

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



Université A. MIRA – BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie électrique



## *Mémoire de fin d'études*

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique  
Option : Energie Renouvelable en Électrotechnique

### *Thème*

---

*Contrôle et gestion de l'énergie dans un système  
éolien autonome à base de génératrice  
asynchrone auto-excité*

---

**Réalisé par :**

*Mr : SAHI Amara Ghilas*

**Dirigé par :**

*Mme : BERABEZ Kahina*

*Mr : IDJDARENE Kassa*

***Année Universitaire : 2024/2025***

**Populaire et Démocratique Algérienne République**  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Déclaration sur l'honneur**  
**Engagement pour respecter les règles d'authenticité scientifique dans**  
**l'élaboration d'un travail de recherche**

*Arrêté ministériel n° 1082 du 27 décembre 2020(\*)*  
*fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat*

Je soussigné,

Nom : Sahi  
Prénom : Amara Ghilas  
Matricule : 191933000635  
Spécialité et/ou Option : Energie Renouvelable en Électrotechnique  
Département : Génie Électrique  
Faculté : Technologie  
Année universitaire : 2024/2025

et chargé de préparer un mémoire de (*Licence, Master, Autres à préciser*) : Master

Intitulé : *Contrôle et gestion de l'énergie dans un système éolien autonome à base de génératrice asynchrone auto-excitée*

déclare sur l'honneur, m'engager à respecter les règles scientifiques, méthodologiques, et les normes de déontologie professionnelle et de l'authenticité académique requises dans l'élaboration du projet de fin de cycle cité ci-dessus.

Fait à Béjaïa le  
10/07/2025

Signature de l'intéressé  
(\*) *Lu et approuvé*

×

---

(\*) Arrêté ministériel disponible sur le site [www.univ-bejaia.dz/formation](http://www.univ-bejaia.dz/formation) (rubrique textes règlementaires)



## Remerciements

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الحمد لله رب العالمين، حمدًا يليق بجلاله وعظيم سلطانه، وصلى الله وسلم وبارك على نبينا وإمامنا، وقدوتنا، وقرّة  
أعيننا محمد، وعلى آله وصحبه أجمعين

اللهم لا سهل إلا ما جعلته سهلاً، وأنت تجعل الحزن إذا شئت سهلاً  
ربّ يسّر ولا تعسّر، ربّ تّمّ بالخير، ربّ اشرح لي صدري ويسّر لي أمري، واحلل عقدة من لساني يفقهوا قولي  
اللهم علّمنا ما ينفعنا، وانفعنا بما علّمتنا، وزدنا علماً، وعملاً، وثقّةً، وإخلاصاً، يا رب العالمين

Avant toute chose, je rends grâce à ALLAH, le Tout-Puissant, Le Clément et Le Miséricordieux, source de toute force et de toute inspiration. C'est par Sa volonté et Sa guidance que j'ai pu mener à bien ce travail, aussi modeste soit-il. Que la paix et le salut soient sur le Prophète Muhammad, dernier des messagers, modèle de sagesse et de persévérance.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Mr. Kassa IDJDARENE** et **Mme K. BERABEZ**, pour leur accompagnement inestimable tout au long de ce travail. Leur rigueur scientifique, leur disponibilité et la richesse de leurs conseils ont été des repères essentiels durant mon parcours. Leur patience et leur bienveillance ont été pour moi d'un grand réconfort face aux difficultés rencontrées.

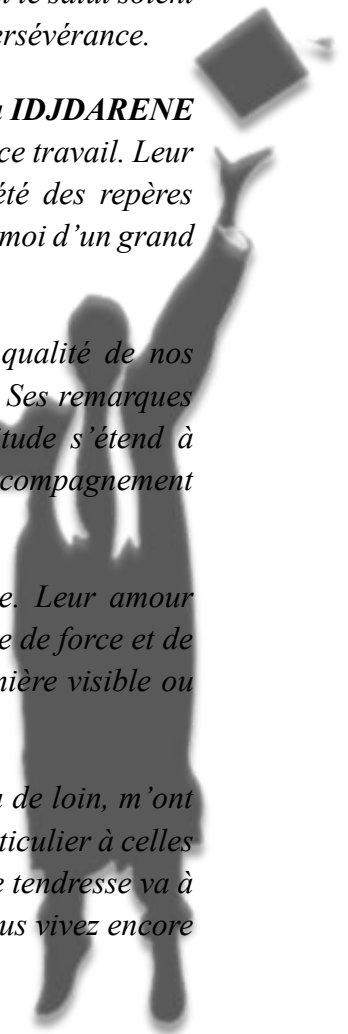
Mes remerciements vont également à **Mme Dj. REKIOUA** pour la qualité de nos échanges et l'attention qu'elle a portée à mon travail durant ces deux années. Ses remarques pertinentes ont largement contribué à faire évoluer ma réflexion, Ma gratitude s'étend à l'ensemble du corps enseignant pour la transmission de leur savoir et leur accompagnement tout au long de ma formation.

Ma gratitude la plus sincère va à mes parents et à toute ma famille. Leur amour inconditionnel, leur soutien constant et leurs prières ont toujours été une source de force et de motivation. Que Dieu les récompense pour tout ce qu'ils m'ont offert, de manière visible ou silencieuse.

Enfin, une pensée reconnaissante à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu tout au long de ce parcours académique et dans ma vie. Je pense en particulier à celles et ceux qui ont été à mes côtés depuis mon plus jeune âge, Une pensée pleine de tendresse va à ceux qui ne sont plus parmi nous. Que Dieu les accueille en Sa miséricorde. Vous vivez encore à travers nos prières et nos souvenirs.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur

~ S. Amara Ghilas ~





## Je dédie le présent travail à

*À ceux qui m'ont tout donné sans rien attendre en retour  
À ceux qui ont cru en moi, même dans mes moments de doute  
À ceux qui m'aiment simplement et sincèrement...*

*À ma chère Maman et à mon cher Papa*

*À mes deux sœurs, étoiles constantes dans mon ciel, lumière douce sur  
mon chemin*

*À mon frère Lyes, dont le soutien et les encouragements m'ont toujours  
portée  
Merci d'être ma force et ma fierté*

*À toute ma famille, proche ou éloignée  
Votre présence bienveillante m'a toujours accompagnée sur ce chemin*

*À mes amis les plus chers  
Merci pour les rires partagés, les conseils sincères, et cette belle amitié  
que rien ne remplace*

*À l'entreprise SIMAFE, SONEGGAZ (TOBAL)  
Pour m'avoir ouvert ses portes, fait confiance et permis de mettre mes  
connaissances en pratique*

*Enfin, à toutes les personnes que j'aime*



*{Liste des Figures et des  
Tableaux}*

# Liste des Figures et des Tableaux

## Liste des Figures

Figure I.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	7
Figure I.2 Principaux composants d'une éolienne .....	7
Figure I.3 Classification des systèmes de conversion de l'énergie éolienne .....	9
Figure I.4 Développement historique des installations totales d'éoliennes (onshore/ offshore) .....	10
Figure I.5 Le compensateur statique SVC .....	15
Figure I.6 Le compensateur statique STATCOM.....	16
Figure I.7 Structure avec pont à diodes et hacheur .....	17
Figure I.8 Configuration avec deux convertisseurs bidirectionnels (redresseur/onduleur).....	18
Figure I.9 Configuration avec un seul convertisseur bidirectionnel (redresseur/onduleur).....	18
Figure I.10 Dispositifs de stockage d'énergie : A) Supercondensateur, B) Batterie, C) SMES .....	20
Figure II.1 Moteur Asynchrone a Cage : Structure et Fonctionnement .....	24
Figure II.2 Représentation des enroulements d'une machine asynchrone triphasée et de son équivalent biphasé via la transformation de Park.....	26
Figure II.3 Redresseur à deux niveaux .....	30
Figure II.4 Auto-amorçage de la génératrice par un redresseur à deux niveaux .....	32
Figure II.5 Schéma bloc de simulation du démarrage du moteur sur réseau .....	34
Figure II.6 Allure des courants statorique de phase .....	35
Figure II.7 L'évolution du couple électromagnétique .....	35
Figure II.8 L'évolution de la vitesse .....	35
Figure III.1 Choix des tensions $V_i$ correspondant au contrôle de l'amplitude du $\Phi_s$ .....	40
Figure III.2 Flux et couple.....	41
Figure III.3 Comparateur à hystérésis du flux à deux niveaux.....	43
Figure III.4 Comparateur à hystérésis de couple à trois niveaux .....	44
Figure III.5 Subdivision du plan ( $\alpha$ , $\beta$ ) en six secteurs pour sélectionner le vecteur tension...	45
Figure III.6 Schéma synoptique du contrôle de SEIG par C-DTC avec un redresseur à deux niveaux .....	48
Figure III.7 Profil de vitesse de rotation.....	50
Figure III.8 Profil de charge .....	50
Figure III.9 La tension redressée ( $V_{dc}$ ).....	50
Figure III.10 L'évolution du flux statorique .....	51
Figure III.11 La trajectoire du flux .....	51
Figure III.12 Les évolutions temporelles du couple électromagnétique .....	51
Figure III.13 Les évolutions temporelles des courants statoriques ( $i_s$ -abc).....	52
Figure IV.1 Schéma fonctionnel de la conversion mécanique.....	58
Figure IV.2 Caractéristique puissance / vitesse de l'éolienne (MPPT) .....	58
Figure IV.3 Modèle mécanique de la turbine l'éolienne avec MPPT .....	59
Figure IV.4 Modèle RC de la batterie .....	61
Figure IV.5 Circuit simplifié du supercondensateur (modèle à deux branches).....	63
Figure IV.6 Schéma de principe du convertisseur DC/DC .....	65

## Liste des Figures et des Tableaux

Figure IV.7 Schéma de boucle de régulation de la tension du bus continu .....	66
Figure IV.8 Organigramme de gestion d'énergie [42] .....	68
Figure IV.9 Schéma globale de système étudié .....	69
Figure IV.10 Allure des puissances .....	72
Figure IV.11 Allure des courants .....	72
Figure IV.12 Etat de charge de la Batterie ( SoCBat ) .....	72
Figure IV.13 Etat de charge de Supercondensateur ( SoCSC ) .....	73
Figure IV.14 Courants de références .....	73
Figure IV.15 Évolution de la tension du bus continu avec zoom .....	74
Figure IV.16 Amplitude du flux statorique .....	74
Figure IV.17 Flux statorique, trajectoire circulaire .....	75
Figure IV.18 Évolution du couple électromagnétique .....	75
Figure IV.19 Profile de la vitesse de rotation .....	75

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 Comparaison entre Génératrices Machines asynchrones (MAS), Machines synchrones à aimants permanents (MSAP), Machines à double alimentation (MADA) .....	12
Tableau III.1 Classification des méthodes du controle DTC .....	39
Tableau III.2 Table de commutation généralisée .....	46
Tableau III.3 Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à deux et trois Niveaux .....	47
Tableau IV.1 Comparaison des différentes caractéristiques entre batteries et supercondensateur .....	60



## Nomenclature

### Abréviations

- AIE : Agence Internationale de l'Énergie ;
- GWEC : Global Wind Energy Council, Conseil Mondial de l'Énergie Éolienne
- MADA : Machine asynchrone à double alimentation ;
- MSAP : Machine synchrone à aimants permanents ;
- DTC-SVM : Contrôle Direct du Couple avec la technique de modulation vectorielle ;
- FOC : Field Oriented Control, technique de commande vectorielle ;
- MOSFET: Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, type de transistor;
- FACTS : Flexible AC Transmission Systems, systèmes de transmission d'énergie alternative ;
- SVC : Static Var Compensator, compensateur statique utilisé pour réguler la tension et améliorer la stabilité du réseau électrique.
- STATCOM : Static Synchronous Compensator, ou compensateur statique d'énergie réactive, ;
- DC : Direct Current, Courant continu ;
- AC : Alternating Current), Courant alternatif
- SOC : State of Charge, état de charge ;
- SOC<sub>Max</sub> Etat de charge maximale ;
- SOC<sub>Min</sub> Etat de charge minimale ;
- PD3 : Redresseur triphasé à trois diodes ;
- MPPT : Maximum Power Point Tracking, Algorithme de l'extraction du maximum de puissance ;





## Liste des symboles

$v_{sabc}$  : Tensions statoriques de la machine ;

$v_{rabc}$  : Tensions rotoriques de la machine ;

$i_{sabc}$  : Courants statoriques ;

$i_{rabc}$  : Courants rotoriques ;

$\varphi_{sabc}$  : Flux statoriques ;

$\varphi_{rabc}$  : Flux rotoriques ;

$R_s, R_r$  : Résistance respectivement statorique, rotorique ;

$L_s, L_r$  : Inductance propre respectivement statorique et rotorique ;

$l_s, l_r$  : Inductance de fuite respectivement statorique et rotorique ;

$L_m$  : Inductance magnétisante statique. ;

$M$  : Inductance mutuelle.

$M_{sr}, M_{rs}$  : Inductances mutuelle entre phases statoriques et rotoriques ;

$P(\theta)$  : La matrice de transformation de Park ;

$\omega_s, \omega_r$  : Pulsation des grandeurs respectivement statoriques, rotoriques ;

$\omega$  : Pulsation de rotation mécanique

$\theta_s$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase "a" du stator ;

$\theta_r$  : L'angle électrique par rapport à l'axe de la phase "a" du rotor ;

$\theta$  : L'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique ;

$V_{sd}, V_{sq}$  : Composantes directe et de quadrature de la tension statorique ;

$V_{rd}, V_{rq}$  : Composantes directe et de quadrature de la tension rotorique ;

$i_{sd}, i_{sq}$  : Composantes directe et de quadrature de courant statorique ;

$i_{rd}, i_{rq}$  : Composantes directe et de quadrature de courant rotorique ;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  : Composantes du vecteur de courant statorique ;

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$  : Composantes du flux statorique dans le repère d, q ;

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  : Composantes du flux rotorique dans le repère d, q ;

## Nomenclature



- $\Phi_{s0}$  : Vecteur flux à l'instant  $t=0$  ;
- $\Phi_{s\alpha}, \Phi_{s\beta}$  : Composantes du flux rotorique
- $S_{xi}$  : fonction de connexion ;
- $v_{ao}, v_{bo}, v_{co}$  : Les trois tensions phases-point milieu ;
- $v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}$  : Les tensions composées entre phases ;
- $v_{s\alpha}, v_{s\beta}$  : Composantes du vecteur de tension dans le repère  $\alpha, \beta$  ;
- $V_{dc}$  : Tension de bus continu ;
- $i_{dc}$  : Courant continue ;
- $i_R$  : Courant de la charge résistive ;
- $E$  : Tension initiale aux bornes du condensateur ;
- $R$  : Résistance vue du côté continu ;
- $r_b$  : Résistance interne de la batterie ;
- $i_{c1}, i_{c2}$  : Courants des condensateurs dans le bus continu ;
- $P$  : Nombre de paires de pôles ;
- $S$  : Opérateur de Laplace.
- $T_{em}$  : Couple électromagnétique ;
- $T_{em-ref}$  : Couple électromagnétique de référence ;
- $V_{dc-ref}$  : Tension de bus continu de référence ;
- $T_e$  : Période de commande ;
- $\Delta\Phi_s$  : Erreur du flux ;
- $\Delta T_{em}$  : Erreur du couple ;
- $\theta_s$  : Angle de position du flux statorique ;
- $\Phi_{s-ref}$  : Flux statoriques référence ;
- $\Phi_{s-nom}$  : Flux rotorique nominal ;
- $\omega_{nom}$  : Vitesse de synchronisme ;
- $P_t$  : Puissance de la turbine ;
- $C_p$  : Coefficient de puissance ;

## Nomenclature



$\lambda$  : vitesse relative de la turbine ;

$\lambda_{opt}$  : Vitesse relative optimale ;

$\rho$  : Densité de l'air ;

$S$  : Surface des pales ;

$v$  : Vitesse du vent ;

$\Omega_t$  : Vitesse à l'extrémité des pales de la turbine ;

$R_t$  : Rayon de la turbine éolienne ;

$T_m$  : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$G$  : Gain du multiplicateur de vitesse ;

$\Omega$  : Vitesse mécanique de la génératrice ;

$J_t$  : Moment d'inertie pour le rotor de la turbine ;

$J_g$  : Moment d'inertie pour le rotor du générateur ;

$f$  : Coefficient de frottement dynamique ;

$T_t$  : Couple exercé par la turbine ;

$V_{bat}$  : Tension de la batterie ;

$i_{bat}$  : Courant de la batterie

$C_b$  : Capacité interne de la batterie ;

$R_i$  : Résistance interne de la batterie ;

$Q_d(t)$  : Charge électrique stockée dans la batterie à un instant donné  $t$  (Ah).

$C_b$  : Capacité nominale de la batterie (Ah) ;

$C_1$  : Capacité principale (différentielle) du supercondensateur (F) ;

$U_{sc}$  : Tension de supercondensateur (V) ;

$i_{sc}$  : Courant de supercondensateur (A) ;

$V_{SC}$  : Tension mesurée aux bornes d'un supercondensateur élémentaire (V) ;

$N_p$  et  $N_s$  : nombre de branches parallèles et en série des connexions des supercondensateurs ;

$\alpha$  : rapport cyclique ;

$i_{Ch}$  : Courant de charge ;

$i_{Eol}$  : Courant généré par l'éolienne ;

## *Nomenclature*

$i_{F-ref}$  : Courant filtre de référence ;

$i_{SC-ref}$  : Courant supercondensateur de référence

$i_{Bat-ref}$  : Courant batterie de référence



*{Sommaire}*

# Sommaire

## Table des matières

Liste des Figures et des Tableaux.....	I
Nomenclature .....	III
Introduction Générale.....	2

### *Chapitre I*

#### *Système de Conversion de l'Énergie Éolienne : État de l'Art*

I.1 Introduction.....	5
I.2 Contexte et enjeux de l'énergie éolienne.....	5
I.3 Principes de conversion de l'énergie éolienne.....	6
I.3.1 Descriptif de système éolien .....	6
I.3.3 Chaîne de conversion d'énergie .....	7
I.4 Typologie des éoliennes et technologies associées .....	8
I.4.1 Classification des éoliennes .....	9
I.4.2 Contrôle des systèmes éoliens.....	10
I.5 Divers types de générateurs dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne.....	11
I.6 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome.....	12
I.7 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil .....	13
I.8 Auto-amorçage de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	14
I.8.1 Configurations basées sur générateurs de puissance réactive .....	14
I.8.1.1 Compensateur Statique SVC (Static Var Compensation).....	14
I.8.1.2 STATCOM.....	15
I.8.2 Configuration avec convertisseur statique .....	16
I.8.2.1 Configuration avec convertisseur unidirectionnel.....	16
I.8.2.2 Configuration avec un convertisseur statique bidirectionnel.....	17
I.9 Systèmes de stockage d'énergie éolienne.....	19
I.9.1 Classification selon la technologie de stockage utilisée.....	19
I.9.2 Classification selon la fonction dans le système éolien .....	20
I.9.3 Classification selon la localisation dans le système .....	20
I.10 Conclusion .....	21

# Sommaire

## Chapitre II

### *Modélisation de l'Ensemble - MAS-Convertisseur Statique*

II.1 Introduction.....	23
II.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil.....	23
II.3 Modélisation de la machine asynchrone.....	24
II.3.1 Équations générales de la machine asynchrone .....	25
II.3.1.1 Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire .....	26
II.3.1.2 La transformation de Park .....	27
II.4 Le Convertisseur statique .....	29
II.4.1 La Réversibilité de fonctionnement des onduleurs .....	29
II.4.2 Redresseur à deux niveaux.....	30
II.4.2.1 Structure générale d'un redresseur à deux niveaux .....	30
II.4.2.2 Modélisation de redresseur à deux niveaux .....	31
II.5 Dispositif d'Auto-Amorçage .....	32
II.5.1 Auto-amorçage avec convertisseur statique et batterie .....	32
II.5.2 Modèle Mathématique du Dispositif d'Auto-Amorçage .....	32
II.6 Résultat des simulations en fonctionnement moteur avec le modèle linéaire .....	34
II.7 Conclusion .....	36

## Chapitre III

### *Contrôle Direct du Couple de la Génératrice Asynchrone Auto-Excitée*

III.1 Introduction .....	38
III.2 Principe de base de la commande DTC.....	38
III.3 Principe de sélection du vecteur de tension optimal par la DTC .....	40
III.4 Estimateur du flux statorique et du couple électromagnétique .....	41
III.4.1 Estimateur du flux statorique.....	42
III.4.2 Estimateur du couple électromagnétique.....	42
III.5 Régulateurs à hystérésis de couple et de flux .....	43
III.5.1 Comparateur à hystérésis du flux à deux niveaux .....	43
III.5.2 Comparateur à hystérésis du couple à trois niveaux.....	44
III.6 Détermination du secteur angulaire.....	45
III.7 Choix du vecteur de tension .....	45
III.8 Élaboration de la table de commutation .....	46
III.9 Structure générale de l'algorithme de commande DTC appliqué à cage d'écureuil.....	47

## Sommaire

III.10 Résultats de Simulation de la DTC et Interprétation.....	49
III.11 Conclusion .....	53

### *Chapitre IV*

#### *Gestion de Stockage Hybride dans un Système Éolien Autonome*

IV.1 Introduction .....	55
IV.2 Description de système étudiée .....	55
IV.3 Modélisation aérodynamique et mécanique d'éolienne .....	56
IV.4 Stratégies d'extraction optimale de la puissance éolienne .....	58
IV.5 Système de stockage par batterie et Supercondensateur .....	60
IV.5.1 Stockage par batterie .....	61
IV.5.2 Modélisation de la batterie .....	61
IV.5.3 Stockage par Supercondensateur .....	62
IV.5.4 Modélisation de supercondensateur .....	63
IV.6 Modélisation de l'hacheur .....	64
IV.7 Gestion et contrôle de l'énergie de système étudiée .....	65
IV.7.1 Régulation de la tension du bus continu.....	65
IV.7.2 Algorithme de gestion de l'énergie.....	66
IV.8 Résultats de simulation .....	68
IV.9 Conclusion .....	76
Conclusion générale .....	78



*{Introduction Générale}*

## Introduction Générale

### Introduction Générale

Depuis la révolution industrielle, la consommation mondiale d'énergie électrique ne cesse d'augmenter, répondant aux besoins croissants des secteurs résidentiel, industriel et technologique [1]. À ce jour, une grande partie de cette énergie provient encore des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), dont l'exploitation intensive engendre deux problématiques majeures : l'épuisement progressif de ces ressources non renouvelables et l'aggravation des problèmes environnementaux, notamment à travers l'émission de gaz à effet de serre [2].

Face à ces enjeux énergétiques et climatiques, les énergies renouvelables apparaissent comme une alternative durable, propre et inépuisable. Parmi elles, l'énergie éolienne se distingue par son fort potentiel de développement à l'échelle mondiale. Elle repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique à l'aide d'une turbine, puis en électricité via un générateur. Les technologies de conversion éolienne font appel principalement à deux types de machines électriques : les machines synchrones et les machines asynchrones [3] [4].

Dans les systèmes autonomes, c'est la machine asynchrone triphasée à cage d'écureuil qui est la plus répandue, en raison de sa simplicité, de sa robustesse et de son faible coût [5]. Toutefois, son principal inconvénient réside dans son besoin en puissance réactive, qui doit être fourni soit par le réseau, soit par des moyens de compensation adaptés tels que des batteries de condensateurs, notamment en mode de fonctionnement isolé.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent travail, qui porte sur l'étude et l'évaluation des performances d'une génératrice asynchrone auto-excitée (Self-Excited Induction Generator - SEIG) entraînée par une éolienne à vitesse variable en mode autonome. L'objectif est d'analyser le comportement de cette génératrice en l'absence de connexion au réseau électrique, dans un système destiné à alimenter une charge isolée. Ce type de configuration soulève plusieurs défis, notamment en matière de stabilité, de régulation de tension et d'adaptation aux variations de la vitesse du vent et de la charge. Pour y faire face, notre étude propose une stratégie de commande visant à améliorer l'efficacité et la fiabilité de la conversion d'énergie.

## Introduction Générale

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre introduit les principes fondamentaux de l'énergie éolienne, les types d'éoliennes, la composition d'une éolienne à axe horizontal et les architectures autonomes basées sur les machines asynchrones à cage d'écureuil.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation analytique de la machine asynchrone à cage et à la simulation de son comportement en régime à vide. L'étude couvre les modes moteur et génératrice, et inclut également la modélisation du redresseur à deux niveaux ainsi que le système d'auto-excitation.

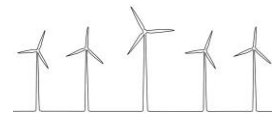
Le troisième chapitre traite du contrôle d'une génératrice asynchrone couplée à un redresseur commandé. L'objectif est de maintenir une tension continue stable en sortie, malgré les fluctuations de la vitesse du vent et de la charge. Pour cela, la stratégie de commande directe du couple (DTC) est mise en œuvre afin d'assurer une régulation efficace de la tension DC, du flux statorique et du couple électromagnétique.

Enfin, le quatrième chapitre présente une étude approfondie d'une chaîne de conversion éolienne autonome intégrant un système de stockage hybride composé de batteries et de supercondensateurs. L'objectif est d'optimiser la gestion énergétique du système via une stratégie de régulation du bus DC et un algorithme de gestion intelligent, garantissant ainsi la stabilité du système dans différentes conditions de fonctionnement.

Ce mémoire vise ainsi à contribuer au développement de solutions de production électrique renouvelable fiables et autonomes, adaptées aux zones isolées ou aux applications décentralisées, dans un contexte de transition énergétique durable.

# *{Chapitre I}*

## *Système de Conversion de l'Énergie Éolienne : État de l'Art*



## **Chapitre I**

### ***Système de Conversion de l'Énergie Éolienne : État de l'Art***

#### **I.1 Introduction**

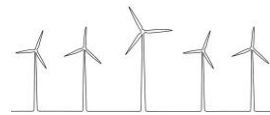
L'énergie éolienne, exploitée grâce à des systèmes de conversion mécaniques et électriques avancés, contribue aujourd'hui à plus de 6 % de la production mondiale d'électricité. Depuis 2015, elle connaît une croissance soutenue d'environ 10 % par an (AIE, 2023). Selon le GIEC, cette source d'énergie se distingue par une compétitivité économique en nette progression, notamment grâce à une réduction de près de 70 % du coût du kilowattheure depuis 2010, ce qui place l'éolien parmi les solutions énergétiques les plus rentables à l'échelle mondiale [3].

Les avancées technologiques ont considérablement amélioré l'efficacité des éoliennes, tant sur le plan de leur conception que de leurs performances. Grâce aux outils de modélisation et de simulation sophistiqués, il est désormais possible d'optimiser l'implantation des éoliennes en fonction des conditions locales, maximisant ainsi leur rendement énergétique. Par ailleurs, les petites éoliennes gagnent en popularité dans les applications autonomes, soutenues par des politiques incitatives favorables à leur développement. Ces progrès contribuent à renforcer le rôle de l'énergie éolienne dans la transition vers une production d'énergie plus propre, durable [4].

L'objectif de ce premier chapitre est de fournir un état de l'art sur l'énergie éolienne, en mettant en évidence son potentiel, ses caractéristiques principales, ainsi que les enjeux liés à son exploitation. Il vise également à présenter les différentes chaînes de conversion utilisées pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, en décrivant les principales configurations technologiques et les composants intervenant dans le processus de conversion.

#### **I.2 Contexte et enjeux de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne occupe une place essentielle dans la transition énergétique mondiale en tant que source renouvelable propre, capable de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de limiter la dépendance aux énergies fossiles. En plus de son rôle dans les réseaux interconnectés, son utilisation en fonctionnement isolé représente une solution stratégique pour l'électrification des zones éloignées non raccordées au réseau. Ces systèmes autonomes permettent une production locale d'électricité durable, mais soulèvent des défis techniques



importants : l'intermittence de la ressource, la stabilité de la tension et de la fréquence, ainsi que l'intégration efficace des systèmes de stockage. Ainsi, pour tirer pleinement parti du potentiel de l'énergie éolienne, il est nécessaire de développer des solutions robustes garantissant la fiabilité et la continuité de l'approvisionnement, tant dans les réseaux centralisés que dans les systèmes isolés [3] [4].

