée comme une solution importante face aux interruptions que le réseau peut connaître.

Bibliographie

Les références :

- [1]. Mohammed, BENHIDA. Etude d'un system hybride turbine à gaz générateur éolien connecté au réseau électrique d'Adrar. ADRAR : UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR , 2017.
- [2]. HADDAD, Rachid. Gestion énergétique d'un système hybride éolien-photovoltaïque. TIZI-OUZOU : UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2018.
- [3]. BILAL, Boudy OULD. Mise en œuvre de nouvelles approches d'optimisation multi-objectif de systèmes hybrides éolien-solaire-batterie-groupe électrogène. DAKAR : s.n.
- [4]. eddine, FRADJ Mohammed/MECHERI Khair. Etude et gestion d'un système hybride . Ouargla : s.n., 2019.
- [5]. Hocine, TRAORE Massitan/LABAR. GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVEE CONNECTE AU RESEAU. annaba : s.n., 2017.
- [6]. connaissancesdesenergies. [En ligne] mai 2022. [Citation : 10 mai 2023.] <https://www.connaissancedesenergies.org/>.
- [7]. [En ligne] [Citation : 10 mai 2023.] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.
- [8]. manel, bidi. Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures . msila : s.n., 2019.
- [9]. Lakhdar, Khelfat Lotfi/Maataoui. Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée. 2017.
- [10]. Choukri, DJEBBARI Mohamed Islam/HRARTIA. Etude d'une Station de Pompage. 2019.
- [11]. MAANANI, Abderrafik. Etude d'un échangeur eau-air; utilisation de la. biskra : s.n., 2019/2020.

Références bibliographiques

- [12]. Iskandar, TOUMI Nihed/KOUDA. ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE ET SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME. annaba : s.n., 2020/2021.
- [13]. Anonyme, Contributeur. A propos de Wiki Éolienne. [En ligne] 15 October 2022 . [Citation:24mai2023.]
https://eolienne.f4jr.org/doku.php?id=wiki:a_propos&rev=1665839273.
- [14]. OUAHIBA, BENYAHIA. Analyse des performances d'éoliennes sur un Banc d'essai; Simulation sous ANSYS et SolidWorks. boumerdés : s.n., 2017.
- [15]. Miloud, TEBBAL Abderezzak ET SEKHRI. Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent. jijel : s.n., 2019.
- [16]. Zahra, TRIA Fatma. Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien. biskra : s.n., 2018.
- [17]. Alya, CHATER. Etude et contrôle d'un système hybride éolien-photovoltaïque. tlemcen : s.n., 2022.
- [18]. Kawther, GHOUL. Modélisation et commande d'un système multi-sources (Photovoltaïque - éolienne). tébessa : s.n., 2021/2022.
- [19]. belkacem. Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie d'une source de production décentralisée. oran : s.n., 2019.
- [20]. ABDELKADER, BOUREGAA ABDELKADER/BELAID. Etude et simulation d'une éolienne à base d'une MSAP raccordée au réseau électrique. médéa : s.n., 2020/2021.
- [21]. Fatou, Dione. Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents. annaba : s.n., 2018.
- [22]. Messaoud, MAYOUF. Contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents autonome. m'sila : s.n., 2019/2020.
- [23]. houda, BOREKBA Fatima/BELAZGHEM Nour el. Modélisation et simulation de la pale d'une petite éolienne appliquée au site d'Adrar. adrar : s.n., 2017.

Références bibliographiques

- [24]. —. Modélisation et simulation de la pale d'une petite éolienne appliquée au site d'Adrar . adrar : s.n., 2016/2017.
- [25]. Messaoud, MAYOUF. Contrôle d'un aérogénérateur synchrone à aimants permanents autonome . M'SILA : s.n., 2019/2020.
- [26]. Eddine, Ziraoui Salah. Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau. annaba : s.n., 2017.
- [27]. Lamine, FADDA MOHAMED. ontribution à la modélisation et au diagnostic intelligent des systèmes de production d'énergie électrique à base d'énergies renouvelables. Guelma : s.n., 2017.
- [28]. —. Contribution à la modélisation et au diagnostic intelligent des systèmes de production d'énergie électrique à base d'énergies renouvelables. Guelma : s.n., 2017.
- [29]. wallonie iweps. [En ligne] [Citation : 2023 05 24.] <https://www.iweps.be/>.
- [30]. Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée.
- [31]. SAYAD, Achraf. Etude expérimentale d'un échangeur eau-air dans la région de Biskra ; Utilisation de la géothermie. biskra : s.n., 2019/2020.
- [32]. Achari, nadiaye Papa Amadou et KAWTHER. Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque. Guelma : s.n., 2018/2019.
- [33]. boulegroune, Islam Jab Allah. Etude et réalisation d'une turbine éolienne. biskra : s.n., 2020.
- [34]. Miloud, TEBBAL Abderezzak ET SEKHRI. Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent. jijel : s.n., 2019.
- [35]. houda, BOREKBA Fatima/BELAZGHEM Nour el. Modélisation et simulation de la pale d'une petite éolienne appliquée au site d'Adrar. adrar : s.n., 2016/2017.