## I.3 Principes de conversion de l'énergie éolienne

### I.3.1 Descriptif de système éolien

Comprendre le fonctionnement global d'un système éolien est essentiel avant d'aborder en détail le processus complexe de conversion de l'énergie cinétique du vent en électricité. Ce processus technique nécessite une coordination rigoureuse entre plusieurs composants, depuis le rotor qui capte l'énergie du vent, jusqu'au générateur et aux systèmes électroniques de puissance qui assurent la transformation finale.

Le vent, ressource naturelle abondante, propre et inépuisable, est généré par les variations de pression atmosphérique et de température dues au réchauffement inégal de la surface terrestre par le Soleil ainsi qu'à la rotation de la Terre. Ces phénomènes créent des mouvements d'air capables de transporter une énergie significative.

Lorsque le vent souffle, il actionne les pales aérodynamiques du rotor, généralement fabriquées en fibre de verre ou en matériaux composites et fixées à un moyeu central. Leur rotation entraîne l'arbre principal relié au rotor, produisant ainsi de l'énergie mécanique. Cette énergie est transmise via un système de transmission comprenant souvent un multiplicateur de vitesse, qui adapte la faible vitesse des pales à une vitesse supérieure requise par le générateur.

Le générateur, situé dans la nacelle au sommet du mât, transforme ensuite cette énergie mécanique en énergie électrique par induction électromagnétique [4] [5].

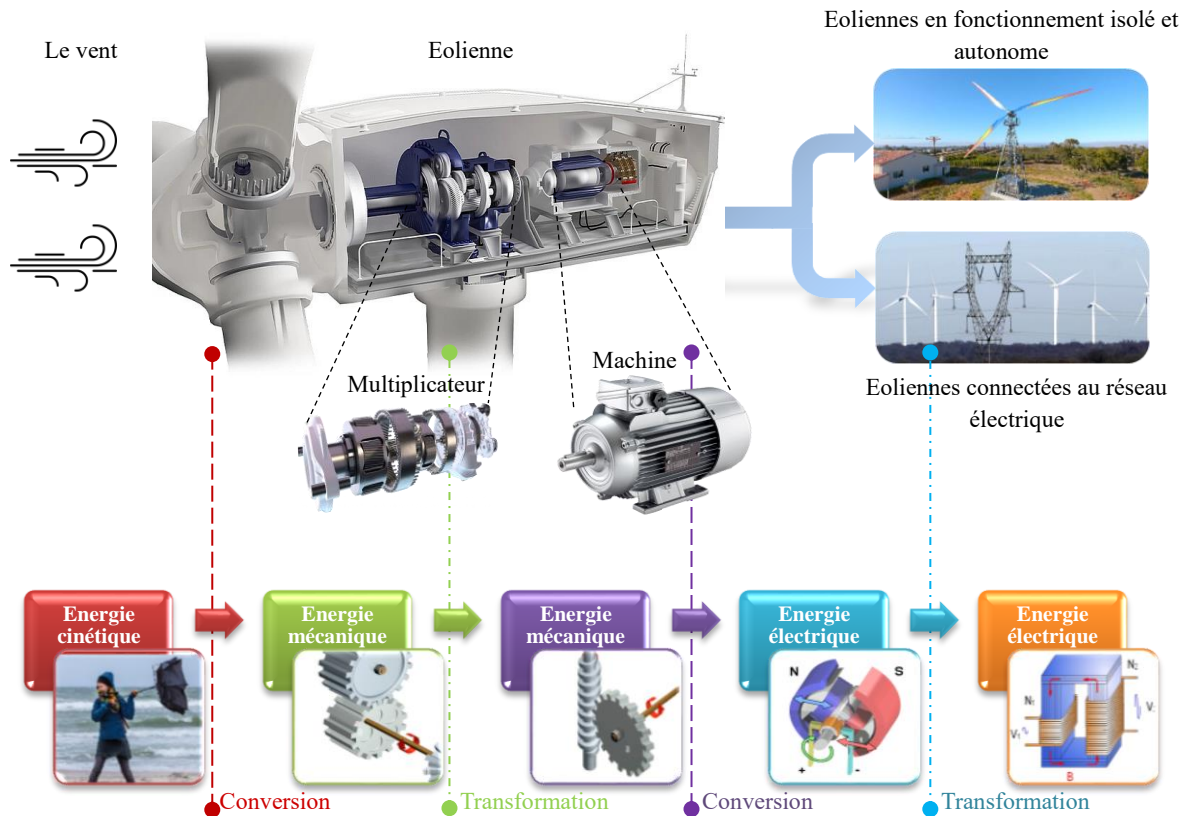
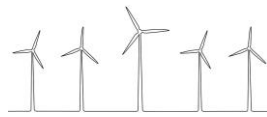


Figure I.1 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

### I.3.3 Chaîne de conversion d'énergie

L'énergie cinétique du vent est convertie en électricité par une chaîne de conversion composée de plusieurs composants clés :

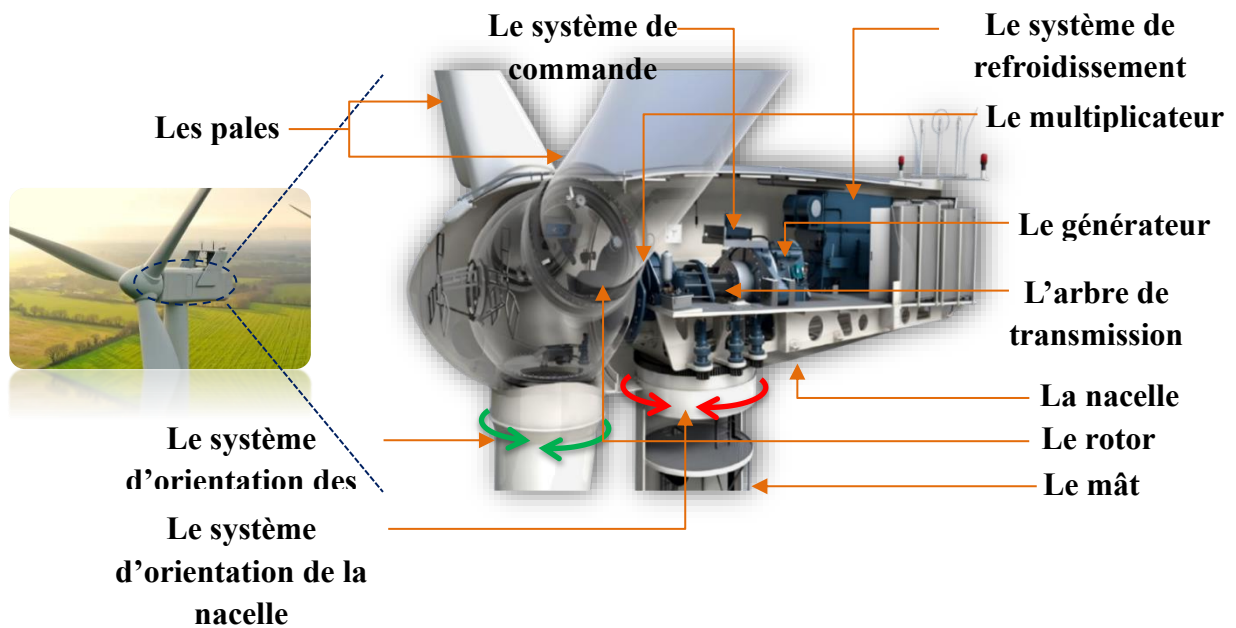
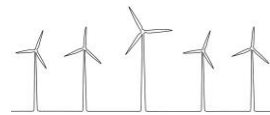


Figure I.2 Principaux composants d'une éolienne



**Le mât :** C'est la structure verticale qui supporte toute l'éolienne. Il est généralement en acier ou en béton, et sa hauteur varie selon la taille de la turbine. En plus de maintenir la nacelle et le rotor en hauteur, il héberge les câbles électriques reliant la nacelle au sol.

**Le rotor :** Composé des pales et du moyeu, le rotor est la partie tournante de l'éolienne. C'est lui qui capte l'énergie cinétique du vent. Les pales, profilées comme des ailes d'avion, sont conçues pour maximiser cette captation en tournant sous l'effet du vent.

**Les pales :** Fixées au moyeu, elles transforment l'énergie du vent en un mouvement rotatif. Elles sont fabriquées en matériaux composites légers et résistants, comme la fibre de verre, pour garantir performance et durabilité.

**La nacelle :** Installée au sommet du mât, elle contient les composants mécaniques et électriques principaux :

- Le générateur : convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Le multiplicateur de vitesse : augmente la vitesse de rotation transmise par les pales pour l'adapter au générateur.
- Le système de refroidissement : empêche la surchauffe des composants.
- Le système de commande : surveille le bon fonctionnement de l'éolienne et gère les arrêts en cas de problème.
- L'arbre de transmission : transmet le mouvement du rotor vers le générateur.

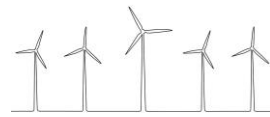
**Le système d'orientation de la nacelle :** Il permet à la nacelle de tourner horizontalement pour toujours faire face au vent. Cette rotation est assurée par des moteurs électriques et un engrenage circulaire.

**Le système d'orientation des pales (pitch control) :** Il permet d'ajuster l'angle des pales pour optimiser la production d'énergie en fonction de la force du vent, et aussi pour protéger l'éolienne en cas de vents trop forts [4] [5].

## I.4 Typologie des éoliennes et technologies associées

Différentes formes d'éoliennes existent selon leur structure, technologie et mode de fonctionnement. Comprendre ces variantes ainsi que les génératrices et solutions de stockage permet d'optimiser leur efficacité et leur intégration au réseau électrique.





### I.4.1 Classification des éoliennes

La diversité des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, fruit de nombreuses évolutions technologiques, se traduit par une large gamme de caractéristiques techniques et de performances adaptées à diverses applications. Leur classification permet d'organiser cette variété en catégories cohérentes, facilitant l'analyse comparative et la sélection des solutions optimales. La figure suivante présente une classification courante de ces systèmes [4] [5].

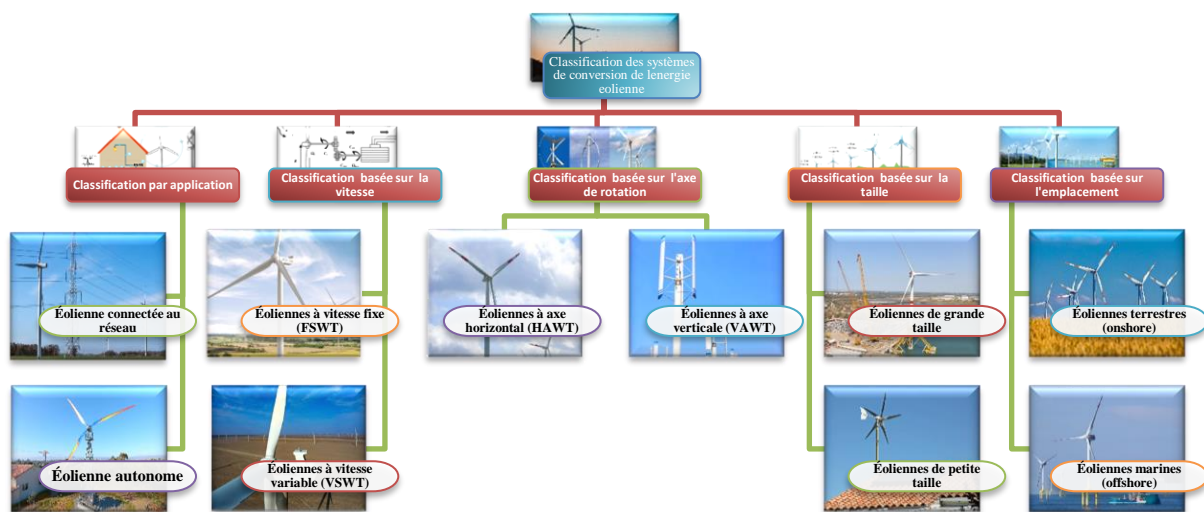


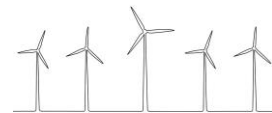
Figure I.3 Classification des systèmes de conversion de l'énergie éolienne

- **Classification basée sur la taille**

Les éoliennes se divisent en deux catégories principales en fonction de leur taille. Les éoliennes de petite taille ont une capacité allant de quelques kW et sont souvent utilisées pour des applications décentralisées telles que les maisons, les fermes et les petites communautés. En revanche, les éoliennes de grande taille peuvent générer des centaines de kW à plusieurs MW et sont intégrées dans des parcs éoliens connectés au réseau électrique.

- **Classification basée sur l'axe de rotation**

Il existe deux types d'éoliennes basées sur l'orientation de leur axe de rotation. Les HAWT (à axe horizontal) ont leur rotor parallèle au sol, avec des pales tournant autour d'un moyeu horizontal. Elles sont couramment utilisées et efficaces. Les VAWT (à axe vertical), avec des configurations comme Darrieus, Savonius et Giromill, ont leur rotor perpendiculaire au sol. Adaptées aux zones urbaines, elles offrent une flexibilité accrue dans leur implantation.



- **Classification basée sur l'emplacement**

Les éoliennes peuvent être installées soit offshore, en mer sur des plates-formes fixes ou flottantes, bénéficiant de vents forts et constants mais avec des coûts d'installation élevés. Les éoliennes onshore, installées sur terre, sont moins coûteuses à installer et dominent largement le marché en raison de leur accessibilité et de leurs coûts réduits.

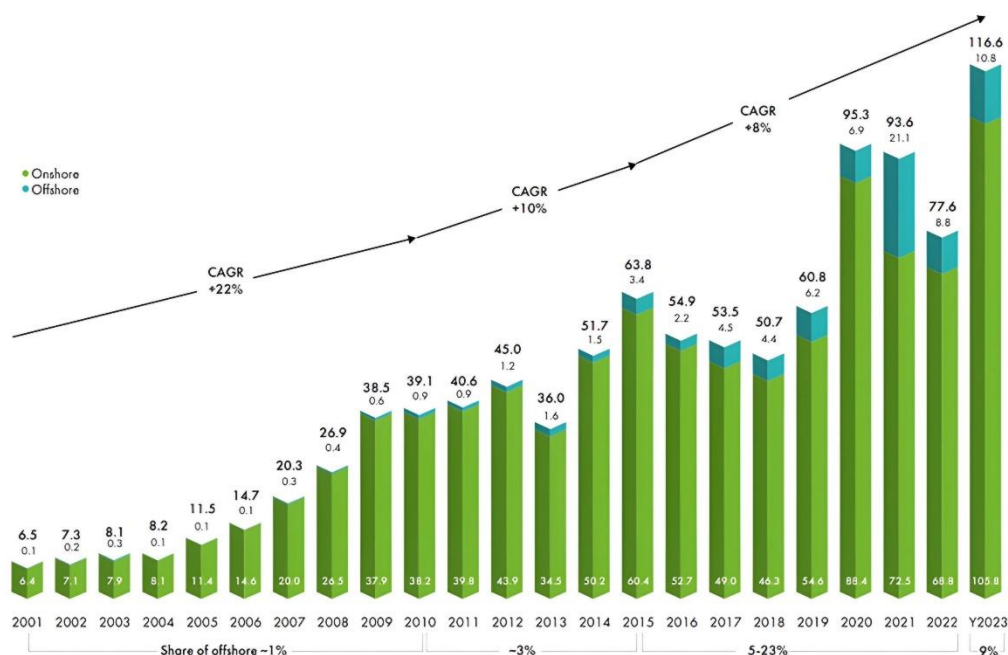


Figure I.4 Développement historique des installations totales d'éoliennes (onshore/ offshore)

- **Classification basée sur l'application**

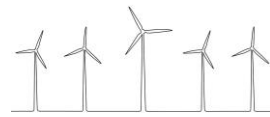
En fonction de leur connexion au réseau électrique, les éoliennes peuvent être classées comme connectées au réseau, injectant l'électricité produite directement dans le réseau pour une alimentation à grande échelle. D'autres sont autonomes, fonctionnant hors réseau et combinées à des systèmes de stockage comme des batteries, adaptées pour les zones isolées.

- **Classification basée sur la vitesse de fonctionnement**

Enfin, les éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe, avec une rotation constante qui peut être moins efficace lorsque le vent varie. À l'inverse, les éoliennes à vitesse variable adaptent leur rotation en fonction des conditions du vent, offrant une efficacité optimisée dans diverses conditions météorologiques.

## I.4.2 Contrôle des systèmes éoliens

L'exploitation optimale de l'énergie éolienne repose sur une conversion efficace de l'énergie mécanique du vent en énergie électrique, nécessitant des stratégies de contrôle



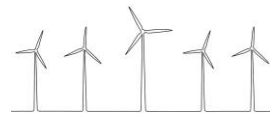
adaptées aux variations de vitesse du vent. Une éolienne démarre généralement sa production électrique à partir de 3,5 à 4 m/s et s'arrête automatiquement au-delà de 25 m/s pour éviter tout dommage [6].

Le contrôle des systèmes éoliens joue un rôle fondamental dans l'optimisation de la conversion de l'énergie du vent en énergie électrique. Il vise à maximiser la puissance extraite du vent tout en assurant la stabilité, la fiabilité et la qualité de l'énergie produite, quelles que soient les variations des conditions météorologiques ou de la charge. Ce contrôle s'effectue à plusieurs niveaux : la régulation aérodynamique (par le pas variable des pales), le suivi du point de puissance maximale (MPPT), le contrôle côté machine (génératrice) et le contrôle côté réseau (onduleur, tension, fréquence). Des algorithmes intelligents et des techniques avancées comme la commande directe du couple (DTC), la commande vectorielle ou les systèmes à logique floue sont souvent employés pour améliorer les performances dynamiques et énergétiques. Ainsi, un système de contrôle performant est indispensable pour garantir une exploitation efficace et durable de l'énergie éolienne, notamment dans les configurations autonomes ou hybrides [4] [6] [7].

### **I.5 Divers types de générateurs dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne**

Dans un système de conversion de l'énergie éolienne, le générateur (machine électrique) joue un rôle central en convertissant l'énergie mécanique captée par le rotor en énergie électrique. Selon la configuration du système et les stratégies de contrôle adoptées, différents types de générateurs peuvent être utilisés. Les plus couramment employés sont les machines asynchrones (MAS), les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et les machines à double alimentation (MADA). Le choix de la technologie dépend de plusieurs facteurs, notamment le coût, la complexité de commande, la plage de fonctionnement en vitesse variable et le rendement. Une étude comparative permet de mieux cerner les avantages et inconvénients de chaque type de génératrice, tant sur le plan technique qu'économique [8].

La MAS est la plus simple et économique, fonctionnant sans aimants permanents ni convertisseur sophistiqué, ce qui limite les coûts et la maintenance. Cependant, son rendement est moyen et sa plage de vitesse restreinte, la rendant adaptée aux petites éoliennes ou générateurs standards.



La MSAP offre un rendement élevé grâce à l'utilisation d'aimants puissants, supprimant les pertes d'excitation, avec une large plage de vitesse via convertisseur de fréquence. Elle convient aux applications exigeantes comme l'éolien offshore, bien que son coût et la complexité de sa commande soient élevés.

La MADA représente un compromis entre performance et coût. Avec un rotor alimenté par bagues collectrices et convertisseur, elle permet une régulation fine de la vitesse au-delà de la synchronisation, adaptée aux éoliennes terrestres. Sa maintenance est plus fréquente en raison de sa complexité et de la présence de balais.

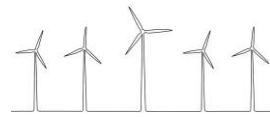
En somme, le choix entre MAS, MSAP et MADA dépend du contexte : la MAS privilégie simplicité et coût, la MSAP performance et efficacité, tandis que la MADA équilibre ces aspects pour des systèmes à vitesse variable avec une maintenance accrue [5] [8] [9] [10] [11].

Tableau I.1 Comparaison entre Génératrices Machines asynchrones (MAS), Machines synchrones à aimants permanents (MSAP), Machines à double alimentation (MADA)

Critère	MAS	MSAP	MADA
Coût	Faible	Élevé (aimants coûteux)	Moyen (convertisseurs coûteux)
Complexité de commande	Faible à moyenne	Moyenne à élevée	Élevée
Rendement	Moyen	Très bon	Bon
Plage de vitesse	Limitée (avec boîte de vitesses)	Large (si couplée à un convertisseur)	Large (grâce au rotor alimenté)
Maintenance	Faible	Faible (pas de balais)	Moyenne à élever (balais + convertisseurs)
Utilisation typique	Petites éoliennes, génératrices simples	Éolien offshore, moteurs haut rendement	Éolien terrestre, systèmes à vitesse variable

## I.6 Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome

Les éoliennes autonomes sont fréquemment au cœur de projets de recherche et de développement visant à optimiser leurs performances dans diverses applications industrielles. Elles sont notamment utilisées dans les stations de pompage d'eau, les systèmes de



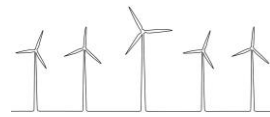
télécommunication, les stations météorologiques ou encore les plateformes de surveillance. En fournissant une source d'électricité fiable et renouvelable, ces systèmes contribuent significativement à l'amélioration des conditions de vie dans les zones isolées. Par ailleurs, les petits systèmes éoliens se distinguent par une conception plus simple de leurs composants, en comparaison avec les éoliennes de grande puissance [4] [12].

Dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne en fonctionnement autonome, l'alimentation électrique est généralement assurée sous forme triphasée en courant alternatif, avec des niveaux de tension et de fréquence constants. Pour répondre à ces exigences, deux principaux types de générateurs sont utilisés : les machines synchrones à aimants permanents et les machines asynchrones (MAS et MADA). Les générateurs synchrones, bien que performants, présentent des inconvénients notables tels qu'un coût plus élevé et une structure mécanique plus complexe. Ils sont cependant adaptés aux éoliennes à vitesse variable, grâce à leur capacité à maintenir une fréquence stable, indépendamment des variations de vitesse du rotor. En revanche, les générateurs asynchrones, en particulier ceux à cage d'écureuil, sont souvent privilégiés pour les applications autonomes, notamment en milieu isolé. Leur simplicité de conception, leur robustesse, leur faible coût de fabrication et leur facilité d'entretien en font une solution fiable et économique. Ces caractéristiques les rendent particulièrement adaptés aux systèmes décentralisés, où la maintenance et les ressources techniques sont limitées [12].

Le fonctionnement isolé désigne un système non raccordé au réseau électrique, situé généralement dans des zones reculées. En revanche, le fonctionnement autonome met l'accent sur la capacité du système à produire et gérer seul son énergie, qu'il soit isolé ou temporairement connecté au réseau. Ainsi, tout système isolé est autonome, mais un système autonome n'est pas nécessairement isolé [4] [13].

### **I.7 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil**

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est largement utilisée dans les systèmes éoliens autonomes en raison de sa simplicité de conception, de sa robustesse et de sa rentabilité. Toutefois, malgré ces avantages, elle présente certaines limitations, notamment une forte sensibilité aux variations de vitesse et de charge, ainsi qu'un besoin constant en puissance réactive pour assurer son bon fonctionnement. Pour pallier ces inconvénients, l'intégration de dispositifs de compensation devient indispensable. Ces derniers, tels que des condensateurs ou des compensateurs de puissance réactive, permettent de fournir l'énergie réactive nécessaire au démarrage et à la régulation de la tension. Ainsi, différentes configurations d'auto-amorçage



ont été développées afin de garantir un fonctionnement autonome stable et efficace de ces génératrices [13] [14].

## I.8 Auto-amorçage de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil

Plusieurs techniques d'auto-amorçage ont été développées pour assurer un démarrage autonome efficace de la génératrice, garantissant une compensation adéquate de la puissance réactive. Ces solutions, avec diverses configurations possibles, visent à optimiser la stabilité et le rendement du système [14].

### I.8.1 Configurations basées sur générateurs de puissance réactive

Il s'agit des dispositifs à base d'électroniques de puissance, connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System). Plusieurs structures de compensateurs statiques de l'énergie réactive ont été proposées afin d'améliorer la qualité de l'énergie produite par une éolienne [4] [15].

#### I.8.1.1 Compensateur Statique SVC (Static Var Compensation)

Le compensateur statique SVC (Static Var Compensator) repose sur l'utilisation de bancs de condensateurs associés à des interrupteurs électroniques permettant de moduler dynamiquement la quantité de puissance réactive injectée.

Il fonctionne essentiellement comme une susceptance variable, pouvant être de nature inductive ou capacitive selon les besoins du système. Installé en parallèle avec le stator de la machine et la charge, le SVC a pour rôle de fournir la puissance réactive nécessaire au bon fonctionnement de la génératrice asynchrone ainsi qu'à la charge, assurant ainsi la stabilité de la tension au point de connexion [16] [17].

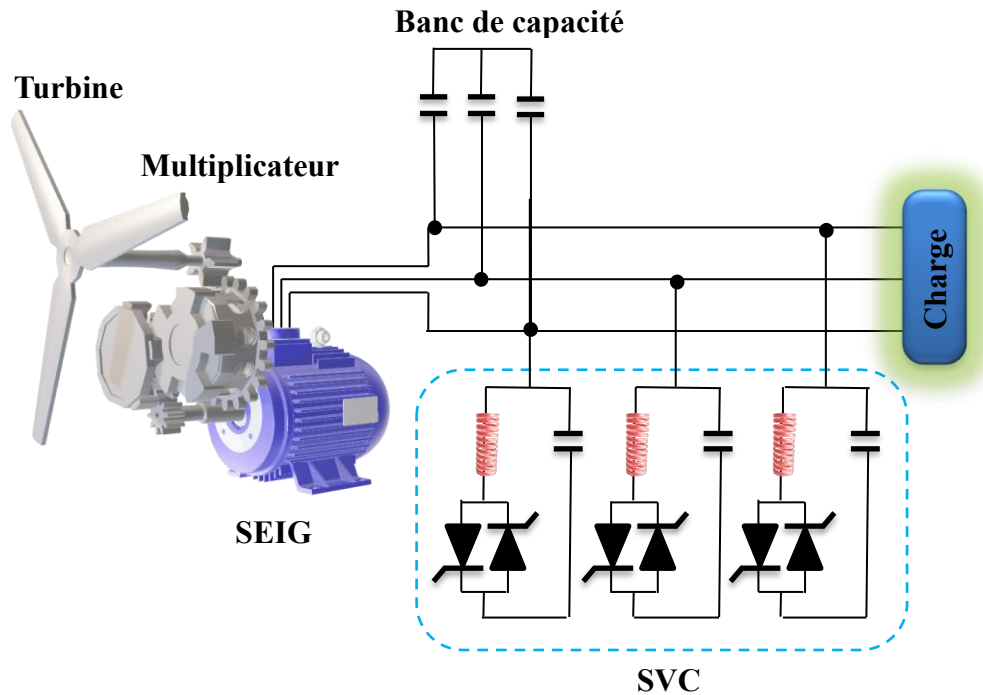
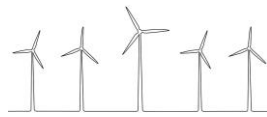


Figure I.5 Le compensateur statique SVC

### I.8.1.2 STATCOM

STATCOM : Static Synchronous Compensator, ou compensateur statique d'énergie réactive, est l'un des éléments principaux de la famille des systèmes FACTS qui est largement utilisé. Le cœur du STATCOM est un convertisseur triphasé de tension continue avec une capacité connectée du côté continu.

La capacité reliée au bus continu alimente le convertisseur en tension continue. Ce dernier génère ensuite une tension triphasée dont l'amplitude est contrôlable. En ajustant cette amplitude, il est possible de moduler l'échange de puissance réactive. Lorsque la tension de sortie du STATCOM dépasse celle de la génératrice, un courant est injecté, et le dispositif agit comme une source capacitive. À l'inverse, si cette tension est inférieure à celle de la génératrice, le STATCOM se comporte comme une inductance. Lorsque les deux tensions sont égales, aucun échange de puissance réactive n'a lieu. Ainsi, le STATCOM assure l'alimentation en puissance réactive aussi bien pour la charge que pour le générateur [4] [17] [18].



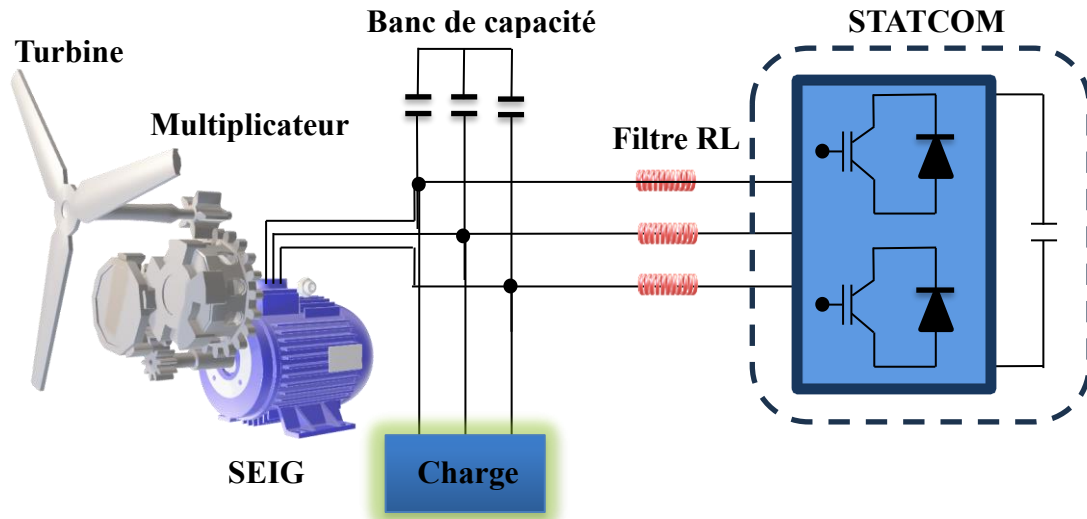
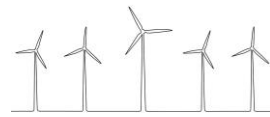


Figure I.6 Le compensateur statique STATCOM

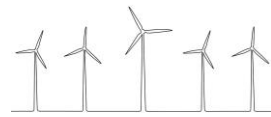
### I.8.2 Configuration avec convertisseur statique

L'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil dans un système isolé peut être assuré efficacement par l'utilisation d'un convertisseur statique. Contrairement aux méthodes classiques basées sur des bancs de condensateurs, cette solution permet un démarrage contrôlé, stable et plus flexible. Le convertisseur, généralement de type onduleur ou redresseur-inverseur, est connecté entre la génératrice et la charge, et assure l'injection initiale de la puissance réactive nécessaire à l'établissement du champ magnétique statorique. Une fois la génératrice amorcée, le convertisseur continue de réguler la tension et la fréquence de sortie, compensant les variations de charge et de vitesse du rotor. Cette approche améliore la qualité de l'énergie produite, tout en offrant une meilleure adaptabilité aux besoins des systèmes autonomes, notamment dans les applications d'électrification rurale ou d'alimentation décentralisée [12] [19].

#### I.8.2.1 Configuration avec convertisseur unidirectionnel

Cette architecture combine un redresseur à diodes ou mixte de type PD3 et un convertisseur DC-DC buck-boost pour ajuster la tension appliquée à la charge. La modulation du rapport cyclique  $\alpha$  du convertisseur permet d'atteindre la tension de sortie souhaitée, offrant un contrôle précis avec une réponse dynamique satisfaisante et une commande simple, contribuant ainsi à limiter les coûts. Elle est couramment employée dans les systèmes éoliens pour gérer les variations importantes de tension et garantir une alimentation stable. Cependant, cette configuration ne permet pas de contrôler l'aimantation de la machine et présente un coût





élevé, en raison de l'utilisation de condensateurs dédiés ainsi que de la complexité liée à la présence de deux convertisseurs et au filtrage associé [12] [20] [21].

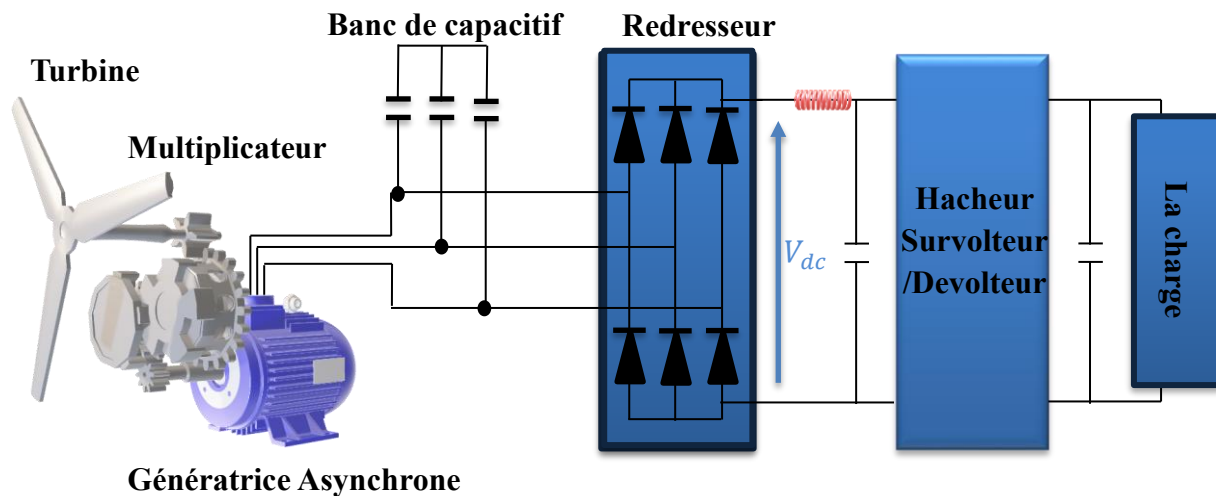


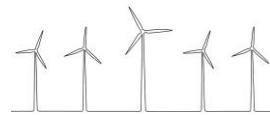
Figure I.7 Structure avec pont à diodes et hacheur

### I.8.2.2 Configuration avec un convertisseur statique bidirectionnel

Génératrice asynchrone à cage d'écureuil est généralement auto-excitée par un ensemble triphasé de condensateurs en courant alternatif, dont la capacité détermine la tension produite. Cependant, la fréquence est ajustée uniquement par la variation de la vitesse de rotation, tandis que la capacité fixe limite une régulation précise de la tension. Les fluctuations de vitesse et de charge influencent donc l'amplitude et la fréquence de la tension statorique, rendant indispensable une configuration adaptée pour maintenir une tension stable grâce à un contrôle efficace de la puissance réactive. Pour remédier à ces limites, l'intégration de convertisseurs statiques bidirectionnels combinant redresseur, onduleur, condensateur côté bus continu et batterie constitue une solution éprouvée.

Ces dispositifs permettent une gestion fine de l'énergie réactive, améliorant la stabilité de la tension dans les systèmes autonomes. De nombreuses études, anciennes et récentes, ont exploré différentes méthodes de contrôle afin d'optimiser la régulation de la tension pour les génératrices asynchrones auto-excitées dans les applications isolées [12] [19] [22] [23].

La figure (I.7) présente une configuration dans laquelle deux convertisseurs statiques sont utilisés pour alimenter une charge triphasée en courant alternatif. Cette architecture permet une régulation fine de la tension et de la fréquence, adaptée aux charges sensibles ou aux systèmes isolés. En revanche, la figure (I.8) illustre une configuration alternative conçue pour l'alimentation d'une charge en courant continu, où le convertisseur assure la stabilité de la tension en sortie, ce qui est particulièrement utile dans les applications de stockage ou les



systèmes électroniques. Ces deux configurations représentent des solutions de référence dans la littérature scientifique et sont couramment adoptées dans les travaux de recherche, aussi bien anciens que récents, en raison de leur flexibilité, de leur efficacité énergétique et de leur capacité à s'adapter aux besoins variés des systèmes de production autonome.

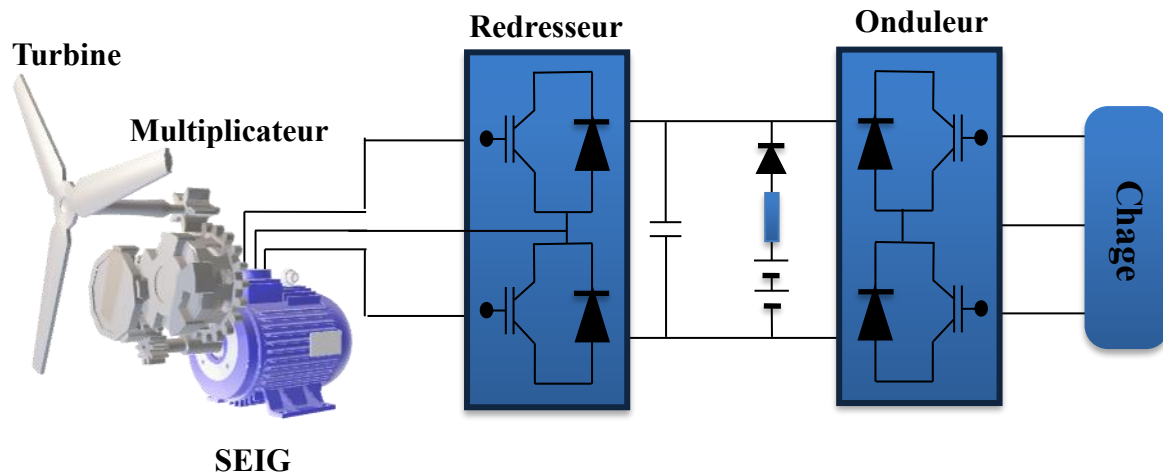


Figure I.8 Configuration avec deux convertisseurs bidirectionnels (redresseur/onduleur)

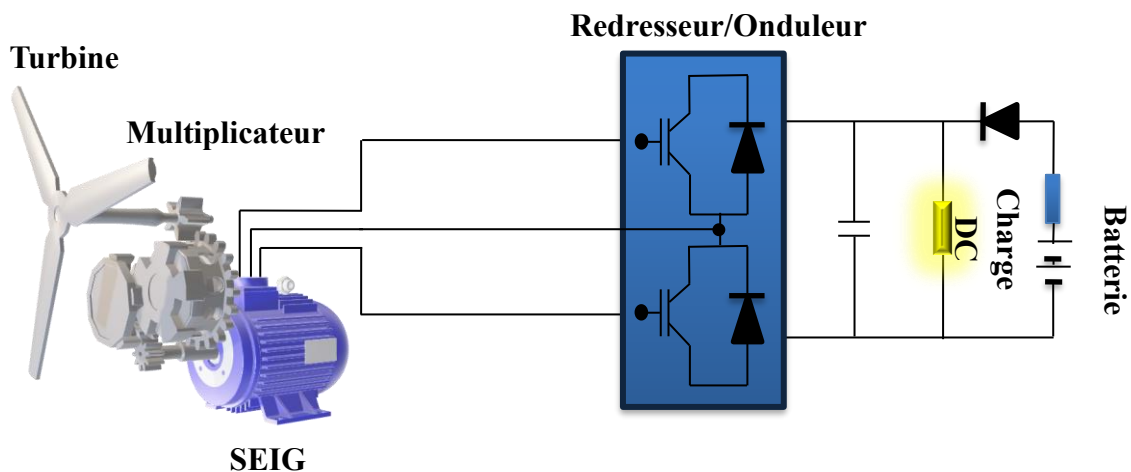
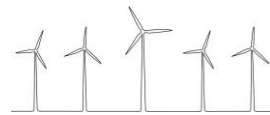


Figure I.9 Configuration avec un seul convertisseur bidirectionnel (redresseur/onduleur)

En effet, cette configuration permet, grâce à une stratégie de commande adaptée, de contrôler simultanément la magnétisation de la génératrice asynchrone ainsi que la tension en sortie, et ce même en présence de variations de la vitesse du rotor ou de la charge électrique. Cette capacité de régulation dynamique assure une stabilité du système et une qualité d'énergie optimale, ce qui est essentiel dans les applications en fonctionnement autonome. C'est pour ces raisons que cette configuration a été retenue dans le cadre de notre étude [4].



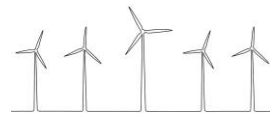
## I.9 Systèmes de stockage d'énergie éolienne

Sources d'énergie renouvelable telles que le solaire et l'éolien dépendent fortement de conditions météorologiques souvent instables, entraînant une variabilité naturelle de la production électrique et des déséquilibres potentiels dans l'approvisionnement. Pour pallier ces fluctuations et garantir une alimentation fiable et continue, l'intégration de systèmes de stockage d'énergie (SSE) devient indispensable. Ces dispositifs permettent de stocker l'électricité excédentaire produite lors des pics de génération et de la restituer lors des baisses ou des pics de demande. En stabilisant le réseau, les SSE optimisent la gestion des ressources renouvelables et renforcent l'autonomie énergétique, notamment dans les zones isolées, constituant ainsi un levier majeur pour une transition énergétique durable, propre et résiliente [4] [24].

Les systèmes de stockage d'énergie éolienne peuvent être classés selon plusieurs critères, en fonction de la technologie utilisée, de leur fonction dans le système ou de leurs caractéristiques techniques ou encore leurs caractéristiques techniques telles que la puissance délivrée, la durée de décharge ou la rapidité de réponse.

### I.9.1 Classification selon la technologie de stockage utilisée

- **Stockage électrochimique** : Il regroupe principalement les batteries (lithium-ion, plomb-acide, sodium-soufre, etc.). Ces dispositifs offrent une capacité de stockage élevée et sont adaptés aux applications nécessitant des décharges de moyenne à longue durée [25] [26].
- **Stockage électrostatique** : Les supercondensateurs ou ultracondensateurs présentent une excellente densité de puissance et une rapidité de réponse remarquable, bien que leur capacité de stockage reste limitée [24] [25].
- **Stockage électromagnétique** : Les bobines supraconductrices (SMES) permettent un stockage d'énergie extrêmement rapide et efficace, mais leur coût élevé et leur complexité limitent leur usage à des applications spécifiques [27].
- **Stockage mécanique** :
  - *Volants d'inertie* : Stockent l'énergie sous forme cinétique dans une masse en rotation [24].
  - *Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)* : Utilisent l'énergie potentielle de l'eau pompée vers un réservoir supérieur [28].
  - *Systèmes à air comprimé (CAES)* : Stockent l'air sous pression dans des cavités souterraines pour une conversion ultérieure [29].



- **Stockage thermique** : Basé sur l'accumulation de chaleur (par exemple dans des sels fondus), avec une conversion ultérieure en électricité via une machine thermique [24].

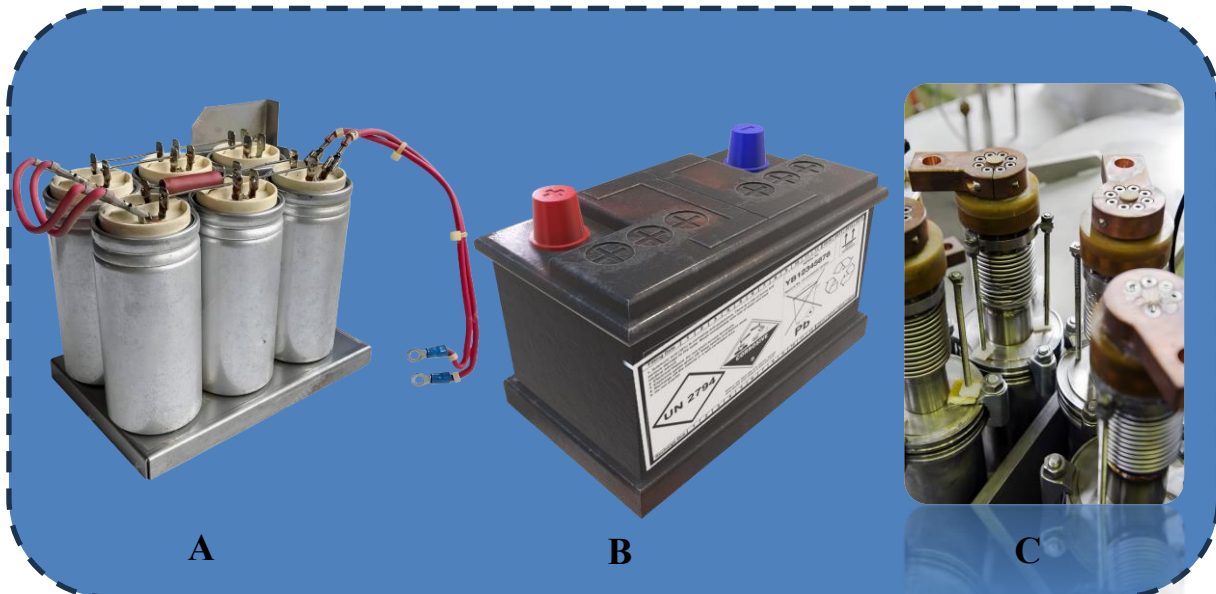


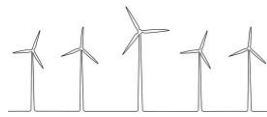
Figure I.10 Dispositifs de stockage d'énergie : A) Supercondensateur, B) Batterie, C) SMES

### I.9.2 Classification selon la fonction dans le système éolien

- **Stockage à court terme** : Utilisé pour la stabilisation rapide de la tension ou de la fréquence. Il comprend les supercondensateurs, les SMES et les volants d'inertie [24] [29].
- **Stockage à moyen ou long terme** : Vise à compenser l'intermittence de la production éolienne. Ce rôle est principalement assuré par les batteries, les STEP et les systèmes à air comprimé (CAES) [24].
- **Stockage hybride** : Combine différentes technologies de stockage (par exemple batterie + supercondensateur) afin de bénéficier à la fois d'une réponse rapide et d'une capacité énergétique importante [25] [27].

### I.9.3 Classification selon la localisation dans le système

- **Stockage centralisé** : Installé à l'échelle du réseau ou au niveau d'une ferme éolienne complète, il permet une gestion globale de l'énergie produite [24].
- **Stockage distribué** : Intégré localement, soit à chaque génératrice, soit à de petites unités autonomes, il favorise une meilleure résilience et une adaptation plus fine aux besoins spécifiques [24].



## I.10 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les principes de fonctionnement des éoliennes. Nous avons ensuite détaillé les composants essentiels de ces systèmes et classé les différentes éoliennes selon plusieurs critères. La seconde partie a permis d'introduire les solutions de conversion de l'énergie éolienne en fonctionnement autonome et isolé, en mettant l'accent sur les types de générateurs électriques adaptés. Parmi eux, la génératrice asynchrone à cage d'écureuil se distingue par sa robustesse, sa simplicité d'utilisation et son faible coût. Ces qualités en font une solution pertinente pour l'électrification des sites isolés. La suite de notre étude portera sur l'analyse de ses performances en mode générateur autonome, notamment dans le cas de l'auto-excitation.

# *{Chapitre II}*

*Modélisation de l'ensemble - MAS*

*Convertisseur Statique*



## Chapitre II

### Modélisation de l'Ensemble - MAS-Convertisseur Statique

#### II.1 Introduction

Dans l'étude des systèmes physiques, la modélisation joue un rôle essentiel en permettant la simulation du comportement de ces systèmes. Cette approche permet de créer des modèles simplifiés qui facilitent l'analyse et la caractérisation du comportement global. Ce mémoire se concentre sur l'application des machines asynchrones, en particulier la machine à cage d'écureuil, dans le contexte des systèmes éoliens. Ce chapitre est donc consacré à la modélisation analytique de la machine asynchrone à cage d'écureuil et du convertisseur associé au système d'auto-excitation. Après avoir introduit le modèle général de la machine, des simulations seront réalisées sous MATLAB Simulink pour étudier son fonctionnement en mode moteur.

#### II.2 Machine asynchrone à cage d'écureuil

La machine asynchrone à cage d'écureuil est largement utilisée dans le domaine de la conversion électromécanique en raison de sa conception simple, de sa robustesse et de son faible coût de fabrication. Ces caractéristiques en font une solution fiable et économique pour de nombreuses configurations techniques. Son fonctionnement repose sur le principe de l'induction électromagnétique : lorsqu'elle est alimentée par un courant alternatif, le stator génère un champ magnétique tournant qui induit des courants dans les barres conductrices du rotor, généralement en cuivre ou en aluminium, disposées sous forme de cage. L'interaction entre ces courants induits et le champ magnétique produit un couple électromagnétique qui entraîne la rotation du rotor.

Ces atouts expliquent également la large adoption de cette machine dans les systèmes d'énergie renouvelable, notamment éoliens. Sa conception simple, dépourvue d'éléments mobiles tels que balais ou collecteurs, réduit significativement les besoins en maintenance. Elle est également économique, grâce à l'emploi de matériaux standards et à un processus de fabrication peu complexe. Sa robustesse lui permet de fonctionner de manière fiable dans des environnements variés, ce qui en fait une solution polyvalente. Toutefois, cette machine n'est pas exempte de limitations. Ses performances de démarrage peuvent s'avérer inférieures à celles d'autres machines, comme les moteurs à courant continu ou les moteurs synchrones, avec un couple de démarrage relativement faible, ce qui peut constituer un inconvénient dans





certaines applications nécessitant un démarrage en douceur. Un autre aspect important concerne son besoin en puissance réactive pour assurer la magnétisation. Lorsqu'elle est connectée à un réseau électrique, cette puissance est facilement fournie. En revanche, dans les systèmes autonomes ou hors réseau, il est indispensable de prévoir une source externe de puissance réactive, généralement assurée par des batteries de condensateurs ou des convertisseurs statiques connectés au stator, afin de garantir le bon fonctionnement de la machine.

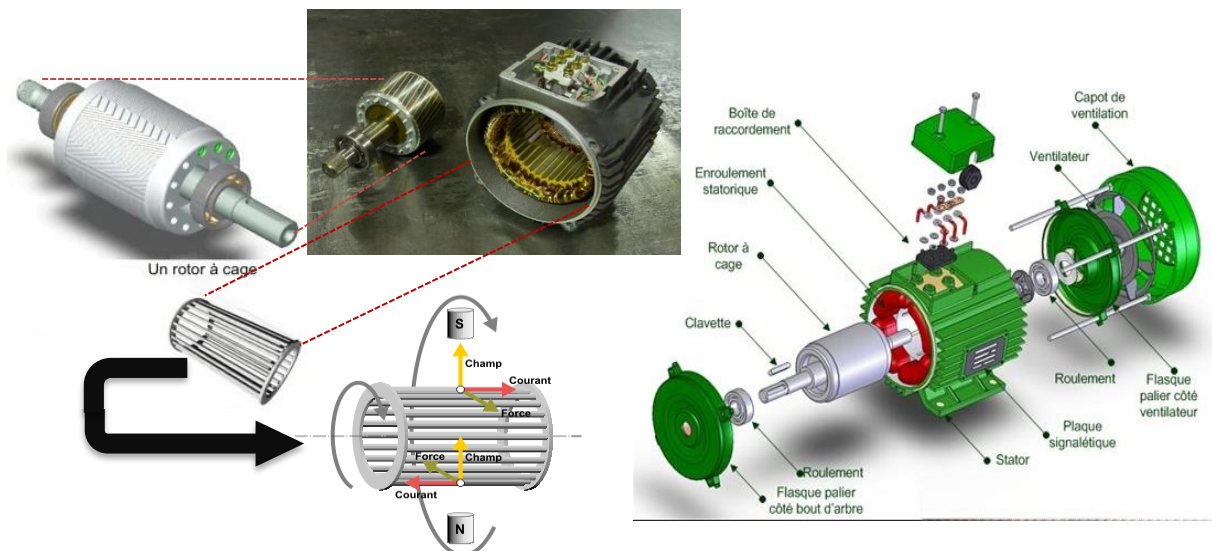


Figure II.1 Moteur Asynchrone a Cage : Structure et Fonctionnement

### II.3 Modélisation de la machine asynchrone

Dans la simulation des machines asynchrones, il est crucial d'équilibrer précision et efficacité de calcul. Le modèle diphasé, basé sur une représentation simplifiée en deux phases, permet de suivre les principales dynamiques (tension, courant, fréquence) tout en réduisant la complexité des calculs, notamment grâce aux transformations de Park et de Concordia. Le modèle linéaire de la machine asynchrone à cage d'écureuil repose sur des hypothèses : On considère notamment un entrefer d'épaisseur constante et l'effet des encoches comme négligeable. L'induction et les forces magnétomotrices dans l'entrefer sont supposées sinusoïdales, tandis que les pertes ferromagnétiques (courants de Foucault, hystérésis), les pertes mécaniques, l'effet de peau ainsi que les variations thermiques des paramètres sont ignorés. Les circuits magnétiques sont supposés linéaires, c'est-à-dire non saturés, ce qui implique une relation proportionnelle entre le champ et l'induction magnétique. De plus, la cage d'écureuil est modélisée par un enroulement triphasé rotorique équivalent. Malgré ses limites, ce modèle reste pertinent pour l'analyse en régime transitoire et permanent, et constitue une base solide pour la conception de stratégies de commande avancées comme la commande vectorielle et le contrôle direct du couple (DTC).





### II.3.1 Équations générales de la machine asynchrone

En prenant en compte les hypothèses précédemment énoncées, les équations électriques des tensions statoriques et rotoriques de la machine asynchrone à cage d'écureuil, dans un repère triphasé, peuvent être formulées sous forme matricielle en appliquant la loi d'Ohm, comme suit:

$$[v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d[\varphi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$[v_{rabc}] = [0] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d[\varphi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.2})$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit.

Les paramètres statoriques sont spécifiés par l'indice s et les paramètres rotoriques par r. Les paramètres  $R_s$  et  $R_r$  représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase. Les vecteurs  $[v]$ ,  $[i]$  et  $[\varphi]$  sont les vecteurs tensions, courants et flux de chacune des armatures.

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad [v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Les expressions des différents flux sont données par les relations suivantes :

$$[\varphi_{sabc}] = [L_s] \cdot [i_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [i_{rabc}] \quad (\text{II.6})$$

$$[\varphi_{rabc}] = [L_r] \cdot [i_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [i_{sabc}] \quad (\text{II.7})$$

$L_s, L_r$ : Matrice des inductances propre statorique, et rotorique.

$M_{sr}, M_{rs}$ : Matrice mutuelle entre phases statoriques, et rotoriques.

L'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :



$$T_{em} = [i_{sabc}]^t \cdot \left( \frac{d[M_{sr}]}{d\theta} \right) \cdot [i_{sabc}] \quad (II.8)$$

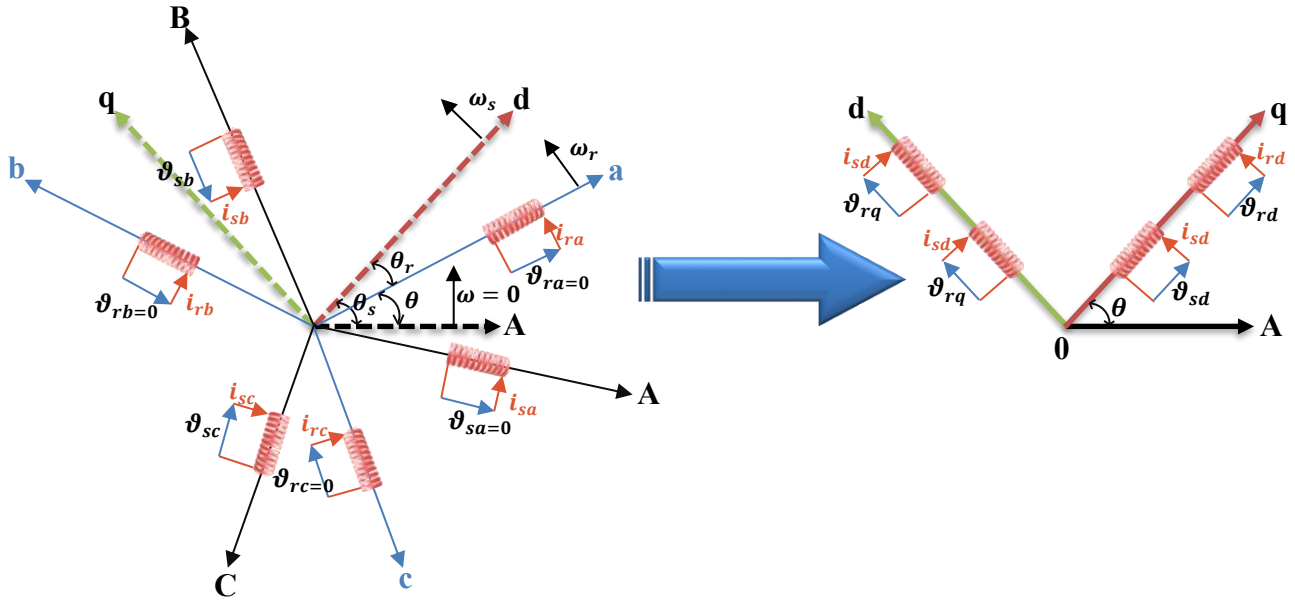


Figure II.2 Représentation des enroulements d'une machine asynchrone triphasée et de son équivalent biphasé via la transformation de Park

### II.3.1.1 Modèle diphasé de la machine asynchrone en fonctionnement linéaire

La modélisation des machines asynchrones nécessite la conversion entre systèmes triphasé et biphasé, ainsi que l'inverse. Afin de faciliter l'analyse, les équations triphasées sont souvent exprimées dans un repère biphasé tournant, désigné sous le nom de repère dqo. Cette transformation, appelée transformation de Park, est normalisée et assure l'invariance de la puissance instantanée entre les systèmes triphasé et le repère dqo. Grâce à cette approche, les calculs de la puissance et des dynamiques de la machine sont rendus plus simples et plus accessibles, tout en garantissant une correspondance fidèle des puissances mesurées dans les deux systèmes.