Références bibliographiques

- [36]. Pawan : projet d'énergie éolienne inde. *acoact*. [En ligne] <https://eco-act.com/fr/project/gandhi-projet-denergie-eolienne/>.
- [37]. eddine, FRADJ Mohammed/MECHERI Khair. Etude et gestion d'un système hybride. ouargla : s.n., 2019.
- [38]. MEHIBEL, Houssam. Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-diesel-batterie. alger : s.n., 2017.
- [39]. Mehdi., BENBOUABDELLAH Zakaria/HADJAL El. SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME. tlemcen : s.n., 2020.
- [40]. eddine, FRADJ Mohammed/MECHERI Khair. Etude et gestion d'un système hybride. ouargla : s.n., 2019.
- [41]. MINES, MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES. [En ligne] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.
- [42]. eddine, FRADJ Mohammed/MECHERI Khair. Etude et gestion d'un système hybride . Ouargla : s.n., 2019.
- [43]. houda, BOREKBA Fatima/BELAZGHEM Nour el.
- [44]. SIMULATION D'UN SYSTEME HYBRIDE AUTONOME. tlemcen : s.n., 2020.
- [45]. AHLEM, BOUMAZA et ZAHRAA, BOUALI FATIMA. Étude Et Simulation De La Machine Asynchrone Double Alimentée (MADA). Oum El Bouaghi : s.n., 2012.
- [46]. Doeuff, René Le et zaim, Mohammed El-Hadi. Machines électriques tournantes de la modélisation matricielle à la mise en oeuvre. Paris : lavoisier.
- [47]. Abdelghani, CHAHMI. Identification paramétrique de la machine asynchrone dédiée au diagnostic. oran : s.n., 2017.
- [48]. [En ligne] <http://server.idemdito.org/electro/elec/mot/asyn.htm>.

Références bibliographiques

- [49]. El Arabi Rahma, Dahdi Latifa. Commande par mode glissant de MADA utilisé pour la production de l'énergie électrique. Adrar : s.n., 2018.
- [50]. LOUNIS, Mme LOUNNAS Fatma épouse. Contribution à la modélisation et à la commande d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double stator. Tizi Ouzou : Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2021.
- [51]. Labsi Ali, Kenioua Abd El Fateh , Ben Ammar Anouar. Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à double alimentation . ADRAR : s.n., 2021.
- [52]. ZEMMIT, Abderrahim. Contribution à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) par les techniques intelligentes. M'sila : s.n., 2017.
- [53]. Ahmidat Zana, Khoudri Zahra. Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux. Adrar : s.n., 2018.
- [54]. Abla, GUELLADEM et Sirine, KERBOUB. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation (MADA). s.l. : Université de Ghardaïa, 2019.
- [55]. SEDDIK, GHEMAM AMARA, ABDELLATIF, GHEMAM AMARA et ABDELKADER, SADOON. Contrôle des puissance d'un systemé eolien basé sur une MADA. El-Oued : Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2020 .
- [56]. Fares, Mr : MESSAOUDI et Abdellatif, Mr : OUALI. Étude d'une éolienne en fonctionnement autonome à base d'une GADA. Bejaïa : Université A. MIRA Bejaïa, 2019.
- [57]. Tariq, BRAKHLIA et Abderraouf, LAIZI. Commandes en Tension d'un Moteur Asynchrone à Double Alimentation (MADA). M'sila : Université Mohammed Boudiaf -M'sila, 2018/2019.
- [58]. Beltran, Brice, et al. Commande d'une éolienne à base de GADA par modes glissants d'ordre supérieur et observateur grand gain. s.l. : Université de Caen, UMR CNRS 6072 GREYC.
- [59]. Bouchrif Abir, DJebblahi Soumia. Commande d'une Génératrice Asynchrone dans une Chaîne de Conversion d'Énergie. M'sila : université Mohammed Boudiaf , 2019.