En choisissant un repère dqo diphasés, l'axe d peut être repéré par :

$\theta_s$ ; l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase 'A' du stator

$\theta_r$ ; : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase 'a' du rotor

$\theta$  ; L'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.

$$\text{Avec : } \theta = \theta_s - \theta_r = P \cdot \Theta \quad (II.9)$$

La position électrique ( $\theta$ ) est liée à la position mécanique  $\Theta$  par la relation :  $\theta = p \cdot \Theta$



$P$  : nombre de paires de pôles.

### II.3.1.2 La transformation de Park

La transformation directe de Park, définie par la matrice  $P(\theta)$ , permet de convertir les équations statoriques en les exprimant dans le repère dq en appliquant un angle de rotation  $\theta_s$ . La transformation de Park s'applique de manière similaire aux vecteurs de tensions, de courants et de flux.

$$[v_{abc}]; [i_{abc}]; [\varphi_{abc}]$$

$$[v_{dqo}]; [i_{dqo}]; [\varphi_{dqo}]$$

Les grandeurs transformées du système diphasé correspondent à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé.

$$[x_{abc}] = [P(\theta)][x_{dqo}] \quad (\text{II.10})$$

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)]^{-1}[x_{abc}] \quad (\text{II.11})$$

Tel que :  $[P(\theta)]$  et  $[P(\theta)]^{-1}$  sont les matrices de passage direct et inverse, elles sont données par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Les équations résultantes dans ce nouveau repère sont les suivantes.

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.14})$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.15})$$

$$v_{so} = R_s \cdot i_{so} + \frac{d\varphi_{so}}{dt} \quad (\text{II.16})$$



La transformation de Park s'applique également aux équations rotoriques, permettant de les exprimer dans le repère dq, en tenant compte d'un angle de rotation  $\theta_r$ .

$$v_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.17})$$

$$v_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \quad (\text{II.18})$$

$$v_{ro} = R_r \cdot i_{ro} + \frac{d\varphi_{ro}}{dt} \quad (\text{II.19})$$

En supposant que le système est parfaitement équilibré, les équations précédente relatives aux composantes homopolaires sont nulles. Avec l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques peuvent être exprimés en fonction des courants, selon la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$L_s = I_s + M$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r + M$  : Inductance cyclique rotorique.

$I_s$  : Inductance de fuite statorique.

$I_r$  : Inductance de fuite rotorique.

$M$  : Inductance mutuelle cyclique.

Il existe différentes manières d'orienter le repère "dq" par rapport aux repères triphasés. Dans notre cas, on se fixe les axes d et q solidaires du champ tournant de la machine. En régime permanent.

Dans cette configuration, en régime sinusoïdal permanent, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{pulsation des grandeurs statoriques}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{pulsation des grandeurs rotoriques}$$



Les deux pulsations sont reliées à la vitesse mécanique du rotor ( $\Omega$ ) par l'équation suivante :

$$\omega_s - \omega_r = P \cdot \Omega = \omega \quad (\text{II.21})$$

En regroupant les équations, et en utilisant la relation matricielle précédente qui relie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui résume toutes les équations électriques de la machine exprimées dans le repère d,q:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

L'équation matricielle obtenue représente les équations électriques d'une machine asynchrone non saturée, exprimées dans le repère de Park solidaire du champ tournant et en régime permanent sinusoïdal.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK peut être décrite comme suit

$$T_{em} = P \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.23})$$

## II.4 Le Convertisseur statique

Au cœur des systèmes électriques modernes, les convertisseurs statiques comprenant les onduleurs et les redresseurs jouent un rôle fondamental dans la conversion et la régulation de l'énergie électrique. Comparables à des chefs d'orchestre, ils synchronisent et adaptent les flux de puissance pour répondre aux exigences variées des équipements électriques. Ces dispositifs assurent non seulement la transformation du courant alternatif en courant continu (et inversement), mais permettent également un contrôle dynamique de la qualité et de la stabilité de l'électricité. Ils sont particulièrement incontournables dans le secteur des énergies renouvelables, où ils permettent, par exemple, d'optimiser la vitesse des générateurs éoliens ou la production photovoltaïque.

### II.4.1 La Réversibilité de fonctionnement des onduleurs

Les onduleurs, ou inverseurs, sont des dispositifs électroniques conçus pour convertir une tension continue (DC) en tension alternative (AC). L'une de leurs particularités notables réside dans leur réversibilité structurelle : un onduleur peut, en effet, être utilisé également comme redresseur, permettant ainsi un transfert d'énergie dans le sens inverse, c'est-à-dire de



l'alimentation en courant alternatif vers une charge en courant continu. Cette capacité repose sur l'utilisation de composants bidirectionnels tels que les transistors de puissance (IGBT, MOSFET) et les diodes, capables de contrôler le flux de courant dans les deux directions. Cette réversibilité confère aux onduleurs une grande flexibilité d'utilisation, en particulier dans les systèmes nécessitant des échanges d'énergie bidirectionnels, comme les systèmes de stockage. Elle facilite également la modélisation des dispositifs, le comportement d'un redresseur pouvant être directement déduit de celui d'un onduleur.

## II.4.2 Redresseur à deux niveaux

### II.4.2.1 Structure générale d'un redresseur à deux niveaux

Le redresseur à deux niveaux est un dispositif électronique utilisé pour convertir une tension alternative (AC) en une tension continue (DC). La figure II.1 ci-dessous illustre sa structure de base, qui comprend trois bras indépendants.

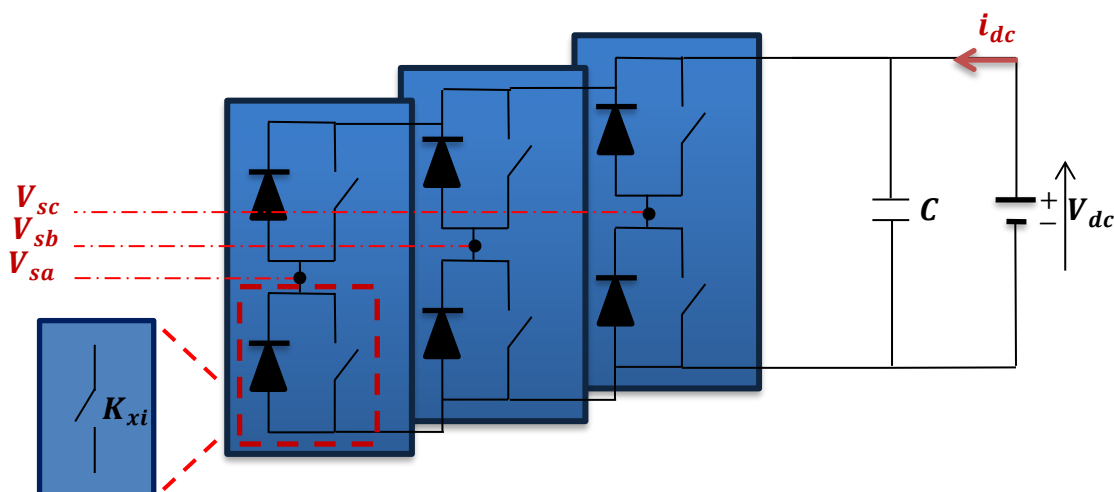


Figure II.3 Redresseur à deux niveaux

Chacun de ces bras est constitué de deux interrupteurs bidirectionnels entièrement commandables, permettant un contrôle précis du flux de puissance. Ces interrupteurs sont sélectionnés en fonction des exigences de puissance et de fréquence propres à l'application. Pour les faibles puissances et les très hautes fréquences, les MOSFET sont généralement privilégiés en raison de leur rapidité de commutation. En revanche, pour les applications à plus forte puissance et à fréquence élevée, les IGBT sont plus adaptés grâce à leur capacité à supporter de grandes charges. Chaque interrupteur, noté  $K_{xi}$ , se compose d'un transistor  $T_{xi}$  associé à une diode  $D_{xi}$  montée en antiparallèle, permettant un contrôle précis de la circulation du courant dans les deux sens. Cette configuration assure une commutation efficace et contribue à limiter les pertes d'énergie dans le système.



### II.4.2.2 Modélisation de redresseur à deux niveaux

Les interrupteurs, considérés comme idéaux, l'état de ces interrupteurs est représenté, théoriquement, par trois grandeurs booléennes de commande ce que on appelle par une fonction de connexion qui décrit leurs états (ouvert ou fermé). Chaque interrupteur  $K_{xi}$  est lié à une fonction de connexion  $S_{xi}$  qui lui est associée, tel que

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \text{ si } K_{xi} \text{ est ferme} \\ S_{xi} = 0 \text{ si } K_{xi} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

Avec :  $x = a, b, c$  ; et le  $i=1, 2$ .

Pour éviter le risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs provoqué par une surintensité ou une surtension lors de la fermeture ou de l'ouverture simultanée des deux interrupteurs d'un même bras, il est crucial de mettre en place une commande complémentaire entre ces deux interrupteurs. Cette commande doit garantir que les interrupteurs  $K_{x1}$  et  $K_{x2}$  ne soient jamais fermés ou ouverts en même temps, en coordonnant précisément leurs cycles de fonctionnement. Une telle approche préventive minimise les risques d'endommagement, prolonge la durée de vie des composants et assure une opération fiable et sécurisée du circuit électrique, Ce qui conduit à la relation logique suivante

$$S_{x1} = \overline{S_{x2}} = 1 - S_{x1} \quad (\text{II.24})$$

Les trois tensions phases-point milieu  $v_{ao}$ ,  $v_{bo}$  et  $v_{co}$  sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{a2} \\ S_{a3} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Les tensions composées entre phases,  $v_{ab}$ ,  $v_{bc}$  et  $v_{ca}$  deviennent donc :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bo} - v_{co} \\ v_{co} - v_{ao} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Les tensions simples appliquées à la machine se déduisent en fonction des tensions composées et des grandeurs booléennes  $S_{xi}$ .

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} v_{ab} - v_{ca} \\ v_{bc} - v_{ab} \\ v_{ca} - v_{bc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Pour un système triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante



$$v_{sa} + v_{sb} + v_{sc} = 0 \quad (\text{II.28})$$

## II.5 Dispositif d'Auto-Amorçage

### II.5.1 Auto-amorçage avec convertisseur statique et batterie

Dans l'approche étudiée, l'auto-amorçage repose sur l'utilisation d'un convertisseur statique bidirectionnel connecté à une batterie du côté continu. Cette configuration permet de fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation initiale de la machine, tout en assurant un contrôle efficace de la tension, face aux variations de la vitesse de la rotation et/ou la charge varie. Grâce à la commande des interrupteurs du convertisseur (souvent des IGBT), le courant réactif est généré à partir du condensateur du bus continu, qui se comporte comme une source triphasée côté alternatif. Une tension minimale doit cependant être présente dans le condensateur pour initier le processus. Pour cela, la batterie connectée au bus continu joue un rôle essentiel en fournissant l'énergie initiale. Une fois le flux magnétique amorcé et la tension suffisante atteinte, la batterie est automatiquement déconnectée. Cette stratégie permet de démarrer le système de manière fiable, tout en assurant la stabilité de l'excitation de la génératrice sans avoir recours à des composants supplémentaires côté alternatif.

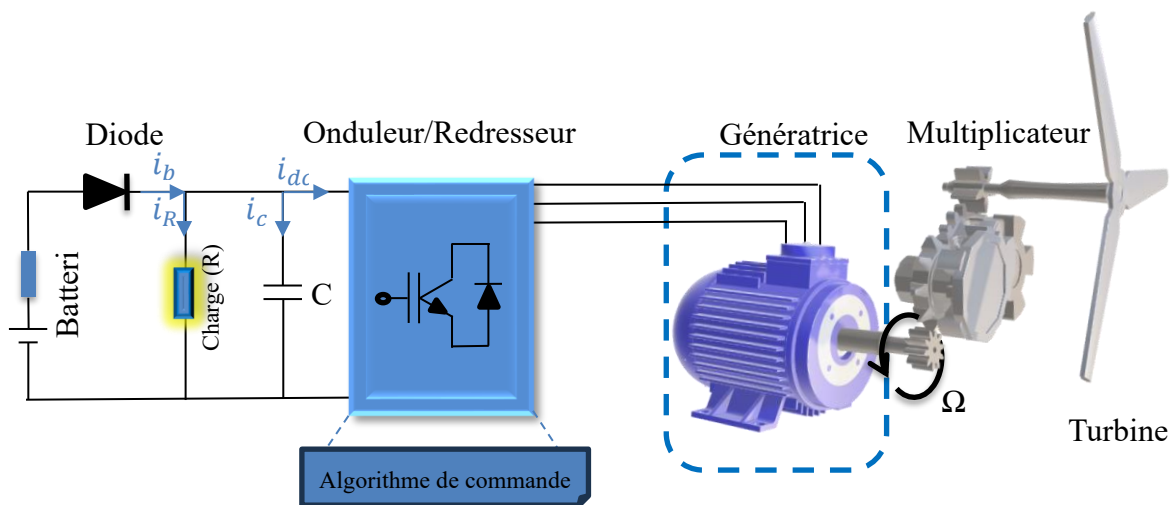


Figure II.4 Auto-amorçage de la génératrice par un redresseur à deux niveaux

### II.5.2 Modèle Mathématique du Dispositif d'Auto-Amorçage

Pour modéliser le système d'auto-amorçage avec un convertisseur statique, nous devons considérer les deux états de la diode et écrire les équations correspondantes

- **Équations Lorsque la diode est passante**, nous devons écrire les équations :

Le courant continu  $i_{dc}$  s'exprime :





$$i_{dc} = i_b - i_R - i_c \quad (\text{II.29})$$

Avec :

- $i_R$  : Courant dans la charge résistive
- $i_{dc} = \frac{E-V_{dc}}{r_b} - \frac{V_{dc}}{R} - C \frac{dV_{dc}}{dt}$  (II.30)

- $V_{dc} = \int -\frac{1}{C} \left[ i_{dc} + V_{dc} \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{r_b} \right) - \frac{E}{r_b} \right] dt$  (II.31)

$E$  : représente la tension initiale aux bornes du condensateur, c'est-à-dire la tension de la batterie.

$R$  : représente la résistance vue du côté continu

$r_b$  : la résistance interne de la batterie.

Le courant traversant le condensateur est donné par la relation :

$$i_c = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

La tension continue  $v_{dc}$  peut être représentée par l'équation suivante :

▪ **Lorsque la diode se bloque** : Dans ce cas, le courant à travers la diode  $i_b$  est nul et  $V_{dc} \geq E$   
la tension  $v_{dc}$  et le courant  $i_{dc}$  deviennent respectivement :

$$V_{dc} = - \int \frac{1}{C} \left( i_{dc} + \frac{V_{dc}}{R} \right) dt \quad (\text{II.33})$$

$$i_{dc} = -i_R + i_c \quad (\text{II.34})$$



## II.6 Résultat des simulations en fonctionnement moteur avec le modèle linéaire

Dans cette partie, nous analysons le comportement de la machine lors de son démarrage en régime moteur à vide, lorsqu'elle est directement raccordée au réseau. Le schéma bloc associé est présenté à la figure (II.5). Le moteur est alimenté par une source triphasée équilibrée (220 V, 50 Hz). La simulation a été réalisée sous l'environnement Matlab/Simulink.

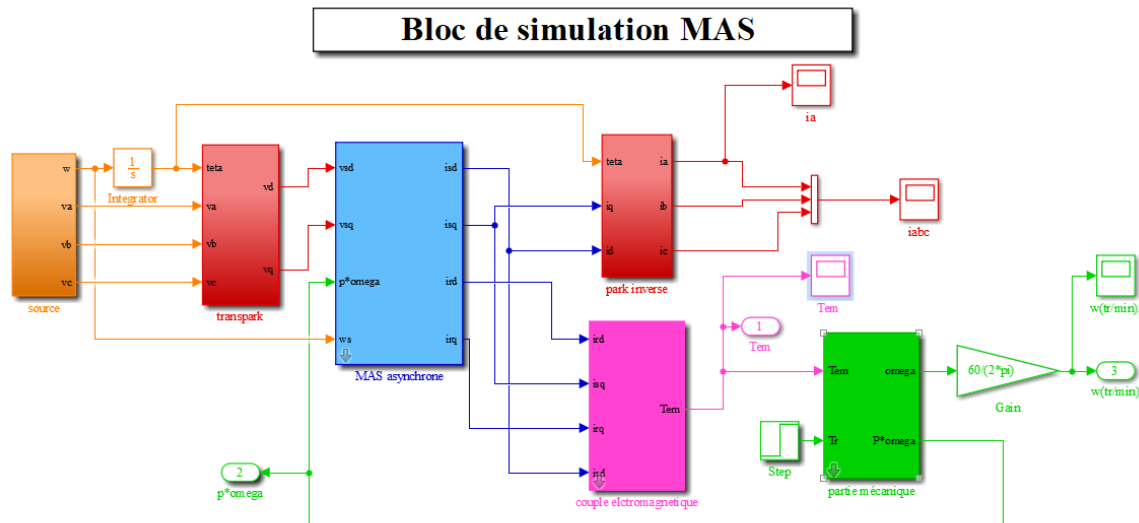


Figure II.5 Schéma bloc de simulation du démarrage du moteur sur réseau

La figure (II.6) montre l'évolution du courant statorique, on constate que lors de démarrage le courant atteint des valeurs importantes après se stabilise en régime permanent à une valeur constante. L'évolution du couple est illustrée par la figure (II.7). Les oscillations observées au démarrage sont un phénomène caractéristique du démarrage des machines asynchrones raccordées au réseau. Le couple atteint des valeurs élevées au démarrage, puis tend, en régime permanent, vers une valeur égale au couple de frottement. La figure (II.8) représentant l'évolution de la vitesse, on remarque qu'il y a des légères ondulations au démarrage, elles sont dues aux oscillations du couple. La vitesse se stabilise à une valeur proche de la valeur de synchronisme (750tr/min) car le glissement est très faible à vide.



## Modélisation de l'Ensemble - MAS-Convertisseur Statique

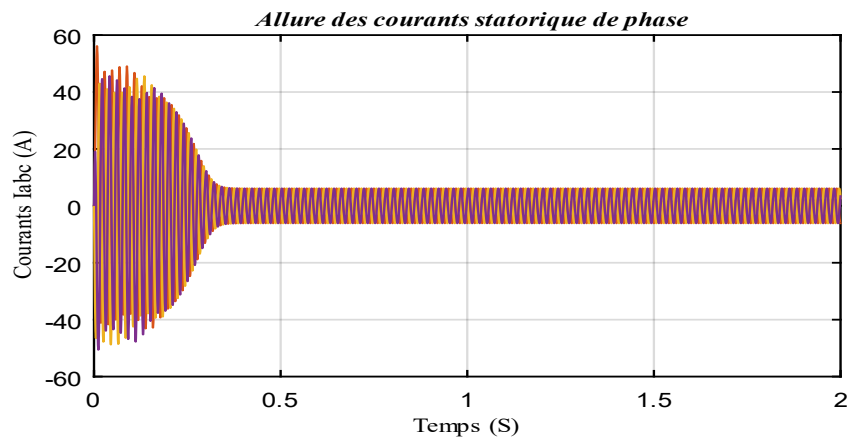


Figure II.6 Allure des courants statorique de phase

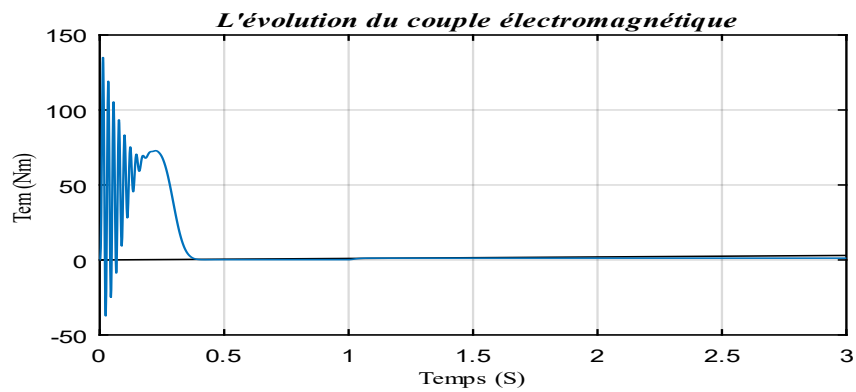


Figure II.7 L'évolution du couple électromagnétique

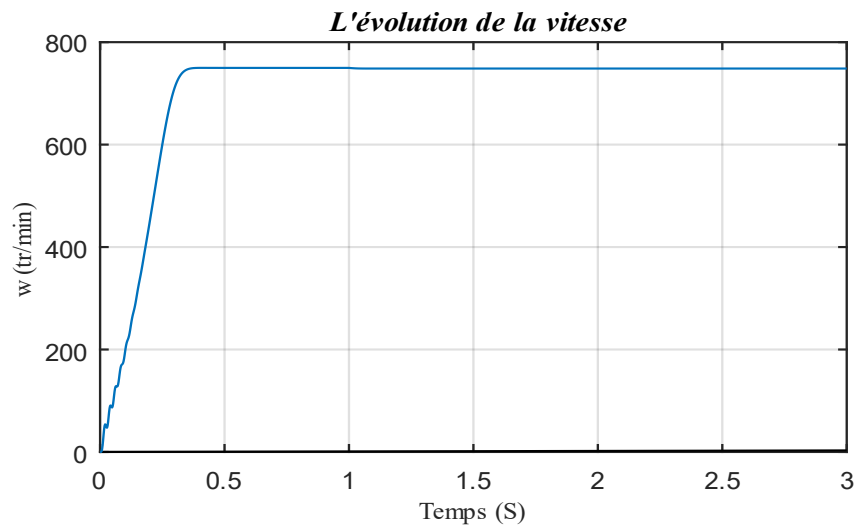


Figure II.8 L'évolution de la vitesse



## II.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de développer une modélisation analytique de la machine asynchrone à cage d'écureuil, en s'appuyant sur des hypothèses simplificatrices couramment adoptées dans les approches théoriques. Cette démarche a permis d'aboutir à un modèle mathématique cohérent, validé par des simulations réalisées sous Matlab/Simulink en mode moteur. Les résultats obtenus confirment la pertinence des équations établies pour représenter le comportement dynamique de la machine.

Par ailleurs, la modélisation a été élargie au redresseur à deux niveaux ainsi qu'au système d'auto-excitation de la génératrice asynchrone, posant ainsi les bases d'une étude complète du système de conversion. L'ensemble constitue un socle solide pour l'analyse de configurations plus complexes et l'optimisation du fonctionnement dans différents régimes.

# ***{Chapitre III}***

## ***Contrôle Direct du Couple de la Génératrice Asynchrone Auto-Excitée***



## Chapitre III

### Contrôle Direct du Couple de la Génératrice Asynchrone Auto-Excitée

#### III.1 Introduction

Contrôle Direct du Couple (DTC) constitue l'une des stratégies les plus performantes et innovantes pour la commande des machines électriques, en particulier des machines asynchrones. Introduite par Takahashi dans les années 1980, cette méthode a rapidement gagné en notoriété grâce à sa capacité à assurer un contrôle dynamique précis du couple électromagnétique et du flux statorique [30].

La commande DTC repose sur une approche directe et sans transformation vectorielle complexe, utilisant uniquement les mesures des courants statoriques pour estimer les grandeurs électromagnétiques de la machine. Cette caractéristique permet un découplage naturel entre le flux et le couple électromagnétique.

Dans ce chapitre, il est question de l'application de la commande DTC à une génératrice asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée, utilisée en mode autonome pour l'alimentation de charges isolées. L'association de cette machine avec un convertisseur de puissance AC/DC, piloté par la DTC, permet d'assurer une régulation efficace de la tension de sortie tout en optimisant le comportement électromagnétique du système [4] [31] [32] [33] [34].

#### III.2 Principe de base de la commande DTC

Le principe de fonctionnement de la commande DTC repose sur l'application de vecteurs de tension sélectionnés de manière appropriée via un convertisseur statique (typiquement un onduleur), dans le but de maintenir le couple et le flux dans des bandes prédéfinies. Cette régulation est généralement assurée à l'aide de comparateurs à hystérésis, qui déterminent en temps réel le vecteur de tension à appliquer en fonction de la position instantanée du flux statorique et de la variation du couple.

Parmi les avantages notables de cette méthode :

- La robustesse avec une bonne réponse dynamique ;
- L'absence de régulateurs de courant et de transformations complexes, ce qui réduit la complexité de mise en œuvre ;
- Meilleure efficacité à moyenne et haute vitesse ;



- Pas de transformation de Park, ce qui réduit les besoins en calculs complexes ;
- Suppression du module de modulation MLI, rendant la commande plus simple à implémenter ;
- L'utilisation d'un seul régulateur, qui gère la régulation de la vitesse dans le cas général. Dans notre cas, elle requiert également un seul régulateur pour contrôler la tension de bus continue en sortie du redresseur (l'objectif principal).

Cette méthode présente toutefois certaines limites techniques telles que :

- Présence d'ondulations importantes du couple et du flux, dues à la nature discrète des régulateurs à hystérésis ;
- Fréquence de commutation non constante, rendant difficile l'optimisation des performances du convertisseur de puissance ;
- Difficulté de fonctionnement à basse vitesse ;
- Performance fortement dépendante de la précision de l'estimation du flux et du couple.

Plusieurs travaux récents se sont penchés sur l'amélioration de la commande DTC en réponse à ses limitations. Parmi ces évolutions, on peut citer la DTC à base de modulation vectorielle (DTC-SVM), la DTC prédictive, ainsi que des approches hybrides intégrant l'intelligence artificielle, telles que les réseaux de neurones ou les systèmes à logique floue [12] [35] [31]. Ce tableau présente une classification des différentes commandes à base de la DTC.

Tableau III.1 Classification des méthodes du contrôle DTC

<i>Contrôle direct du couple DTC</i>			
Méthodes classiques	Méthodes modernes		
DTC-SVM	DTC-prédictive		
La DTC à 12 secteurs	DTC basé sur le mode glissant		
DTC adaptative	DTC basé sur l'intelligence artificielle		
DTC avec l'utilisation de convertisseurs multi-niveaux	DTC à base de logique floue	DTC basé sur le réseau de neurones	DTC basé sur un algorithme génétique



### III.3 Principe de sélection du vecteur de tension optimal par la DTC

Dans le repère statorique, l'équation électrique de la machine peut être formulée en fonction des vecteurs de tension, de courant et de flux de la manière suivante :

$$\begin{cases} v_s = R_s I_s + \frac{d\Phi_s}{dt} \\ 0 = R_r I_r + \frac{d\Phi_r}{dt} - j\omega \Phi_r \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

L'évolution du vecteur de flux statorique en fonction du temps peut être s'exprimer de la manière suivante :

$$\phi_s(t) = \int_0^t (v_s - R_s i_s) dt \quad (\text{III.2})$$

À des vitesses suffisamment élevées de la machine, le terme de la chute ohmique ( $R_s i_s$ ) est négligeable devant la tension statorique. L'équation (III.2) devient :

$$\phi_s(t) = \int_0^t v_s dt \quad (\text{III.3})$$

$$\text{D'où : } \phi_s(t) = \phi_{s0} + v_s \cdot T_e \quad (\text{III.4})$$

Avec :  $\phi_{s0}$  est le vecteur flux à l'instant  $t=0$ .

$$\Delta\phi_s = v_s \cdot \Delta T_e \quad (\text{III.5})$$

La figure III.1 illustre un exemple du déplacement de vecteur du flux statorique lors de la sélection de différents vecteurs de tension.