Références bibliographiques

- [60]. Cherfia, Naim. Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne. *researchgate*. [En ligne] janvier 2019. [Citation : 16 mai 2023.]
- [61]. AIT ATMANE Sofiane, HAMIDOUCHE Mourad. Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation . Béjaia : Université A.MIRA-BEJAIA, 2019.
- [62]. BOUNADJA , El Hadj . COMMANDE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION EN REGIME SATURE. Chlef : Univ. HBB,Chlef, 2017.
- [63]. Megamez El Mokhtar, Joka Talent. modélisation et identification d'une génératrice asynchrone (GADA). BLIDA : s.n., 2018.
- [64]. *axes transformation*. Taha, Wesam. s.l. : ReaserchGate , 2016.
- [65]. KADI Ahmed Taha, NETTARI Farouk,KHARROUBI Idriss. Modélisation Et Commande De La Génératrice Asynchrone A Double Alimentation . Ouergla : s.n., 2020.
- [66]. ABDSAMMED, Dr.Rachid. *Modélisation et simulation des machines électriques*. Paris,France : ellipses, 2011.
- [67]. Zelaci Samir, Beddi Ayoub , Omran illias. Commande prédictive d'une génératrice asynchrone à double alimentation. El Ouedi : s.n., 2021.
- [68]. Merour Aymen, Boudour Aymen. Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique. Guelma : Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2020.
- [69]. Hamza, MADANI, Brahim, SEGHIERI et ouahab, MAAMRI Abdel. commande sans capteur de la machine asynchrone à double alimentation . s.l. : Université d'EL-Oued , 2020/2021.
- [70]. Tarek, DOUADI. Modélisation et stratégie de Commande de la Génératrice Asynchrone intégrée à un Système Eolien. Batna : Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd, 2018/2019.
- [71]. Oussama, BENKADI et Elhadi, HATTABI Mohammed. Commande vectorielle d'une Machine Asynchrone Double Alimentation (MADA) basée sur les régulateurs PI et la

Références bibliographiques

méthode essaim de particules (PSO). TEBESSA : UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA, 2019 / 2020.

[72]. *Vector control of a Doubly Fed Induction Generator wind turbine*. Jenkal, H., et al. 2214-7858, MAROC : Laboratory of Renewable Energy and Dynamic of Systems University Hassan II, Faculty of Sciences Ain-Chock Casablanca, Morocco, 17 April 2020, Vol. 30.

[73]. Ben kadem Somia, Ben mebarek Dalila. *Commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production d'énergie éolienne*. Adrar : s.n., 2018.

[74]. ASMA, BEN AMAR. *ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA . MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE*. Batna : Université Hadj Lakhdar - Batna.

[75]. Tarek, Douadi. *Modélisation et stratégie de commande de la génératrice asynchrone intégrée à un système eolien*. 2019.

[76]. Thiziri, LARFAOUI et Mourad, ZEBBOUDJ. *Gestion d'un système multi-sources (photovoltaïque-éolien) avec stockage par batteries*. s.l. : Université Abderrahmane Mira de Bejaïa , 2021.

[78]. yazid, Tarfaya et heythem, Siad. *REGLAGE ET STABILISATION DE LA TENSION D'UNE BATTERIE DANS UN SYSTEME PV*. Annaba : s.n., 2019.

[79]. Samia, Melle. SAIB. *Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique*. 2018.

[80]. *Management power of renewable energy in multiple sources system to feeding the rotor of a doubly-fed induction generator*. Mohammed, Kendzi, et al. 2022.

[81]. *MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTEME DE STOCKAGE DANS UNE ALIMENTATION HYBRIDE* . Zakaria, BENBOUABDELLAH et Mehdi, HADJAL El. 2020.

Annexe

Annexe

A.1 Paramètres de la GADA :

Paramètres	Valeur numérique
Puissance nominale P_n	7.5 Kw
Vitesse de synchronisme N_s	1000 tr/min
Tension nominale statorique V_s	220/380 Volt
Fréquence nominale statorique f	50 Hz
Résistance statorique R_s	0.95 Ω
Résistance rotorique R_r	1.8 Ω
Inductance statorique L_s	0.094 H
Inductance rotorique L_r	0.088 H
Inductance mutuelle M	0.082 H
Pulsation rotorique ω_r	290 rad/s
Pulsation statorique ω_s	314.16 rad/s
Glissement g	0.08
Nombre de paires de pôles	2

A.2 Paramètres de l'onduleur :