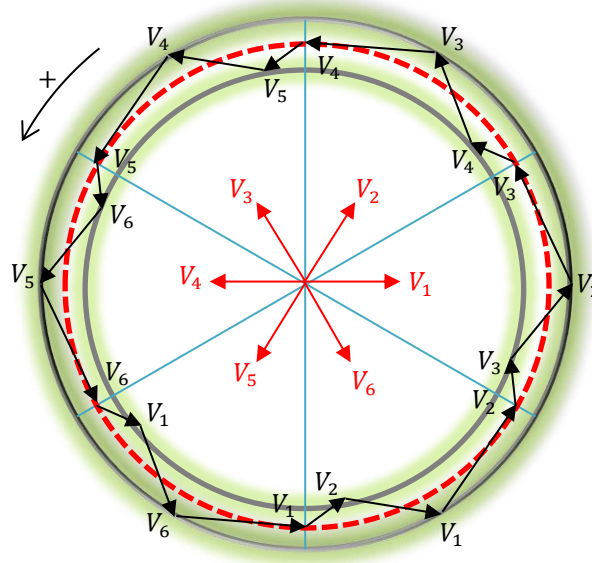


Figure III.1 Choix des tensions  $V_i$  correspondant au contrôle de l'amplitude du  $\Phi_s$





L'expression du couple électromagnétique en fonction du flux statorique et rotorique est donnée comme suit [12]:

$$T_{em} = PM \frac{M}{L_s L_r \sigma} \Phi_s \Phi_r \sin \gamma \quad (\text{III.6})$$

Avec :  $\gamma$  angle entre l'axe du vecteur de flux statorique et l'axe du vecteur de flux rotorique ; est donnée par l'équation suivante :

$$\gamma = (\widehat{\Phi_s, \Phi_r}) \quad (\text{III.7})$$

$\sigma$  : Coefficient de dispersion de Blondel ;

À partir de l'équation (III.6), il ressort que l'amplitude du couple dépend de celle du flux statorique, du flux rotorique ainsi que de l'angle entre leurs vecteurs respectifs. Ainsi, en maintenant constante l'amplitude du flux statorique grâce à l'application de vecteurs de tension statoriques appropriés, il devient possible de contrôler le couple en agissant sur l'orientation du vecteur de flux statorique. Pour maximiser le couple, il convient d'appliquer un vecteur de tension statorique perpendiculaire au vecteur de flux statorique. On en déduit que la variation de l'amplitude du flux statorique s'obtient par l'application de vecteurs de tension alignés (axe direct) avec le vecteur de flux, tandis que la variation du couple résulte de l'application de vecteurs de tension en quadrature (perpendiculaires) à ce dernier, comme illustré dans la figure (III.2) [4] [12].

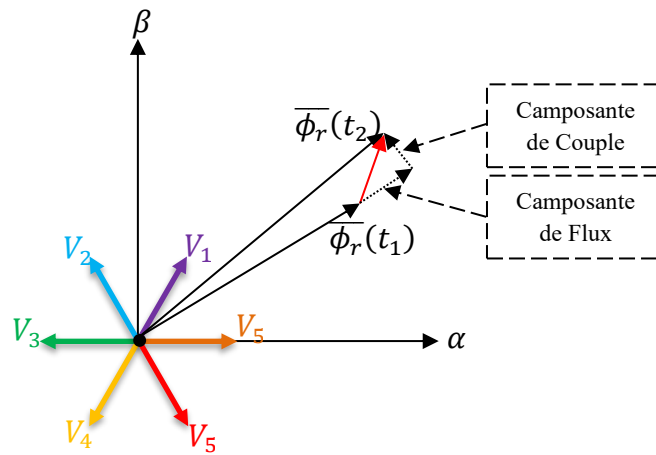


Figure III.2 Flux et couple

#### III.4 Estimateur du flux statorique et du couple électromagnétique

L'évaluation des variables de commande, telles que le flux statorique et le couple électromagnétique, s'appuie sur les mesures des tensions et courants au niveau du stator.



### III.4.1 Estimateur du flux statorique

La relation (III.3) permet d'accéder directement aux composantes  $\Phi_{s\alpha}$  et  $\Phi_{s\beta}$  du vecteur de flux statorique, ce dernier étant obtenu par la somme vectorielle de ces deux composantes.

$$\Phi_s = \Phi_{s\alpha} + j\Phi_{s\beta} \quad (\text{III.9})$$

$$\text{Avec} \begin{cases} \Phi_{s\alpha} = \int_0^t (v_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) dt \\ \Phi_{s\beta} = \int_0^t (v_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Dont le module est donné par : } \Phi_s = \sqrt{\Phi_{s\alpha}^2 + \Phi_{s\beta}^2} \quad (\text{III.11})$$

Les composantes  $v_{s\alpha}$  et  $v_{s\beta}$  du vecteur de tension statorique sont déterminées à partir de la tension continue  $v_{dc}$  et des états de commutation des interrupteurs  $S_a, S_b$  et  $S_c$ , selon la relation suivante :

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{dc} (S_a + \frac{1}{2}(S_b - S_c)) \\ v_{s\beta} = \sqrt{\frac{1}{2}} v_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Les composantes  $i_{s\alpha}$  et  $i_{s\beta}$  du vecteur de courant statorique sont obtenues à partir des courants de phase  $i_{sa}, i_{sb}$  et  $i_{sc}$  selon la relation suivante :

$$\begin{cases} i_{s\alpha} = \sqrt{\frac{3}{2}} i_{sa} \\ i_{s\beta} = \sqrt{\frac{1}{2}} (i_{sb} - i_{sc}) \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

La détermination du secteur dans lequel se trouve le vecteur  $\Phi_s$  se fait à partir de ses composantes  $\Phi_{s\alpha}$  et  $\Phi_{s\beta}$ . L'angle  $\theta_s$ , qui indique la position angulaire de  $\Phi_s$ , peut être exprimé en fonction de ces composantes de la manière suivante :

$$\theta_s = \tan^{-1} \left( \frac{\Phi_{s\alpha}}{\Phi_{s\beta}} \right) \quad (\text{III.14})$$

### III.4.2 Estimateur du couple électromagnétique

L'estimation du couple électromagnétique repose à la fois sur l'évaluation du flux et sur la mesure du courant statorique. L'expression correspondante du couple est donnée par l'équation suivante :



$$T_{em} = p(\Phi_{s\alpha}i_{s\beta} - \Phi_{s\beta}i_{s\alpha}) \quad (\text{III.15})$$

### III.5 Régulateurs à hystérésis de couple et de flux

#### III.5.1 Comparateur à hystérésis du flux à deux niveaux

Dans cette commande, on utilise un correcteur à hystérésis à deux niveaux pour réguler le flux statorique. L'objectif est de maintenir l'extrémité du vecteur de flux  $\Phi_s$  à l'intérieur d'une couronne circulaire définie. Ce correcteur fournit une sortie sous forme d'une variable booléenne, notée  $\mathcal{B}_{\phi_s}$ , qui indique si l'amplitude du flux doit être augmentée ( $\mathcal{B}_{\phi_s} = 1$ ) ou diminuée ( $\mathcal{B}_{\phi_s} = 0$ ), comme le montre la figure (III.1). Cette information est ensuite utilisée pour orienter l'évolution du module de  $\Phi_s$ , permettant ainsi de choisir le vecteur de tension le plus adapté pour assurer un contrôle précis du flux statorique [4] [12] [35].

$$\begin{cases} \text{si } \Delta\Phi_s > \xi_{\Phi_s} \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{\phi_s} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\Phi_s \leq \xi_{\Phi_s} \text{ et } \frac{d\Phi_s}{dt} < 0 \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{\phi_s} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta\Phi_s \leq \xi_{\Phi_s} \text{ et } \frac{d\Phi_s}{dt} > 0 \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{\phi_s} = 0 \\ \text{si } \Delta\Phi_s < -\xi_{\Phi_s} \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{\phi_s} = 0 \end{cases} \quad (\text{III.16})$$

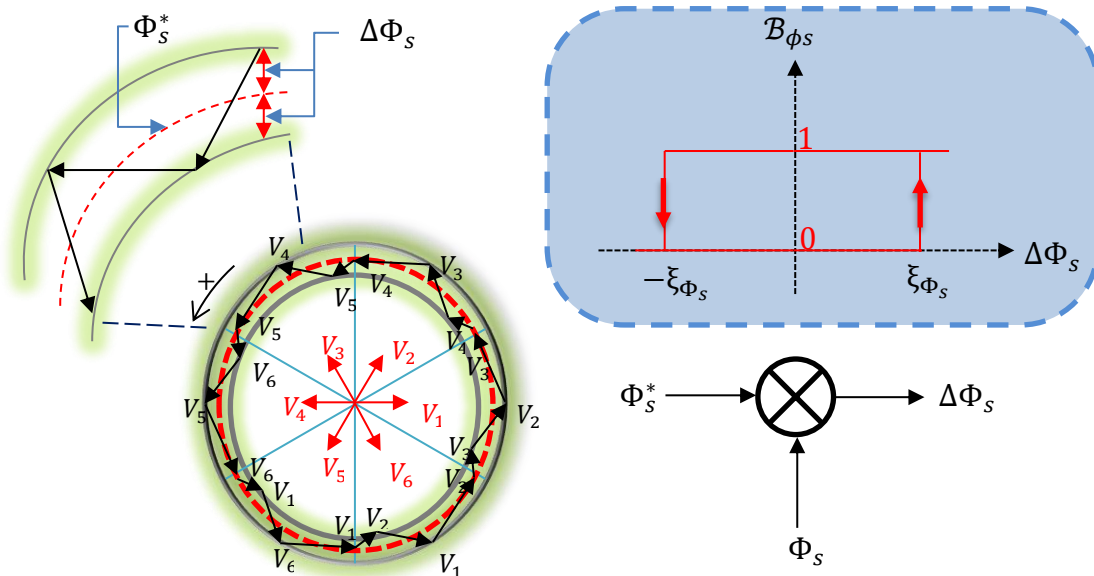


Figure III.3 Comparateur à hystérésis du flux à deux niveaux

Où  $\Phi_s^*$  correspond à la référence de flux.

$\Delta\Phi_s$  Est la moitié de la largeur de la bande d'hystérésis du correcteur.



### III.5.2 Comparateur à hystérésis du couple à trois niveaux

Le correcteur à hystérésis du couple à trois niveaux, proposé par Takahashi, permet de réguler le couple électromagnétique à l'intérieur d'une bande d'hystérésis centrée sur la valeur de référence. Contrairement au correcteur à deux niveaux, qui ne permet le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation, le modèle à trois niveaux offre la possibilité de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, autorisant ainsi un réglage du couple aussi bien en sens positif qu'en sens négatif. Cette approche améliore le contrôle du couple dans les quatre quadrants de fonctionnement de la machine. La dynamique du couple étant généralement plus rapide que celle du flux, l'augmentation du nombre de niveaux du contrôleur permet de réduire la fréquence de commutation moyenne du convertisseur statique, ce qui contribue à diminuer les pertes par commutation et à améliorer l'efficacité globale du système de commande [4] [12] [35].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{si } \Delta T_{em} > \xi_{T_{em}} \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{T_{em}} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta T_{em} \leq \xi_{T_{em}} \text{ et } \frac{d\Delta T_{em}}{dt} < 0 \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{T_{em}} = 1 \\ \text{si } 0 \leq \Delta T_{em} \leq \xi_{T_{em}} \text{ et } \frac{d\Delta T_{em}}{dt} > 0 \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{T_{em}} = 0 \\ \text{si } -\xi_{T_{em}} \leq \Delta T_{em} \leq 0 \text{ et } \frac{d\Delta T_{em}}{dt} > 0 \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{T_{em}} = 0 \\ \text{si } -\xi_{T_{em}} \leq \Delta T_{em} \leq 0 \text{ et } \frac{d\Delta T_{em}}{dt} < 0 \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{T_{em}} = -1 \\ \text{si } \Delta T_{em} < -\xi_{T_{em}} \Rightarrow \text{alors } \mathcal{B}_{T_{em}} = -1 \end{array} \right. \quad (\text{III.17})$$

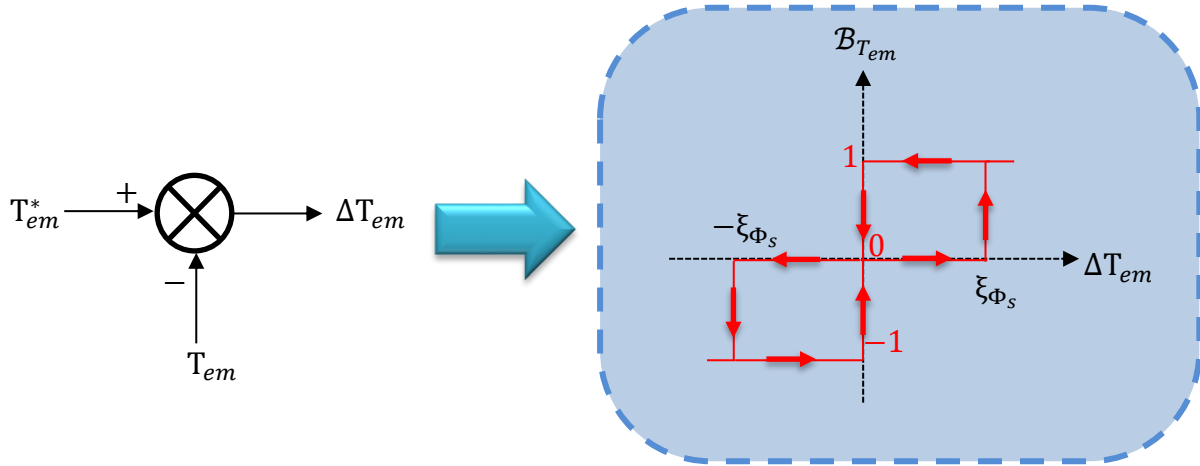


Figure III.4 Comparateur à hystérésis de couple à trois niveaux

Où  $T_{em}^*$  correspond à la référence de couple.

$\Delta T_{em}$  Est erreur le couple.



### III.6 Détermination du secteur angulaire

Sélection du vecteur de tension  $v_s$  ne repose pas uniquement sur l'erreur de flux statorique, mais dépend également dans lequel se trouve le vecteur de flux. À cet effet, le plan complexe ( $\alpha$  et  $\beta$ ) est divisé en six secteurs  $S_n$ .

Avec :  $n = 1 \dots 6$ , comme illustré dans la figure (III.5) suivante.

La détermination du secteur dans lequel évolue le flux statorique se fait selon l'inégalité

$$\text{suivante : } (2n - 3) \frac{\pi}{6} \leq S_n < (2n - 1) \frac{\pi}{6} \quad (\text{III.18})$$

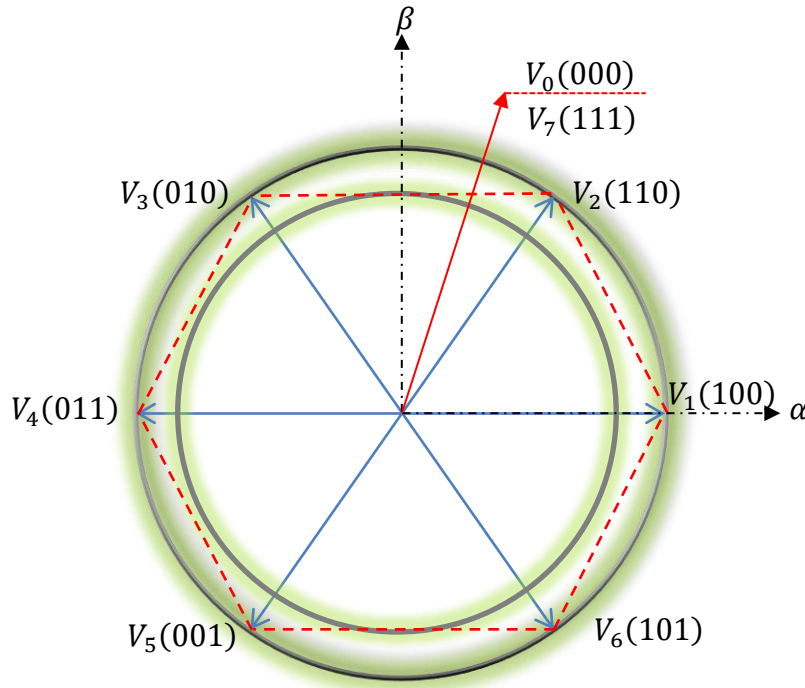


Figure III.5 Subdivision du plan ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) en six secteurs pour sélectionner le vecteur tension

### III.7 Choix du vecteur de tension

Le vecteur de tension  $v_s$  est produit par un onduleur triphasé supposé idéal. Sa valeur dépend des états de commutation des trois bras de l'onduleur ( $S_a$ ,  $S_b$  et  $S_c$ ), et peut être exprimée à l'aide de variables booléennes représentant l'état (ouvert ou fermé) de chacun des interrupteurs, selon la relation suivante :

$$v_s = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{dc} (S_a + S_b j^{\frac{2\pi}{3}} + S_c j^{\frac{4\pi}{3}}) \quad (\text{III.19})$$

Par ailleurs, un onduleur à deux niveaux est composé de trois bras de commutation et peut générer sept vecteurs de tension distincts dans le plan de phase, correspondant à huit



combinaisons de commutation possibles. Ces vecteurs jouent un rôle essentiel dans le contrôle direct du flux et du couple de la machine [4] [32] [36].

Dans une stratégie de commande directe du couple, le choix du vecteur de tension à appliquer dépend à la fois des erreurs instantanées sur le flux statorique ( $\Delta\Phi_s$ ) et sur le couple ( $\Delta T_{em}$ ), ainsi que de la position du vecteur flux dans le plan fixe ( $\alpha$  et  $\beta$ ).

Le tableau de localisation généralisé synthétise l'impact de chaque vecteur de tension sur ces grandeurs. Le vecteur  $V_k$  correspond à la tension appliquée dans le secteur courant, tandis que  $V_{k-1}$  et  $V_{k+1}$  représentent les tensions associées aux secteurs adjacents.

Lorsque le flux se situe dans un secteur numéroté ( $n=1\dots6$ ) les vecteurs  $V_k$  et  $V_{k+3}$  présentent les composantes de flux les plus significatives. Cependant, leur influence sur le couple dépend de leur orientation relative au flux à l'instant considéré. À l'entrée de la zone (secteur  $n$ ), par exemple, certains vecteurs (notamment ceux perpendiculaires au flux) modifient rapidement le couple tout en conservant l'amplitude du flux quasi constante. Inversement, d'autres vecteurs, bien qu'efficaces pour ajuster le flux, ont un effet limité sur le couple.

En pratique, le contrôle DTC repose sur la sélection de :

- Quatre vecteurs de tension actifs pour modifier à la fois le flux et le couple.
- Deux vecteurs nuls ( $V_0$  et  $V_7$ ) permettant de figer temporairement la rotation du flux, ce qui provoque une décroissance du couple tout en maintenant le flux stable.

Voici les effets typiques observés lors de la sélection des vecteurs de tension :

Tableau III.2 Table de commutation généralisée

	Augmentation	Diminution
$\Phi_s$	$V_{k-1}, V_k, V_{k+1}$	$V_{k-2}, V_{k+2}, V_{k+3}$
$T_{em}$	$V_{k+1}, V_{k+2}$	$V_{k-1}, V_{k-2}$

### III.8 Élaboration de la table de commutation

La sélection des états de commutation du redresseur s'appuie sur une table de commande qui détermine le vecteur de tension optimal à appliquer à chaque instant. Cette table est élaborée à partir de l'état des variables de flux et de couple, ainsi que de la position du vecteur de flux statorique dans un secteur donné. En fonction de ces paramètres, elle permet



d'identifier la tension à appliquer pour suivre les consignes de flux et de couple. Cette approche repose sur une logique de commutation issue d'une analyse des erreurs de flux et de couple, facilitant ainsi le choix du vecteur le plus approprié pour garantir une réponse dynamique optimale du système [32] [34] [35].

Tableau III.3 Stratégie de contrôle avec un comparateur à hystérésis à deux et trois Niveaux

Couple $T_{em}$	Flux $\Phi_s$	Secteur $S_n$						Correcteur	
$\Delta T_{em}$	$\Delta \Phi_s$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$		
1	1	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	2 Niveaux	3 Niveaux
	0	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$		
0	1	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$		
	0	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$		
-1	1	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$		
	0	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$		

### III.9 Structure générale de l'algorithme de commande DTC appliqué à cage d'écureuil

Dans une architecture de commande directe du couple appliquée à une génératrice asynchrone auto-excitée associée à un redresseur à deux niveaux, le processus débute par l'estimation du vecteur de flux statorique. Cette estimation est réalisée par intégration des tensions statoriques mesurées. Le couple électromagnétique est ensuite déterminé à partir des courants statoriques. L'écart instantané entre le couple estimé et la consigne est traité par un correcteur à hystérésis à trois niveaux, générant une sortie discrète (-1, 0, 1) qui indique la direction d'ajustement souhaitée du couple. De façon analogue, le module du flux statorique est évalué à partir de ses composantes, et son erreur est introduite dans un régulateur à hystérésis à un niveau, produisant une sortie binaire (0 ou 1) représentant la tendance à corriger.

La variable  $\theta_s$  permet de localiser le vecteur de flux dans l'un des secteurs de plan ( $\alpha$  et  $\beta$ ), discrétisé pour faciliter la commande. À partir de ces trois informations : erreur de couple, erreur de flux, une table de commutation (présentée dans le Tableau (III.3)) est utilisée pour déterminer le vecteur de tension à appliquer ainsi que les signaux de commande associés au redresseur [4].

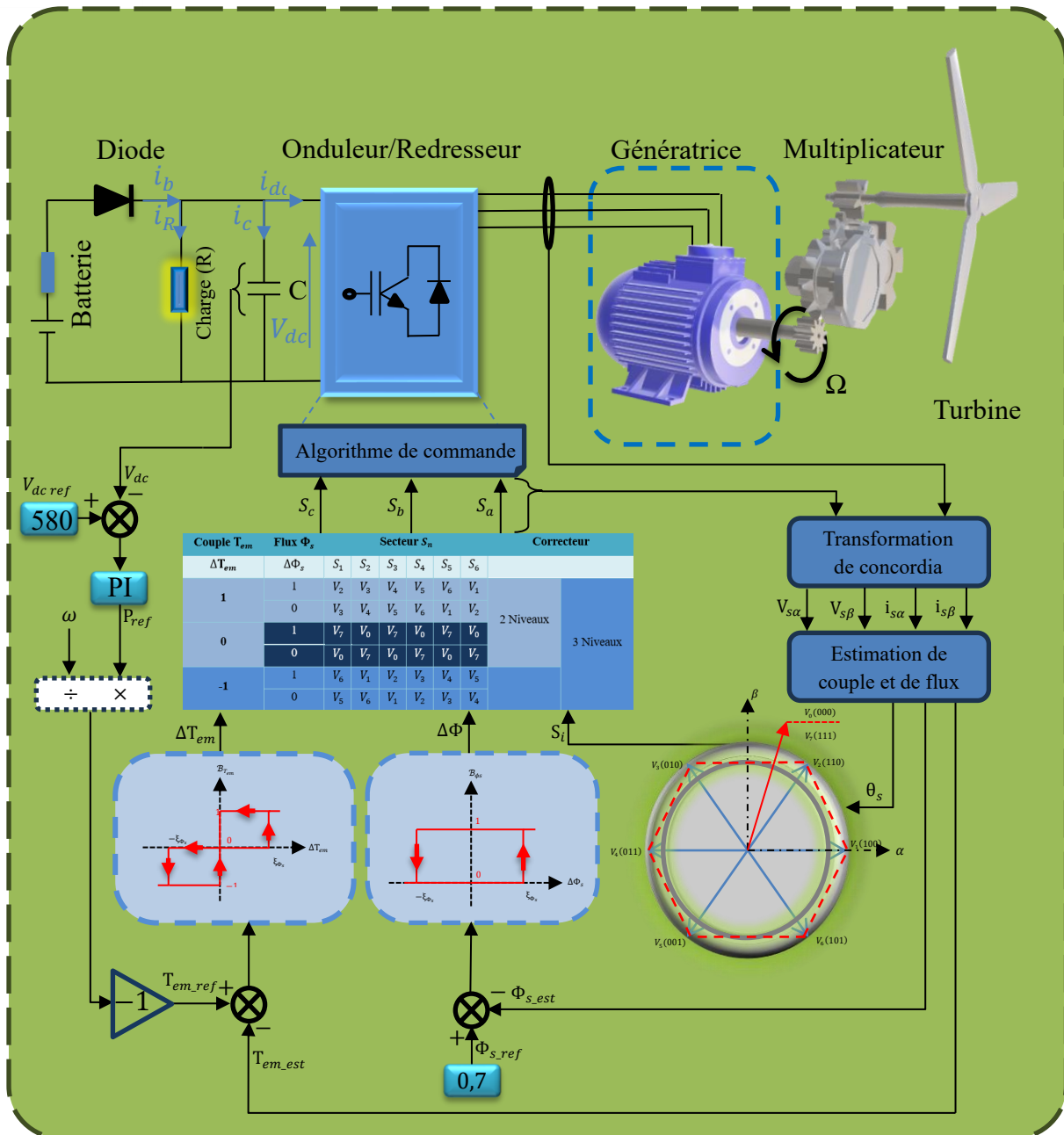


Figure III.6 Schéma synoptique du contrôle de SEIG par C-DTC avec un redresseur à deux niveaux





### III.10 Résultats de Simulation de la DTC et Interprétation

Un modèle de simulation sous MATLAB/Simulink a été développé afin d'évaluer les performances de la commande DTC appliquée à une génératrice asynchrone. Le contrôle direct du couple a été mis en œuvre via une boucle comportant différents types de blocs, tels que l'estimation du flux et du couple, les transformations de Concordia et leur inverse, ainsi que la boucle régulation. Ce modèle permet d'analyser la capacité du système à réguler les grandeurs essentielles telles que la tension continue ( $V_{dc}$ ), le flux statorique et le couple électromagnétique, face à des variations de la vitesse du vent et de la charge.

Pour la régulation de la tension  $V_{dc}$ , une valeur de référence de 580 V a été fixée.

La valeur de référence du flux statorique est déterminée à partir de la tension nominale et de la fréquence nominale, qui correspond à la valeur nominale et il en résulte l'équation suivante :  $\Phi_{s \text{ réf}} = \Phi_{s \text{ nom}} = 0.7Wb$  (III.20)

Les simulations ont été réalisées en suivant un profil de vitesse de rotation et un profil de charge bien définis. Illustrés dans les figures (III.7 Et III.8)

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation obtenus pour un fonctionnement à vitesse d'entraînement variable. La génératrice démarre à une vitesse initiale de 750 tr/min, avec un profil de variation illustré à la figure (III.7). Ces variations visent à analyser le comportement du système dans différentes conditions de fonctionnement. Parallèlement, la charge, modélisée par une résistance  $R$ , est maintenue constante à  $R = 100\Omega$  jusqu'à  $t = 10s$ , afin de mettre en évidence l'effet des seules variations de vitesse. Au-delà de ce seuil, la charge évolue selon le profil présenté à la figure (III.8), ce qui permet d'évaluer l'influence des fluctuations de charge sur le comportement global du système.