La fréquence de la porteuse $f_{por}=80000$

La fréquence de la tension de référence $f_{ref} = 100$

$$T = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

La tension d'entrée de l'onduleur : $V_{dc} = 336 \text{ volt}$

A.3 Paramètres de régulateur PI :

K_p	8.58093126e-3
K_i	0.009379

A.3 Paramètres de batteries :

Type de batterie utilisé : Nickel –Metal-Hydride (NiMH).

paramètres	Valeur numérique
Tension de la batterie	44 Volt
Capacité de batterie	8 Ah
SOC initiale	80 %

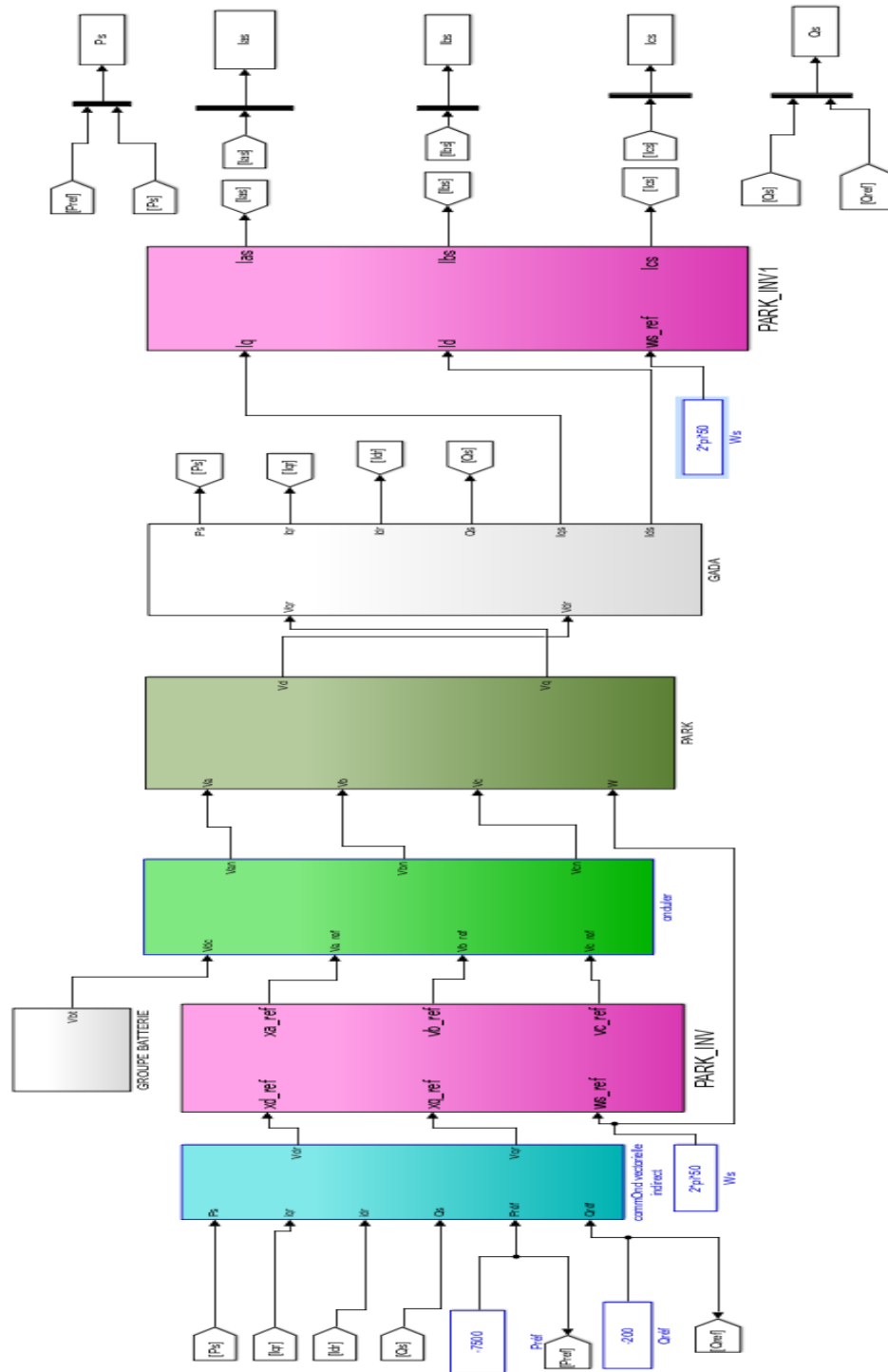


Figure (A.1) : simulation sous MATLAB/SIMULINK.