Les résultats issus de ces simulations sont présentés et analysés dans les sections suivantes

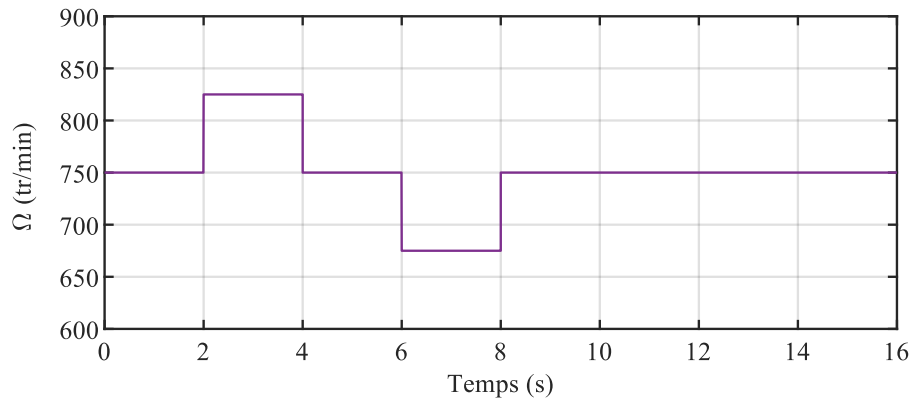


Figure III.7 Profil de vitesse de rotation

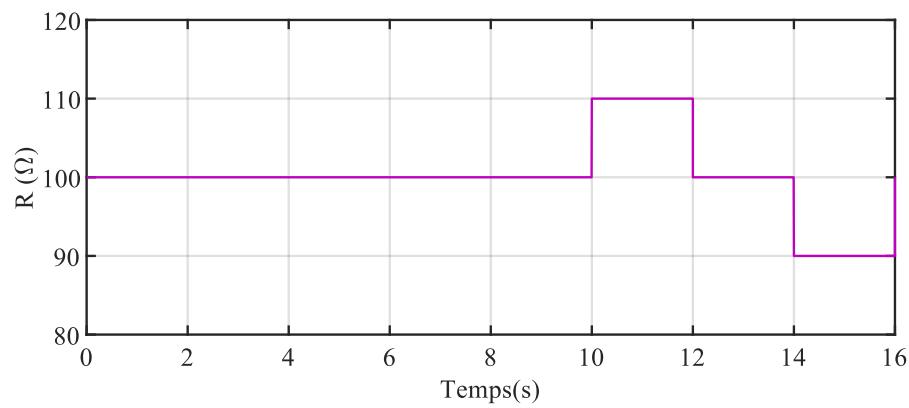
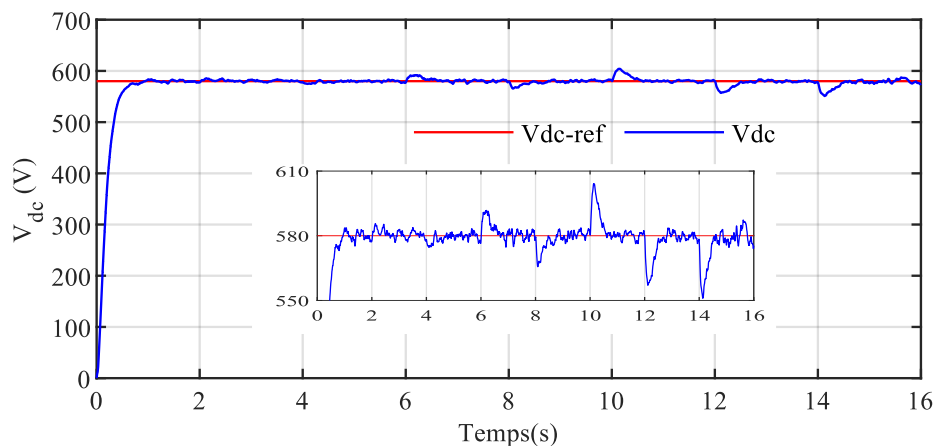


Figure III.8 Profil de charge

Figure III.9 La tension redressée ( $V_{dc}$ )

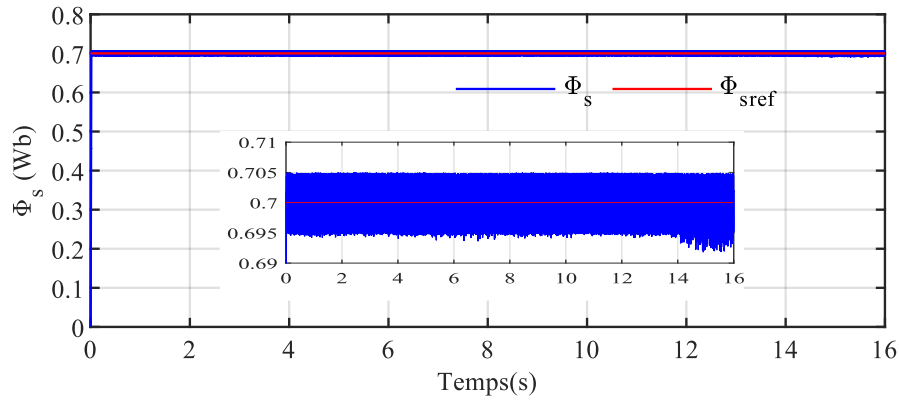


Figure III.10 L'évolution du flux statorique

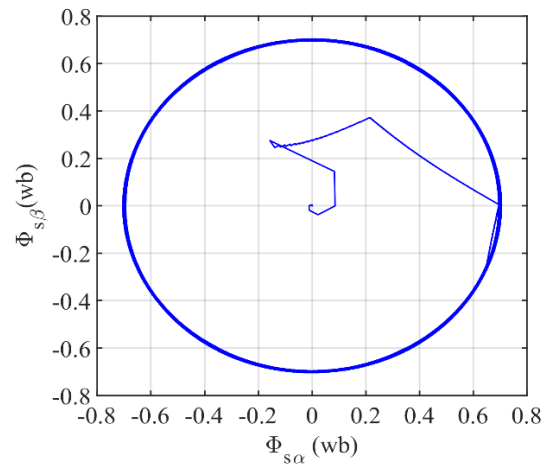


Figure III.11 La trajectoire du flux

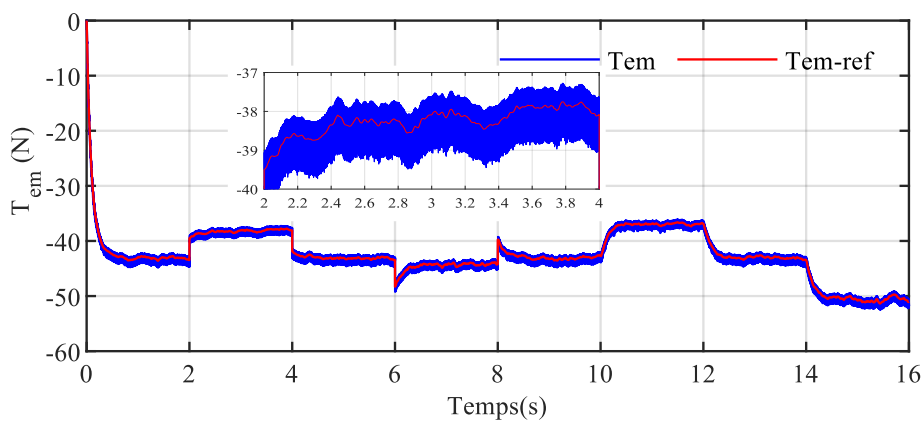


Figure III.12 Les évolutions temporelles du couple électromagnétique

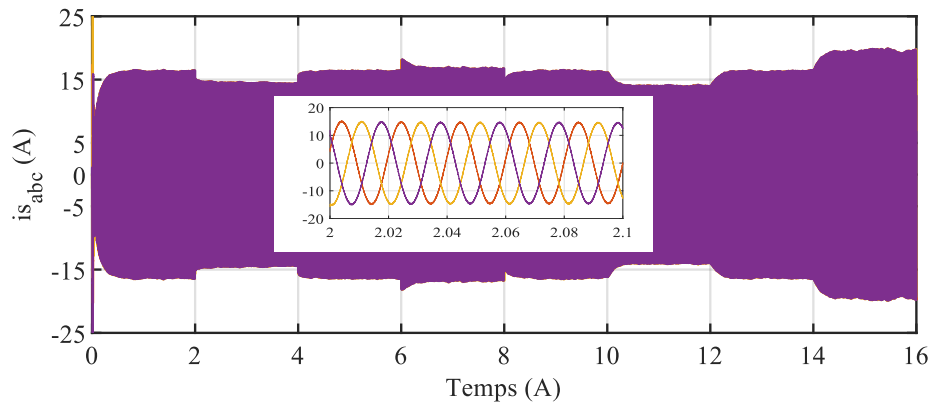


Figure III.13 Les évolutions temporelles des courants statoriques ( $i_{s-abc}$ )

La figure (III.9) illustre la tension redressée ( $V_{dc}$ ). Il est possible d'observer que celle-ci est correctement régulée et suit avec précision sa valeur de référence. La tension reste quasiment insensible aux variations de vitesse, ne s'écartant que très légèrement de sa référence, avec un écart inférieur à 2 %. En revanche, dans le second intervalle, lorsque la charge varie, la tension  $V_{dc}$  devient plus sensible à ces variations, affichant des dépassements pouvant atteindre environ 6 %. Toutefois, ces perturbations sont rapidement compensées, permettant à la tension de se stabiliser et de suivre à nouveau sa référence, comme le mettent en évidence le zoom présenté sur la même figure.

Les figures (III.10) et (III.11) illustrent l'évolution du flux statorique, à travers son module et sa trajectoire. On constate que le flux reste parfaitement stable face aux variations appliquées (vitesse et/ou charge) et suit fidèlement sa valeur de référence. La trajectoire représentée dans la figure (III.11) est rigoureusement circulaire, comme prévu, avec un rayon qui demeure constant tout au long du fonctionnement.

La figure (III.12) présente les évolutions temporelles du couple électromagnétique. On y observe que le couple suit avec précision la référence, ce qui témoigne de la réactivité et de l'efficacité de la technique de commande proposé. Plusieurs variations de consigne ont été appliquées, allant de (-35 N·m à -50 N·m), afin de simuler des changements de charge ou des fluctuations de la vitesse du vent. Le système montre une capacité d'adaptation rapide à ces perturbations, assurant ainsi une régulation stable et dynamique du couple électromagnétique.

Les évolutions temporelles des courants statoriques ( $i_{s-abc}$ ) sont illustrées dans la figure (III.13). Les formes d'onde présentent un comportement sinusoïdal.



### III.11 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la commande d'une génératrice asynchrone associée à un redresseur commandé, dans le but de maintenir une tension continue stable en sortie, malgré les variations de vitesse et/ou de charge. Pour atteindre cet objectif, la stratégie de contrôle direct du couple (DTC) a été mise en œuvre. Bien que cette technique soit largement utilisée et étudiée pour les applications en mode moteur, son utilisation en mode générateur reste relativement peu explorée.

Les simulations réalisées ont permis de valider l'efficacité de cette approche. Les résultats obtenus montrent une bonne capacité de régulation de la tension redressée face aux variations de vitesse, tout en mettant en évidence une sensibilité plus marquée aux variations de charge. Cependant, grâce à la réactivité de la technique de commande, la tension parvient à retrouver rapidement sa valeur de consigne après chaque perturbation. Par ailleurs, une excellente régulation du flux statorique a été obtenue, avec une trajectoire circulaire stable et un rayon constant, traduisant la précision du contrôle. Le couple électromagnétique suit fidèlement sa référence, illustrant la robustesse et la réactivité du système de commande, avec des ondulations faibles qui témoignent de la qualité de la régulation.

# *{Chapitre IV}*

## *Gestion de Stockage Hybride dans un Système Éolien Autonome*



## Chapitre IV

### *Gestion de Stockage Hybride dans un Système Éolien Autonome*

#### IV.1 Introduction

Les systèmes éoliens autonomes représentent une avancée significative dans la transition vers les énergies renouvelables, offrant une solution durable et décentralisée pour la production d'énergie. Toutefois, la variabilité inhérente à la production éolienne pose des défis considérables en matière de gestion de l'énergie. La gestion efficace du stockage devient donc cruciale pour assurer la fiabilité et l'efficacité opérationnelle de ces systèmes [25] [24] [37] [38].

Ce chapitre se concentre sur l'intégration et la gestion des systèmes de stockage hybrides dans les installations éoliennes autonomes. Nous explorerons les principes fondamentaux de la combinaison de technologies de stockage telles que les batteries et les supercondensateurs, leur rôle dans la régulation de la puissance, et comment ces systèmes contribuent à stabiliser la production et à répondre à la demande énergétique fluctuante.

#### IV.2 Description de système étudiée

L'architecture étudiée intègre plusieurs composants essentiels : une génératrice asynchrone auto-excitée pour la conversion de l'énergie éolienne, un système de stockage hybride combinant batteries et supercondensateurs, ainsi qu'une charge locale autonome, c'est-à-dire alimentée indépendamment du réseau électrique principal. La génératrice est reliée au bus continu via un convertisseur AC/DC à deux niveaux, assurant une conversion efficace de l'énergie produite. Les dispositifs de stockage sont connectés en parallèle à l'aide de deux convertisseurs DC-DC bidirectionnels de type hacheur, permettant une gestion dynamique et flexible du transfert d'énergie entre les deux sources. Cette configuration permet non seulement de stocker l'énergie excédentaire, mais aussi de la restituer rapidement en cas de fluctuations soudaines de la demande. Un algorithme de gestion est mis en œuvre pour répartir l'énergie en fonction de la production éolienne et des besoins de la charge. Le recours conjoint aux supercondensateurs et aux batteries améliore par ailleurs la durabilité du système en limitant les cycles rapides de charge et de décharge, ce qui contribue à préserver la longévité des batteries.



### IV.3 Modélisation aérodynamique et mécanique d'éolienne

Une fraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée grâce à la rotation des pales de la turbine, entraînant un arbre de transmission qui convertit cette énergie en puissance mécanique. Cette dernière est ensuite transformée en énergie électrique par une génératrice. La quantité de puissance mécanique obtenue dépend directement de plusieurs facteurs physiques, tels que la densité de l'air, la surface de balayage des pales, ainsi que la vitesse du vent. Sa valeur peut être déterminée à partir d'une relation mathématique spécifique intégrant ces paramètres [4] [39].

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S v^3 \quad (\text{IV.1})$$

Le paramètre  $\rho$  désigne la densité de l'air,  $S$  correspond à la surface balayée par les pales, et  $v$  représente la vitesse du vent. Le terme  $C_p(\lambda)$  fait référence au coefficient de puissance, c'est-à-dire au rendement aérodynamique de la turbine. Ce coefficient dépend du rapport de vitesse ( $\lambda$ ), défini comme le rapport entre la vitesse en bout de pale  $\Omega_t R_t$  et la vitesse du vent. Ce rapport, est exprimé par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (\text{IV.2})$$

Le coefficient de puissance est défini par l'équation suivante :

$$C_p(\lambda) = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho S v^3} \quad (\text{IV.3})$$

Avec :  $\Omega_t$  vitesse de la turbine éolienne,  $R_t$  rayon de la turbine éolienne et  $P_t$  puissance de la turbine éolienne, elle est donnée par la relation suivante :

$$P_t = T_t \Omega_t \quad (\text{IV.4})$$

$T_t$  est le couple exercé par la turbine éolienne, est exprimé par la formule ci-dessous :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v^3}{\Omega_t} \quad (\text{IV.5})$$

$S$  : la surface balayée par les pales de la turbine, est donnée par la relation suivante :

$$S = \pi R_t^2 \quad (\text{IV.6})$$

En raison de l'importante inertie de la turbine, sa vitesse de rotation reste relativement faible. Pour remédier à cela et permettre un fonctionnement optimal du générateur, un système





d'augmentation de vitesse, appelé multiplicateur (ou boîte de vitesses), est installé entre la turbine et le générateur. Ce dispositif permet d'élever la vitesse de rotation transmise par les pales à un niveau compatible avec les exigences de la génératrice. En supposant que les pertes mécaniques soient négligeables, on peut représenter le fonctionnement du multiplicateur à l'aide d'un modèle simplifié [13] [40].

$$T_m = \frac{T_t}{G} \quad (\text{IV.7})$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (\text{IV.8})$$

Avec :

$T_m$  : le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice.

$G$  : est le gain du multiplicateur de vitesse.

$\Omega$  : est la vitesse mécanique de la génératrice.

La figure IV.1 illustre le modèle de la chaîne turbine–multiplicateur–génératrice.

Deux masses sont prises en compte dans ce modèle pour représenter les inerties :

- $J_t$  : le moment d'inertie du rotor de la turbine
- $J_g$  : le moment d'inertie du rotor du générateur

Le moment d'inertie total  $J$ , représentant la somme des deux moments d'inertie, est donné par l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = T_m - T_{em} \quad (\text{IV.9})$$

Avec :

$T_{em}$  : Le couple électromagnétique généré par la génératrice

$f$  : coefficient de frottement dynamique

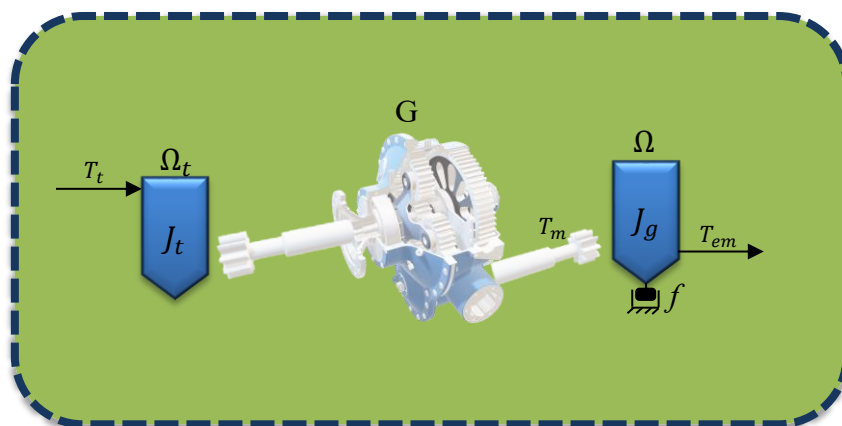


Figure IV.1 Schéma fonctionnel de la conversion mécanique

#### IV.4 Stratégies d'extraction optimale de la puissance éolienne

Variations de la vitesse du vent ont une influence directe sur la puissance captée par une éolienne. En effet, la puissance fournie par la génératrice éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, conformément à l'équation (IV.1). Selon la courbe caractéristique de puissance de l'éolienne (figure IV.2), il est évident que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation optimale. Cette dernière correspond au coefficient de puissance maximal, garantissant ainsi le meilleur rendement de l'éolienne.

Pour atteindre cette vitesse de rotation optimale à une vitesse de vent donnée, la turbine doit appliquer un couple mécanique résistant spécifique, correspondant à la puissance électrique délivrée par la génératrice [40].

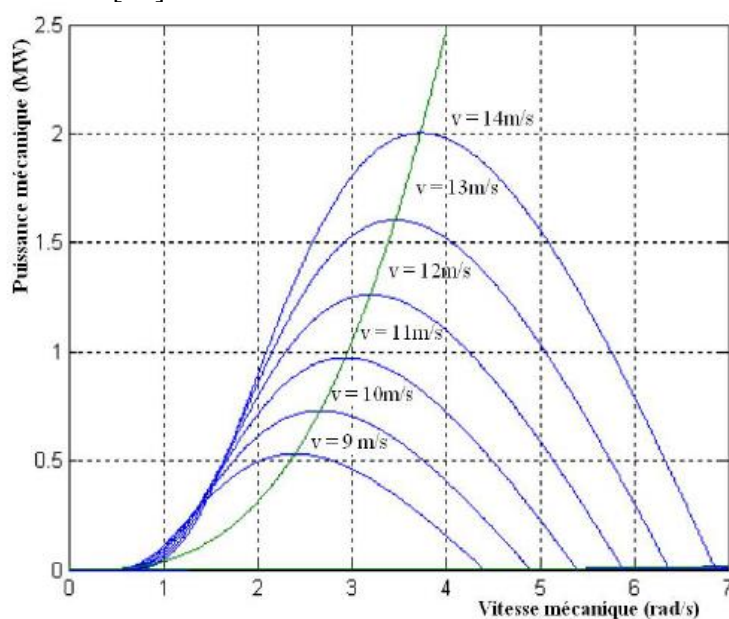


Figure IV.2 Caractéristique puissance / vitesse de l'éolienne (MPPT)



Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la vitesse nominale, il devient crucial d'utiliser un algorithme permettant une extraction maximale de la puissance du vent. Cette stratégie est communément appelée Maximum Power Point Tracking (MPPT). Afin de maximiser la puissance produite par une éolienne, il est indispensable de maintenir un rapport de vitesse optimal noté  $\lambda_{opt}$ , qui correspond au point maximal du coefficient de puissance, noté  $C_{Pmax}$ .

Pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de rotation spécifique qui permet d'atteindre ce rapport optimal. Ainsi, pour garantir un fonctionnement à puissance maximale, il est nécessaire de mettre en place une loi de commande adaptée, visant à définir la référence du couple électromagnétique. L'expression de ce couple en fonction de  $\lambda_{opt}$  permet alors de piloter efficacement l'éolienne afin d'en optimiser la performance [40].

$$T_{em} = \frac{C_{Pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{R_t^5}{G^3} \cdot \Omega^2 \quad (IV.10)$$

La figure (IV.3) donne une représentation schématique du modèle mécanique de la turbine l'éolienne avec MPPT sans asservissement de vitesse.

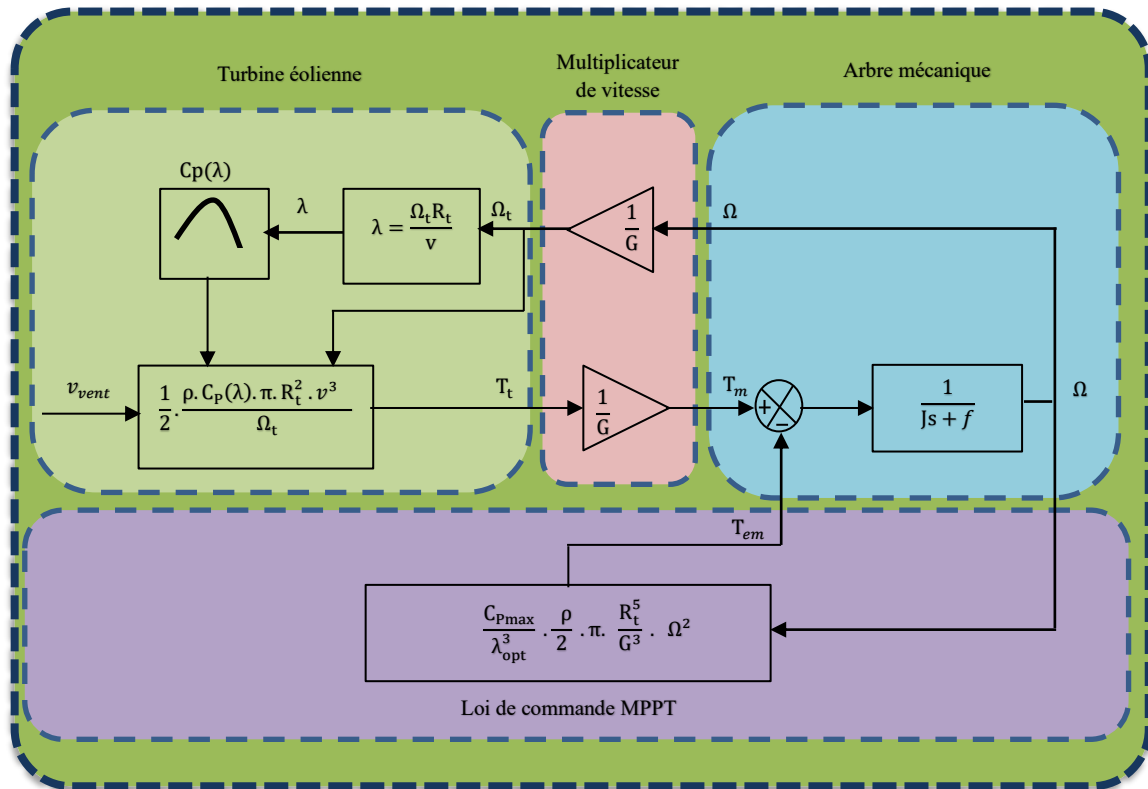


Figure IV.3 Modèle mécanique de la turbine l'éolienne avec MPPT



### IV.5 Système de stockage par batterie et Supercondensateur

Le système de stockage hybride associant batterie et supercondensateur permet de tirer parti des caractéristiques complémentaires de ces deux technologies. La batterie, dotée d'une haute densité énergétique, fournit une énergie soutenue mais présente une réponse plus lente et une usure chimique progressive. En parallèle, le supercondensateur, basé sur un stockage physique, offre une réponse rapide et une grande densité de puissance, bien qu'il stocke moins d'énergie. Ce couplage optimise la gestion des variations de puissance, améliore le rendement global et prolonge la durée de vie du système [38]. Le tableau ci-dessous présente une comparaison des principales caractéristiques des batteries et des supercondensateurs [11].

Tableau IV.1 Comparaison des différentes caractéristiques entre batteries et supercondensateur

Critère	Batterie	Supercondensateur
Densité de puissance	Élevée (150-200 Wh/kg)	Faible (5-10 Wh/kg)
Temps de charge/décharge	Long (minutes à heures)	Très court (secondes à minutes)
Cycles de Charge/Décharge	Limité (300-2000 cycles)	Élevé (jusqu'à 1 million de cycles)
Densité Énergétique	Élevée (150-200 Wh/kg)	Faible (5-10 Wh/kg)
Temps de Charge	Relativement long (heures)	Très rapide (secondes à minutes)
Applications	Appareils électroniques, véhicules électriques, systèmes éoliens pour les variations lentes	Véhicules hybrides, récupération d'énergie, systèmes éoliens pour les fluctuations rapides.
Coût par Énergie Stockée	Compétitif pour des applications à long terme	Coût initial plus élevé pour l'énergie stockée
Robustesse et Durabilité	Sensible aux températures extrêmes et aux cycles profonds	Très robuste, fonctionne dans une large plage de températures
Maintenance	Peut nécessiter maintenance	Très faible maintenance
Coût	Moins cher à capacité égale	Plus cher par Wh
Comportement en température	Sensible aux températures extrêmes	Bonne tolérance thermique



### IV.5.1 Stockage par batterie

Dans cette étude, un modèle simplifié de type RC est adopté pour représenter le comportement des batteries au plomb. Ce type de modélisation, largement utilisé, permet de réduire la complexité des systèmes réels tout en conservant les caractéristiques électriques essentielles des batteries. Grâce à sa structure, le modèle RC permet de simuler avec précision la dynamique de charge et de décharge, en tenant compte notamment de la résistance interne et de la capacité. Il s'avère particulièrement utile dans les études de gestion énergétique et les simulations de systèmes hybrides.

Un schéma électrique correspondant à ce modèle est présenté à la figure (IV.4), illustrant les principaux éléments constitutifs [25] [11] [41].

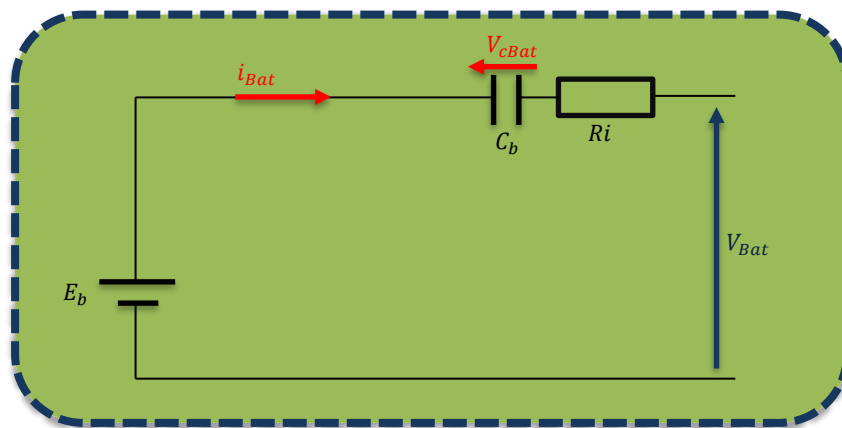


Figure IV.4 Modèle RC de la batterie

Dans un modèle de batterie, la force électromotrice ( $E_b$ ) représente la tension à vide, c'est-à-dire la tension de sortie en l'absence de charge. Les éléments tels que la capacité interne ( $C_b$ ) et la résistance interne ( $R_i$ ) interviennent quant à eux lors des phases de charge et de décharge, en modélisant les variations de tension ainsi que les pertes énergétiques internes.

Ce type de modélisation trouve une large application dans les domaines de l'énergie renouvelable et des véhicules électriques, où il joue un rôle clé pour analyser et simuler l'interaction entre la batterie et l'ensemble du système de stockage d'énergie [4] [41].

### IV.5.2 Modélisation de la batterie

Modéliser une batterie implique l'utilisation d'équations fondamentales permettant de décrire son comportement électrique. Ces formules traduisent les interactions entre les différents paramètres de la batterie ainsi que l'évolution de son état de charge au fil du temps.



La tension aux bornes de la batterie  $V_{bat}$  peut être déterminée par l'équation suivante :

$$V_{bat} = E_b - R_i i_{bat} - V_{cBat} \quad (IV.11)$$

Quant à l'état de charge ( $SoC$ ), il constitue un indicateur clé du niveau de charge de la batterie, exprimé en pourcentage de sa capacité totale. Il peut être calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$SoC(t) = 1 - \frac{Q_d(t)}{C_b} \int i_{bat}(t). dt \quad (IV.12)$$

Dans cette équation :

- $Q_d(t)$  est la charge électrique stockée dans la batterie à un instant donné  $t$ , généralement en ampères-heures (Ah).
- $C_b$  est la capacité nominale de la batterie, également exprimée en ampères-heures (Ah).

Ces équations sont essentielles pour suivre précisément le comportement énergétique de la batterie, notamment dans les systèmes intégrant des sources renouvelables ou des véhicules électriques [41].

### IV.5.3 Stockage par Supercondensateur

Utilisés dans de nombreuses applications modernes de stockage d'énergie, les supercondensateurs se distinguent par leur mode de fonctionnement non chimique. Contrairement aux batteries, l'énergie y est stockée physiquement sous forme de charge électrique, à travers la formation d'une double couche électrique à l'interface entre une électrode conductrice et un électrolyte. Ce principe leur confère la capacité de fournir et absorber de fortes intensités de courant en un temps très court, ce qui les rend particulièrement adaptés aux systèmes soumis à des variations rapides de puissance, comme le démarrage de moteurs, la récupération d'énergie au freinage ou l'assistance ponctuelle dans les réseaux hybrides. Aussi leur durée de vie exceptionnelle, souvent mesurée en plusieurs centaines de milliers de cycles, les supercondensateurs présentent également un avantage en termes de fiabilité. En revanche, leur densité énergétique reste nettement inférieure à celle des batteries, ce qui limite leur utilisation pour le stockage longue durée [26].

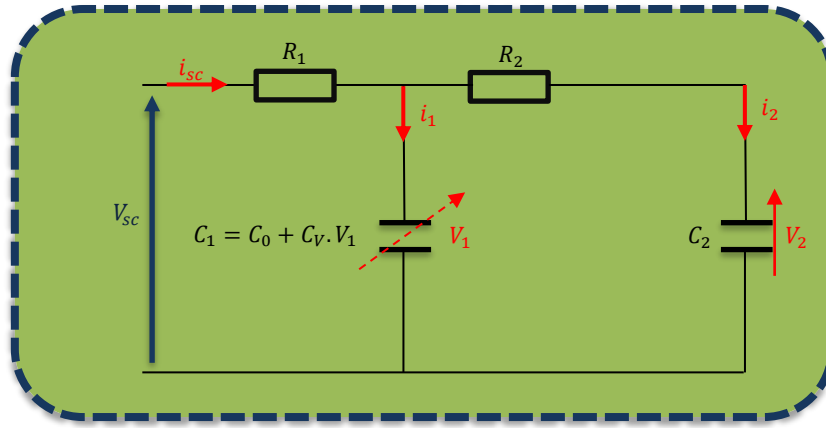


Figure IV.5 Circuit simplifié du supercondensateur (modèle à deux branches)

#### IV.5.4 Modélisation de supercondensateur

Pour représenter le comportement électrique d'un supercondensateur, plusieurs modèles ont été développés. L'un des plus utilisés est le modèle RC à deux branches, proposé par Zubieta et Bonert. Ce modèle divise l'énergie stockée en deux composantes.

La première, appelée branche rapide  $R_1C_1$ , modélise les réactions immédiates du supercondensateur lors de charges et décharges rapides, sur quelques secondes. La seconde, la branche lente  $R_2C_2$ , représente le phénomène de redistribution interne de l'énergie après un cycle.

Les équations liées à ce modèle, en supposant un courant de fuite négligeable, permettent de décrire l'évolution de la tension  $U_{sc}$  à partir des paramètres résistifs et capacitifs, fournissant ainsi une approximation efficace du comportement électrique du supercondensateur [4].

$$U_{sc} = N_s V_{sc} = N_s \cdot V_1 + R_1 \frac{i_{sc}}{N_p} \quad (\text{IV.13})$$

Où  $U_{sc}$  et  $I_{sc}$  : sont respectivement la tension et le courant du pack de supercondensateur.  $V_{sc}$  et  $i_{sc}$  : représentent la tension et le courant d'un supercondensateur élémentaire.  $N_p$  et  $N_s$  : sont le nombre de branches parallèles et en série des connexions des supercondensateurs.

La tension  $V_2$  dans la capacité secondaire  $C_2$  est donnée par :

$$V_2 = \frac{1}{C_2} \int i_2 dt = \frac{1}{R_2 C_2} \int (V_1 - V_2) dt \quad (\text{IV.14})$$

Dans le fonctionnement d'un supercondensateur, la capacité varie en fonction de la tension appliquée. Cette variation est caractérisée par la capacité différentielle, notée  $C_1$ , qui reflète le comportement dynamique de l'élément de stockage. Elle se compose de deux contributions



distinctes : une capacité constante  $C_0$ , exprimée en farads (F), représentant la composante fixe de la capacité, et une capacité variable  $C_v$ , exprimée en farads par volt (F/V), qui traduit la sensibilité de la capacité à la tension appliquée. La capacité totale  $C_1$  résulte donc de la combinaison de ces deux éléments, selon une relation qui permet de modéliser précisément le comportement du supercondensateur en fonction de la tension [38] [4] [41].

$$C_1 = C_0 + C_v \cdot V_1 \quad (\text{IV.15})$$

Le courant  $i_1$  est exprimé en fonction de la charge instantanée  $Q_1$  et de  $C_1$  comme suit :

$$i_1 = \frac{dQ_1}{dt} = C_1 \frac{dV_1}{dt} \quad (\text{IV.16})$$

La charge  $Q_1$  est donnée par l'équation :

$$Q_1 = C_0 \cdot V_1 + \frac{1}{2} C_v \cdot V_1^2 \quad (\text{IV.17})$$

Le courant  $i_{20}$ , traversant le condensateur  $C_2$  est donnée par l'équation suivante :

$$i_2 = i_{sc} - i_1 \quad (\text{IV.18})$$

$$\text{Tension } V_1 \text{ est exprimée par : } V_1 = \frac{-C_0 + \sqrt{C_0^2 + 2C_v \cdot Q_1}}{C_v} \quad (\text{IV.19})$$

#### IV.6 Modélisation de l'hacheur

Un convertisseur continu-continu bidirectionnel permet de moduler la tension de sortie de manière à ce qu'elle soit supérieure, inférieure, ou même de polarité opposée à celle de la tension d'entrée, selon les conditions de fonctionnement et le rapport cyclique appliqué. Dans un système de stockage hybride, l'hacheur joue un rôle clé en assurant le transfert contrôlé de l'énergie entre la source, la batterie, le supercondensateur et la charge. Il permet d'adapter les niveaux de tension selon les besoins, tout en gérant la répartition de la puissance entre les deux dispositifs de stockage. Grâce à son fonctionnement bidirectionnel, il optimise les échanges d'énergie et contribue à la stabilité du système [4] [41].



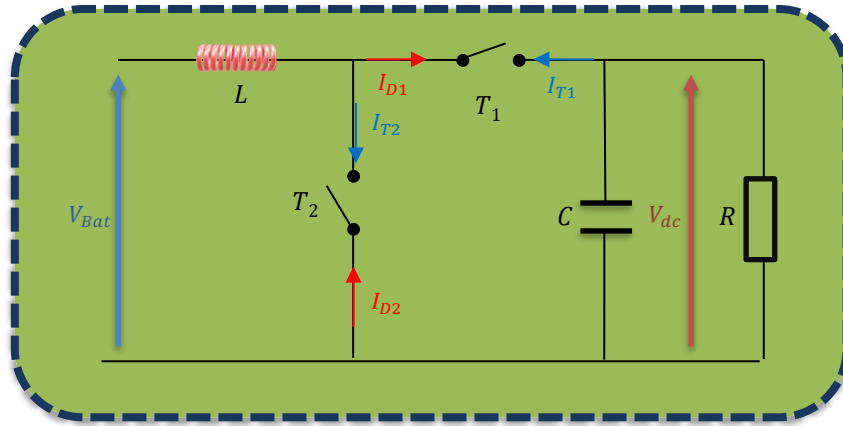


Figure IV.6 Schéma de principe du convertisseur DC/DC

On peut exprimer la tension de sortie en fonction du rapport cyclique  $\alpha$  et de la tension d'entrée de la façon suivante :  $V_{dc} = -\frac{\alpha}{\alpha-1} V_{bat}$  (IV.20)

## IV.7 Gestion et contrôle de l'énergie de système étudiée

### IV.7.1 Régulation de la tension du bus continu

Dans le schéma de régulation, la tension du bus continu  $V_{dc}$  est régulée par un contrôleur PI, qui vise à maintenir sa consigne à 580V. Ce régulateur génère en sortie le courant de référence  $i_{dc-ref}$ , utilisé comme signal de commande pour stabiliser la tension continue.

La détermination de la tension  $V_{dc}$  repose sur l'équation suivante :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{eol} - i_{Bat} - i_{sc} - i_{Ch} \quad (IV.21)$$

Il est essentiel de préciser que le courant  $i_{eol}$  possède la même expression que le courant  $i_{dc}$ . Parallèlement, le courant  $i_{Ch}$  correspond à celui absorbé par la charge raccordée au système. Le condensateur  $C$ , placé sur le bus continu, a pour fonction de lisser les fluctuations de puissance induites par les convertisseurs statiques. Il contribue ainsi à la régulation de la tension continue et participe à la stabilité globale du système.

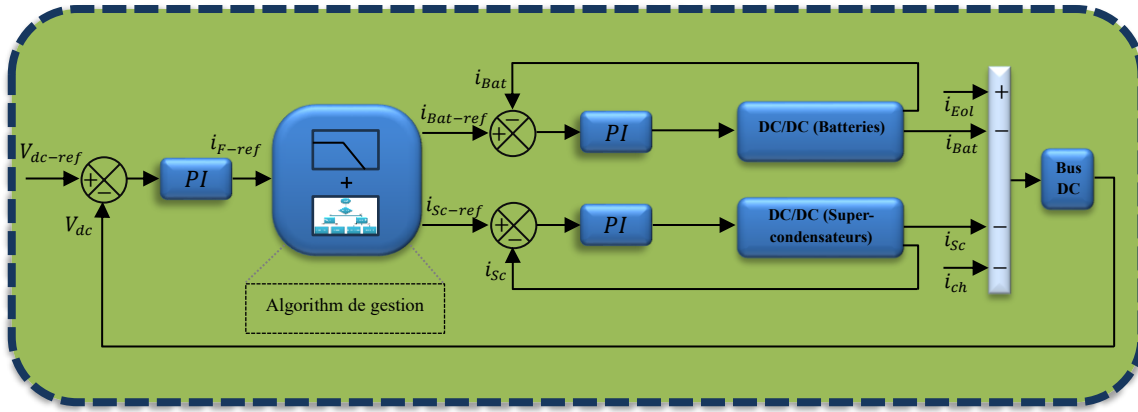


Figure IV.7 Schéma de boucle de régulation de la tension du bus continu

Afin de stabiliser la tension sur le bus continu et d'atténuer les variations rapides de puissance, un filtre passe-bas est appliqué au courant de référence continu  $i_{F-ref}$ . Ce filtre permet d'éliminer les composantes haute fréquence, responsables des fluctuations brusques, en ne laissant passer que les variations lentes. Le courant filtré, correspondant à une version lissée de  $i_{F-ref}$  est ensuite utilisé pour calculer le courant de la batterie  $i_{Bat1}$ . Ce dernier joue un rôle essentiel dans la régulation du système, en assurant une répartition harmonieuse des variations de puissance entre la batterie et les supercondensateurs. La différence entre  $i_{F-ref}$  et  $i_{Bat1}$  définit le courant  $i_{sc1}$ , pris en charge par les supercondensateurs [4] [27].

$$i_{scF} = i_{F-ref} - i_{BatF} \quad (IV.22)$$

#### IV.7.2 Algorithme de gestion de l'énergie

Fonctionnant selon une logique structurée et représentée par un organigramme, le programme de gestion d'énergie permet d'assurer une répartition efficace du courant en sortie de filtre entre deux systèmes de stockage : la batterie ( $I_{BatF}$ ) et le supercondensateur ( $I_{ScF}$ ). Il s'appuie pour cela sur des courants de référence définis pour chaque élément :  $I_{(Sc/Bat)ref}$ , ainsi que le courant de référence général du bus DC, noté  $I_{F-ref}$ .

La stratégie de gestion prend en considération plusieurs paramètres, notamment l'état de charge (SOC) des batteries et des supercondensateurs, en veillant à ce que ces derniers restent en permanence dans des plages de fonctionnement sûres et tolérables. Le courant filtré (issu de la batterie et du supercondensateur) permet d'indiquer le sens du flux énergétique, soit en mode charge, soit en mode décharge.



Le rapport des états de charge ( $SoC_{Sc/Bat}$ ) constitue un indicateur important de l'équilibre énergétique entre les deux systèmes de stockage. En fonction de la situation énergétique globale du système, quatre modes de fonctionnement principaux peuvent être identifiés :

### 1. Mode Charge :

Lorsque le courant de référence  $I_{Bat\ ref}$  est positif ( $I_{Bat\ ref} > 0$ ), cela traduit une production d'énergie par l'éolienne supérieure à la demande de la charge ( $P_{Eol} > P_{ch}$ ). Dans ce contexte :

Si la batterie est proche de sa capacité maximale ( $SOC_{Bat} \geq SOC_{Max}$ ) et ne peut absorber tout l'excès d'énergie, ce sont les supercondensateurs qui prennent le relais pour stocker cette énergie excédentaire, Deux cas sont distingués selon le rapport  $SOC$  :

**Cas 1 :**  $I_{Bat\ F} > 0$  et  $SOC_{Bat} \geq 90\%$

$I_{Bat\ ref} = 0 \rightarrow$  La charge de la batterie est immédiatement interrompue pour éviter tout risque de surcharge.

**Cas 2 :**  $I_{Bat\ F} > 0$  et  $SOC_{Bat} < 90\%$

$I_{Bat\ ref} = I_{Bat\ F} \rightarrow$  La batterie est autorisée à se charger dans la limite de sécurité maximale.

### 2. Mode Décharge :

Si le courant de référence  $I_{Bat\ ref}$  est négatif ( $I_{Bat\ ref} < 0$ ), cela signifie que la puissance générée par l'éolienne est inférieure à la demande ( $P_{Eol} < P_{ch}$ ). La batterie intervient alors pour compenser ce déficit, à condition que son  $SOC$  soit supérieur au seuil minimal ( $SOC_{Bat} > SOC_{Min}$ ).

Si la batterie atteint un seuil critique ( $SOC_{Bat} \leq SOC_{Min}$ ), ce sont les supercondensateurs qui prennent le relais pour assurer l'alimentation des charges, à condition que leur  $SOC$  soit également suffisant ( $SOC_{Sc} \geq SOC_{Min}$ ). Si ce n'est pas le cas, le courant de référence du supercondensateur est fixé à zéro pour éviter sa décharge excessive. Deux situations sont à considérer :

**Cas 1 :**  $I_{Bat\ F} < 0$  et  $SOC_{Bat} \geq 30\%$

$I_{Bat\ ref} = I_{Bat\ F} \rightarrow$  La batterie est autorisée à se décharger pour alimenter les charges.

**Cas 2 :**  $I_{Bat\ F} < 0$  et  $SOC_{Bat} < 30\%$



$I_{Bat\ ref} = 0 \rightarrow$  La décharge de la batterie est stoppée pour éviter sa détérioration. Le supercondensateur est alors sollicité (si  $SOC_{Sc} \geq SOC_{Min}$ ) pour compenser la demande.

### 3. Mode Équilibre

Lorsque la puissance produite par l'éolienne est strictement égale à la puissance consommée par la charge ( $P_{Eol} = P_{ch}$ ), le système est en équilibre. Dans cette situation, aucun échange d'énergie n'est nécessaire :

$$I_{Bat\ ref} = I_{Bat\ ref} = I_{dc-ref} = 0$$

Cependant, le programme de gestion reste actif et continue de surveiller en temps réel l'évolution des paramètres du système, afin de détecter toute fluctuation éventuelle et de garantir la stabilité du bus DC.

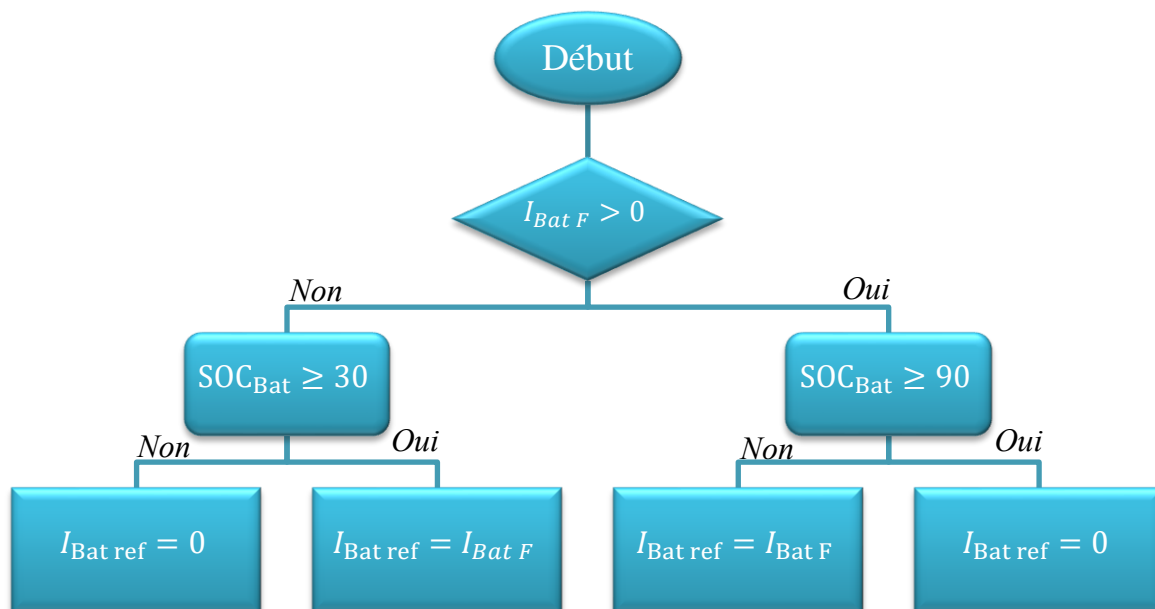


Figure IV.8 Organigramme de gestion d'énergie [42]

## IV.8 Résultats de simulation

Dans cette section, nous présentons et analysons les résultats issus des simulations réalisées après l'intégration d'un système de stockage hybride associant des batteries à des supercondensateurs selon le schéma global donné par la figure (IV.9). L'objectif principal est d'évaluer les performances du programme de gestion énergétique conçu dans le cadre de ce travail, en particulier sa capacité à assurer un équilibre optimal entre production, stockage et consommation d'énergie. Les figures ci-après illustrent l'évolution temporelle des courants et des puissances échangées entre les différents composants du système – à savoir l'éolienne, la



charge, la batterie et le supercondensateur – sur une période du temps de 55 heures. Ces résultats permettent de mettre en évidence le comportement dynamique de chaque élément en fonction des variations de la demande énergétique et des conditions de production.

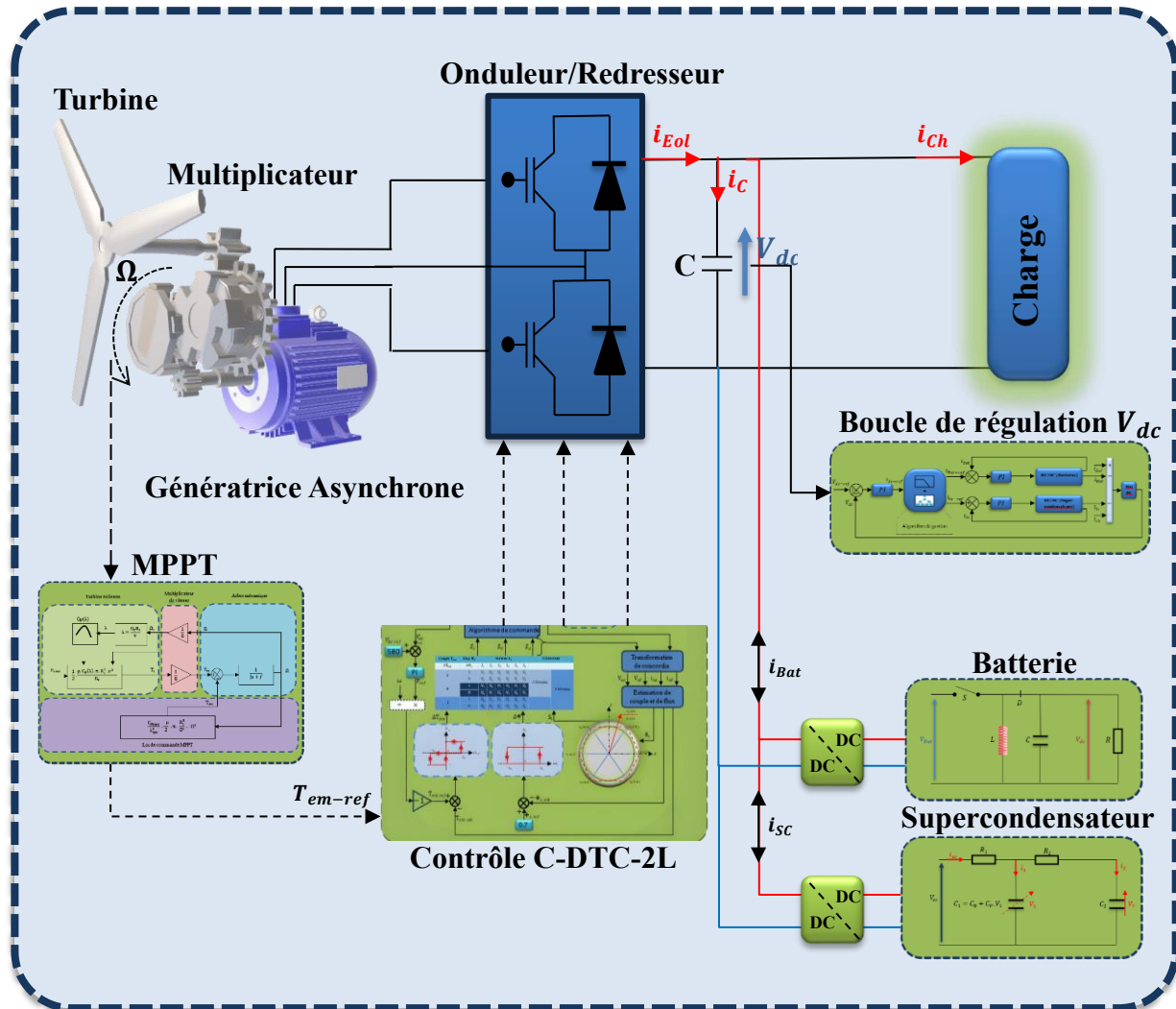


Figure IV.9 Schéma globale de système étudié



### Phase 1 : [0 h – 15 h] — Période d'insuffisance d'apport en énergie.

Dans les premières heures de fonctionnement, on observe que la demande énergétique de la charge dépasse largement la production fournie par l'éolienne, marquée par une condition où la puissance électrique générée ( $|P_{Eol}| < P_{CH}$ ), ce qui reflète une production insuffisante par rapport à la demande croissante de la charge. Cette situation contraint le système à faire appel aux dispositifs de stockage pour compenser le déficit.

Le supercondensateur intervient rapidement dès le début. Sa puissance ( $P_{SC}$ ) décroît brusquement en sens négatif, indiquant une décharge intense dans un court laps de temps, ce qui est conforme à sa fonction de fournir des pics de puissance sur de courtes durées. Cette décharge rapide s'étend jusqu'à environ 6 h. Ce comportement est illustré par la figure de courant la figure (IV.11), où le courant ( $i_{SC}$ ) devient fortement négatif au début puis tend progressivement vers zéro.

En parallèle, la batterie entre en fonctionnement de manière plus progressive. Sa puissance ( $P_{Bat}$ ) diminue graduellement, traduisant une décharge contrôlée destinée à assurer une alimentation plus durable. Le courant ( $i_{Bat}$ ) également négatif sur la figure (IV.11), ce qui indique que la batterie prend le relais pour assurer l'alimentation de la charge, et ce jusqu'à environ  $t = 14$  h.

Toutefois, lorsque l'état de charge de la batterie atteint sa valeur minimale autorisée ( $SOC_{Bat} = SOC_{min}$ ) aux alentours de 14 h comme illustre dans la figure (IV.12), celle-ci cesse temporairement de fonctionner. Son courant devient alors nul, ce qui signifie qu'elle ne peut plus contribuer à l'alimentation du système à ce moment-là. Dans cette phase critique, le supercondensateur reprend le relais grâce à sa capacité à réagir rapidement aux variations de la demande, garantissant ainsi la continuité de l'alimentation. L'évolution des états de charge de la batterie et du supercondensateur, présentée respectivement dans les figures (IV.12) et (IV.13), mettant en évidence leur comportement au cours de ce scénario.

### Phase 2 : [15 h – 30 h] — Période de surplus énergétique

À partir de 15 h, la production de l'éolienne devient supérieure à la demande de la charge ( $|P_{Eol}| > P_{CH}$ ), générant ainsi un surplus d'énergie. Celui-ci est immédiatement pris en charge par le supercondensateur, grâce à sa rapidité de réponse. Toutefois, en raison d'une stratégie de gestion de l'énergie. La batterie prend alors progressivement le relais à partir de 17 h et commence à se charger jusqu'à environ 30 h. Durant cette période, devient



la ( $P_{Bat}$  et  $i_{Bat}$ ) deviennent positive, indiquant son passage en mode de charge, tandis que le supercondensateur cesse toute activité ( $P_{SC} = i_{SC} \approx 0$ ), signalant que le stockage de l'excédent d'énergie éolienne est désormais entièrement assuré par la batterie.

### Phase 3 : [30 h – 45 h] — Équilibre énergétique

Entre 30 h et 35 h, la production de l'éolienne devient pratiquement équivalente à la demande de la charge ( $|P_{Eol}| = P_{CH}$ ). Dans ce contexte d'équilibre, aucune action de stockage ou de déstockage n'est requise. En conséquence, ( $P_{Bat}, P_{SC}, i_{Bat}$  et  $i_{SC} \approx 0$ ) diminuent progressivement jusqu'à atteindre des valeurs nulles comme illustre dans les différentes figures. Cela traduit l'inactivité complète de ces deux composants durant cette phase, confirmant que le système fonctionne de manière autonome sans sollicitation des ressources de stockage. Cette stabilité transitoire reflète l'efficacité de programme de gestion proposé dans les périodes de bilan équilibré entre production et consommation.

### Phase 4 : [45 h – 55 h] — Deuxième période de déficit énergétique

Une nouvelle hausse de la demande de la charge est observée à partir de 45 h, tandis que la production de l'éolienne devient nettement insuffisante ( $|P_{Eol}| < P_{CH}$ ). Ce déséquilibre énergétique conduit une fois de plus à l'activation des dispositifs de stockage. Comme lors de la première phase critique, le supercondensateur intervient en premier en fournissant une réponse immédiate, ce qui se traduit par une augmentation rapide de sa puissance.

La batterie, de son côté, réagit avec un léger décalage mais assure une fourniture d'énergie plus stable et prolongée jusqu'à 55 h, garantissant ainsi la continuité de l'alimentation. Toutefois, lorsque son état de charge atteint le seuil minimal ( $SOC_{Bat} = SOC_{min}$ ) aux environs de 54 h, elle cesse temporairement de fonctionner : le courant qu'elle délivre devient nul, indiquant son incapacité à poursuivre son rôle dans le système. Cette situation est clairement illustrée dans les figures (IV.10) et (IV.11).

À ce moment critique, le supercondensateur prend le relais afin de maintenir l'alimentation, exploitant sa capacité à fournir instantanément de l'énergie.

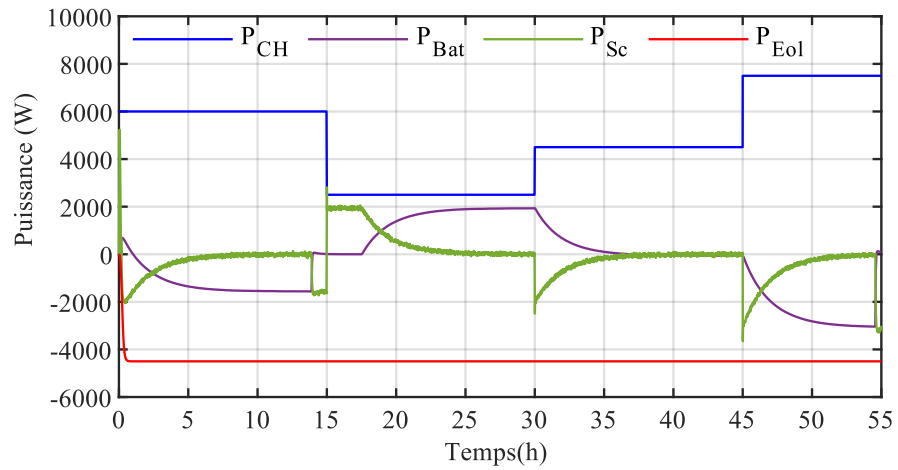


Figure IV.10 Allure des puissances

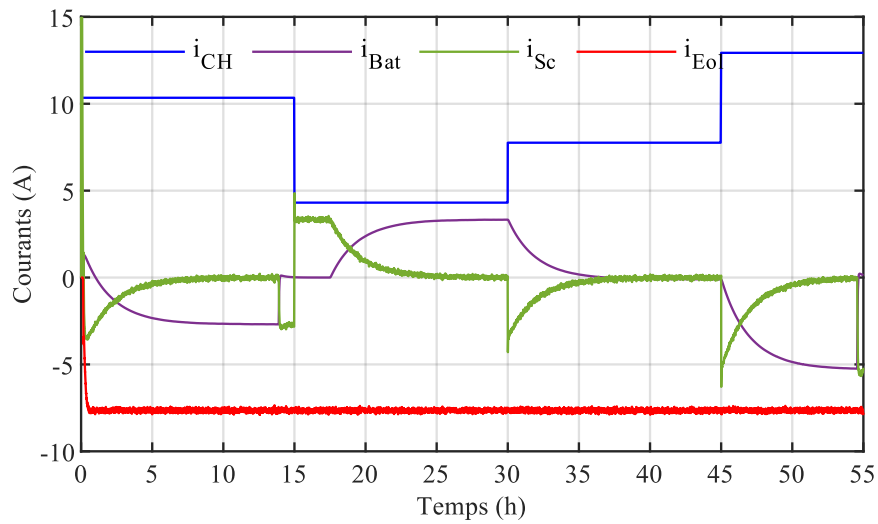


Figure IV.11 Allure des courants

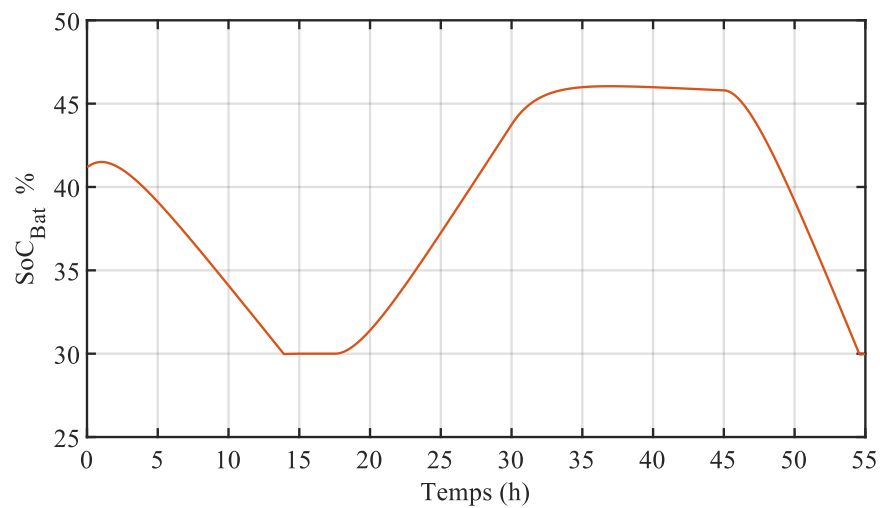


Figure IV.12 Etat de charge de la Batterie ( SoCBat )



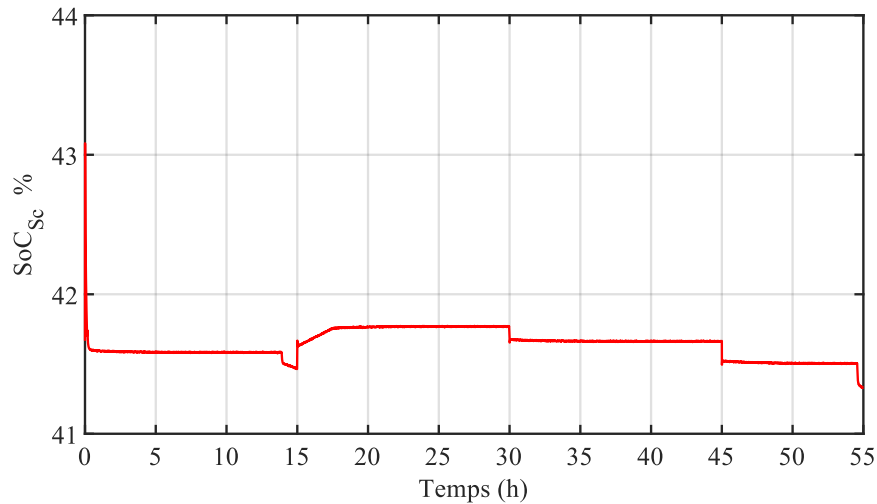


Figure IV.13 Etat de charge de Supercondensateur ( SoCsc )

La figure (IV.14) montre l'évolution du courant de référence filtré et ainsi que la somme des courants de référence de la batterie et du supercondensateur. On observe que ces courbes sont parfaitement superposées, ce qui démontre que :  $i_{Fréf} = i_{Batréf} + i_{Scréf}$ . Ce résultat met en évidence la cohérence du programme de gestion proposé, ainsi que le bon fonctionnement du filtre intégré dans le système. En effet, la répartition dynamique des courants entre la batterie et le supercondensateur est assurée de manière rigoureuse, conformément aux références calculées, garantissant ainsi une réponse globale optimisée du système de stockage hybride.

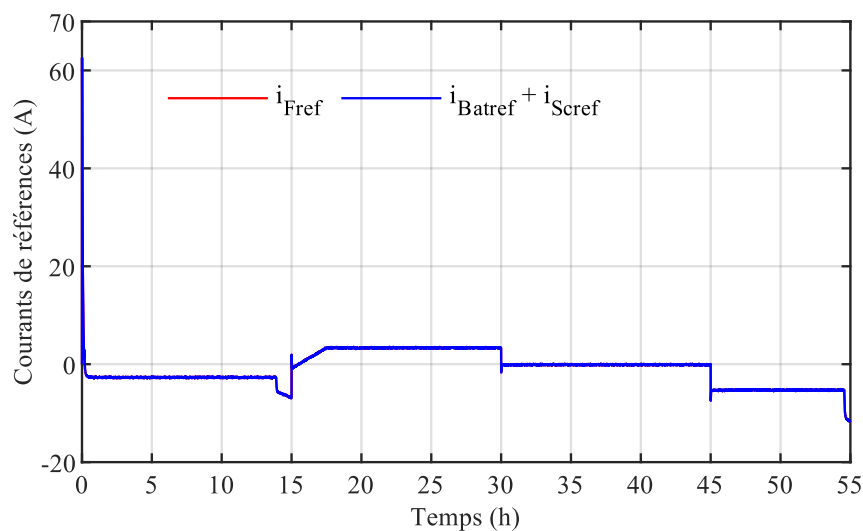


Figure IV.14 Courants de références



La figure (IV.15) présente l'évolution de la tension au niveau du bus continu. On constate une très bonne stabilité de cette tension, qui reste proche de sa valeur de consigne. Le suivi de la référence par la tension  $V_{dc}$  est précis, avec un dépassement très faible, inférieur à 1 %.

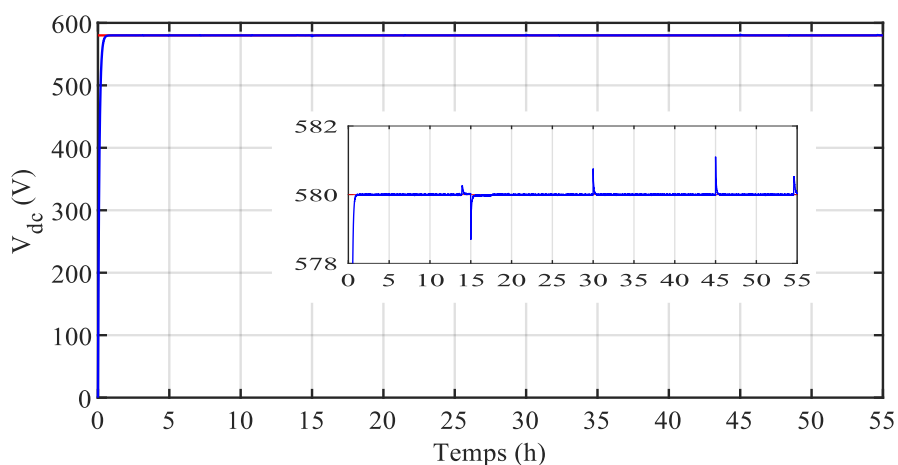


Figure IV.15 Évolution de la tension du bus continu avec zoom

### Performances du contrôle DTC

Les performances du contrôle DTC sont analysées à travers la qualité de la régulation du flux statorique et du couple électromagnétique. La figures (IV.16) montre que le flux statorique estimé suit parfaitement sa référence, et la figure et (IV.17) représente la trajectoire circulaire du flux statorique avec un rayon nominal (0,7 Wb). De même, la figure (IV.18) confirme que le couple électromagnétique suit aussi sa référence.

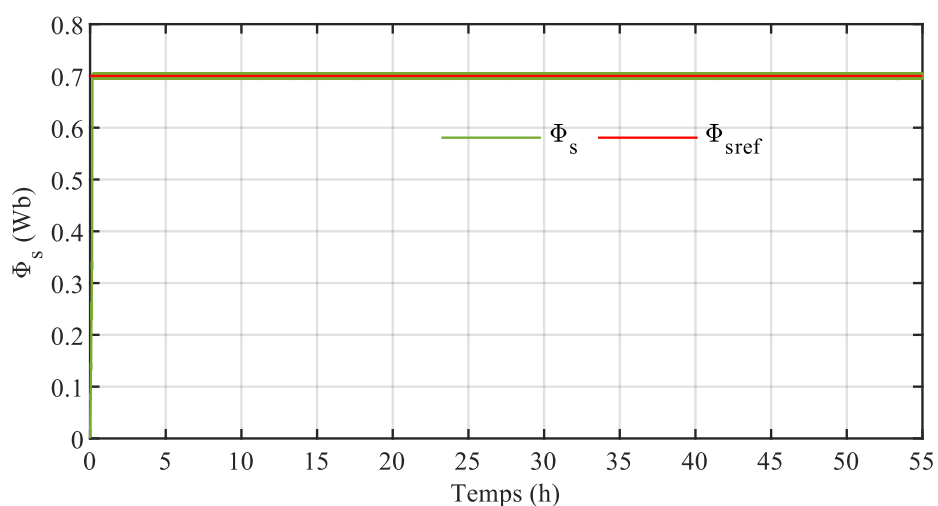


Figure IV.16 Amplitude du flux statorique

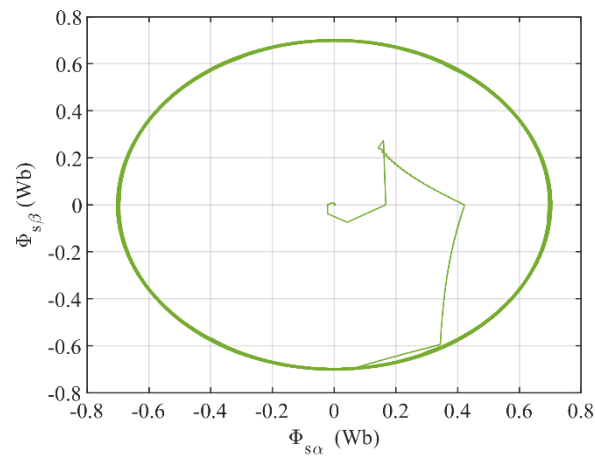


Figure IV.17 Flux statorique, trajectoire circulaire

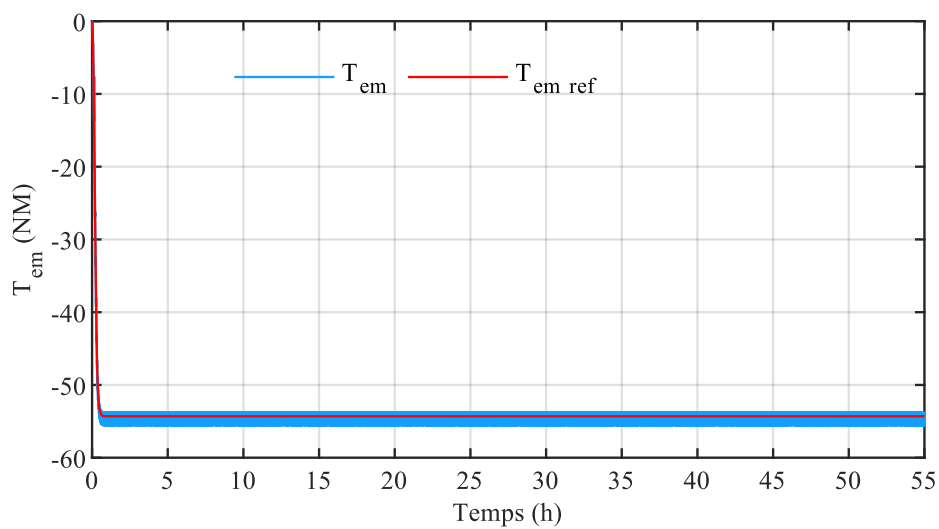


Figure IV.18 Évolution du couple électromagnétique

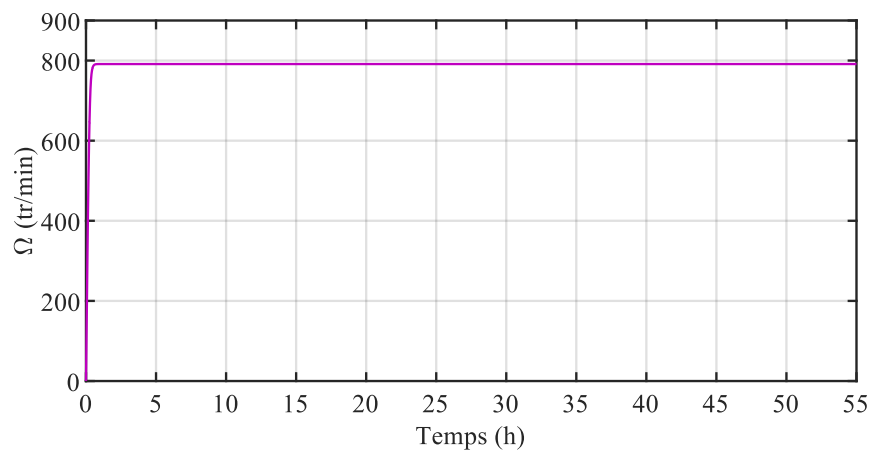


Figure IV.19 Profile de la vitesse de rotation



## IV.9 Conclusion

Ce chapitre a porté sur l'étude d'une chaîne de conversion éolienne autonome intégrant une génératrice la génératrice asynchrone auto excitée et un système de stockage hybride combinant batteries et supercondensateurs. L'objectif principal était d'optimiser la gestion du flux d'énergie via une régulation efficace de la tension du bus DC. Les simulations menées dans différents scénarios distincts ont permis de valider la performance du programme de gestion énergétique développé. Les résultats ont mis en évidence la complémentarité des deux dispositifs de stockage : le supercondensateur, rapide et réactif, gère les fluctuations brusques, tandis que la batterie assure un soutien énergétique plus stable. Cette étude intégrée améliore significativement la fiabilité et l'adaptabilité du système face aux variations de la charge et de la production éolienne.

*{Conclusion Générale}*

## Conclusion générale

### Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur l'étude des systèmes de conversion d'énergie éolienne autonomes, adaptés à l'alimentation des sites isolés. L'accent a été mis sur la génératrice asynchrone auto-excitée (SEIG), choisie pour sa simplicité et sa robustesse dans un environnement autonome. L'objectif principal a été de mettre en œuvre une stratégie de commande appropriée afin d'évaluer les performances de cette machine dans un fonctionnement hors réseau. Pour répondre à cette problématique, le travail a été structuré en deux axes principaux.

La première partie a été consacrée au développement d'une technique de commande appliqué à une SEIG associée à un redresseur commandé, dans le but d'assurer une tension de sortie continue et stable malgré les fluctuations de vitesse du vent et de charge. Une stratégie de commande directe du couple (DTC) à deux niveaux a été mise en œuvre, permettant d'évaluer l'efficacité de cette approche en termes de régulation.

La seconde partie s'est focalisée sur l'intégration d'un système de stockage hybride, combinant batteries et supercondensateurs, afin de compenser l'intermittence de la ressource éolienne. Ce système vise à garantir une alimentation électrique stable et fiable, même en présence de variations importantes de la production ou de la demande.

Dans le premier chapitre, les bases théoriques relatives aux systèmes de conversion d'énergie éolienne ont été présentées. Après un rappel du contexte énergétique mondial, différentes topologies de chaînes de conversion autonomes ont été passées en revue, en insistant particulièrement sur les générateurs les plus adaptés aux systèmes isolés. La génératrice asynchrone à cage d'écureuil s'est révélée être un choix pertinent grâce à sa robustesse, sa simplicité de mise en œuvre et son coût modéré.

Le deuxième chapitre a permis d'élaborer un modèle mathématique complet du système éolien autonome étudié. Ce modèle intègre les différents composants essentiels, notamment les machines asynchrones et les convertisseurs de puissance. Le dispositif d'auto-amorçage, élément clé du système, a également été modélisé de manière approfondie. L'ensemble de cette modélisation a constitué la base des simulations présentées dans les chapitres suivants.

Les troisième et le quatrième chapitre ont porté sur la commande de la SEIG à l'aide de la stratégie DTC à deux niveaux. Les simulations, effectuées sous Matlab à partir du modèle

## Conclusion générale

analytique, ont permis de tester les performances du système en conditions variables. Les résultats ont montré une régulation efficace de la tension redressée, du flux magnétique et du couple électromagnétique, démontrant ainsi la robustesse de la commande face aux fluctuations.

Enfin, le dernier chapitre s'est attaché à la mise en œuvre d'un algorithme de gestion de l'énergie. Ce système vise à maintenir l'état de charge (*SoC*) des batteries et supercondensateurs dans des plages optimales, assurant ainsi la continuité de l'alimentation. Les simulations réalisées ont mis en évidence la capacité du système à équilibrer de manière dynamique la production et la consommation, validant l'efficacité de la stratégie proposée, ce travail a permis de démontrer la faisabilité et la pertinence de l'utilisation d'une SEIG associée à un système de commande et un stockage hybride pour alimenter de manière fiable un site isolé à partir de l'énergie éolienne.

{Liste des références}



## Référence bibliographique

- [1] H. Sadough, 2008. Available: <http://www.teheran.ir/spip.php?article181#gsc.tab=0>.
- [2] "THE MILLS ARCHIVE TRUST "Poul la Cour (1846-1908)", 2024. [Online]. Available: <https://new.millsarchive.org/2022/02/17/poul-la-cour/>.
- [3] IPCC, "Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change," Working Group III Report, 2022. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
- [4] K. BERABEZ, "Contribution au contrôle par dispositifs d'électronique de puissance d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée dédiée aux systèmes éoliens autonomes," bejaia, 2025.
- [5] MERAH OUSSAMA, MEBREBECHE MOHAMED NABIL, "Commande avancée d'une éolienne à vitesse variable," TIARET, 2023.  
<http://dspace.univ-tiaret.dz/handle/123456789/15559>
- [6] Mohammad Dehghani Madvar, Farzin Ahmadi, Reza Shirmohammadi, Alireza Aslani, "Forecasting of wind energy technology domains based on the technology life cycle approach," 2019. Available:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484719301337?via%3Dihub>.
- [7] Mouna Ben Smida, Anis Sakly, "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines," 2015. Available: <https://apc.aast.edu/ojs/index.php/RESA/article/view/01.1.081>.
- [8] Cherif Aymen Abdelsamiaa, Boutemra Mehdi, "Étude et Simulation d'une Ferme Éolienne Connectée au Réseau," UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET , 2019.  
<http://dspace.univ-tiaret.dz/handle/123456789/2751>
- [9] Ismael A. de Azevedo; Luciano S. Barros; Caio D. Cunha, *Variable Structure Model Reference Adaptive Control for Squirrel-Cage Induction Generator-Based Wind Energy Conversion Systems*, 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9529431>
- [10] Gaillard, Arnaud, *Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service*, 2018. <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748204v1/document>
- [11] Bin Li, Jun Liu, *Progress and directions in low-cost redox-flow batteries for large-scale energy storage*, 2017. <https://academic.oup.com/nsr/article/4/1/91/2866462>

- [12] Kassa. Idjdarene, *Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes*, Université Abderrahmane Mira - Bejaïa ed., Bejaïa, 2010. <https://theses.fr/2010LIL10124>
- [13] POITIERS, Frédéric, *ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE:-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*, 2003. <https://theses.hal.science/tel-00011383v1>
- [14] Brahimi Abdelmalek, Ali Talbi, *Etude et Modélisation d'une Génératrice Asynchrone à Cage dans un Système Éolien*, 2021. <https://di.univ-blida.dz/jspui/handle/123456789/13193>
- [15] Bhim Singh, Madhusudan Singh, A. K. Tandon, *Transient Performance of Series-Compensated Three-Phase Self-Excited Induction Generator Feeding Dynamic Loads*, 2010. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5462945/authors#authors>
- [16] T. Ouchbel, S. Zouggar, M. Seddik, M. Oukili, M. El Hafyani, *Régulation de la puissance d'une éolienne asynchrone à vitesse variable à l'aide d'un compensateur statique d'énergie réactive (SVC)*, 2011. [https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v015\\_n3\\_texte\\_8.pdf](https://www.cder.dz/vlib/revue/pdf/v015_n3_texte_8.pdf)
- [17] Oyiogu Dennis, Victor Chike Ogbob, Augustine Nonso Nwoye, *Voltage Stability Improvement in Power System Using STATCOM and SVC*, 2024. <https://www.researchgate.net/publication/382143071>
- [18] Belgacem Riadh, Ali Ahmed Lounis, *Apport d'un STATCOM dans un système de conversion d'énergie photovoltaïque (PV) connecté au réseau électrique.*, 2022. <http://dspace.univ-tiaret.dz/handle/123456789/2590>
- [19] Kahina Berabez, Ismail Hacini, Farid Hamoudi, Kassa Idjdarene, "Enhancement DTC Control for SEIG in Variable-Speed Wind Turbines, Associated with an Energy Storage System," 2024. [https://www.researchgate.net/publication/382187590\\_Enhancement\\_DTC\\_Control\\_for\\_SEIG\\_in\\_Variable-Speed\\_Wind\\_Turbines\\_Associated\\_with\\_an\\_Energy\\_Storage\\_System](https://www.researchgate.net/publication/382187590_Enhancement_DTC_Control_for_SEIG_in_Variable-Speed_Wind_Turbines_Associated_with_an_Energy_Storage_System)
- [20] Deepsikha Panda, Bharat Singh Rajpurohit, *Real-time FuzzyLogic Based Power Quality Analysis of Hybrid microgrid System*, 2019. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8709608/authors#authors>
- [21] Robert W. Erickson, Dragan Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, Ed., 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-43881-4>

- [22] IDIR ISSAD, KASSA IDJDARENE, SOFIA LALOUNI, *DIRECT TORQUE CONTROL USING SPACE VECTOR MODULATION OF WIND PUMPING SYSTEM WITH STORAGE*, 2018.  
[http://www.revue.elth.pub.ro/upload/67670108\\_IIssad4\\_RRST\\_4\\_2018\\_pp\\_397-402](http://www.revue.elth.pub.ro/upload/67670108_IIssad4_RRST_4_2018_pp_397-402)
- [23] Ouafia Fadi, Soufiane Gaizen, Ahmed Abbou, *SM Versus PI Tunning for PWM Rectifier for SEIG in Wind Energy Application*, Springer, Cham ed., 2021.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2\\_152](https://doi.org/10.1007/978-3-030-73882-2_152)
- [24] J. Mitali, S. Dhinakaran, A.A. Mohamad, *Energy storage systems: a review*, 2022.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S277268352200022X?via%3Dihub>
- [25] Croci, Lila, *Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs*, 2013.  
<https://theses.hal.science/tel-00943296v1>
- [26] Mustafa Ergin Şahin, Frede Blaabjerg, Ariya Sangwongwanich, "A Comprehensive Review on Supercapacitor Applications and Developments," 2022. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/3/674>.
- [27] Thanikanti Sudhakar Babu, Krishnakumar R. Vasudevan, Vigna K. Ramachandaramurthy, Suleiman Bala Sani, Sansubari Chemud, Rosli Mat Lajim, *A comprehensive review of hybrid energy storage systems: Converter topologies, control strategies and future prospects*, IEEE Access, 8, 148702148721, 2020.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9165104?denied=>
- [28] CONNAISSANCE DES ÉNERGIES, "STEP : stations de transfert d'énergie par pompage," 2024. [Online]. Available: <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/hydroelectricite-stations-de-transfert-denergie-par-pompage-step>.
- [29] A. Rogers, A. Henderson, X. Wang, M. Negnevitsky, *Compressed air energy storage: Thermodynamic and economic review*, 2014.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6939098>
- [30] D. Seyoum, M.F. Rahman, C. Grantham, Inverter supplied voltage control system for an isolated induction generator driven by a wind turbine, 2003.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/1257557>
- [31] HIKA Brahim, KHAKHA Ismail, *La commande DTC par logique floue d'un moteur d'un moteur d'un moteur à induction alimenté par un onduleur de tension multi niveaux multi niveaux multi niveaux multi niveaux*, OUARGLA, 2010.  
[https://www.researchgate.net/publication/324312125\\_La\\_commande\\_DTC\\_par\\_logique\\_floue\\_d'un\\_moteur\\_a\\_induction\\_alimente\\_par\\_un\\_onduleur\\_de\\_tension\\_multi\\_niveaux](https://www.researchgate.net/publication/324312125_La_commande_DTC_par_logique_floue_d'un_moteur_a_induction_alimente_par_un_onduleur_de_tension_multi_niveaux)

- [32] MOHAMED, OULED MOHAMED SALEM SIDI, *Commande Directe du Couple(DTC) d'une Machine Asynchrone à Cage*, Ghardaïa, 2015. <http://dspace.univ-ghardaia.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/4959/1/Commande%20Directe%20du%20Couple%28DTC%29.pdf>
- [33] BOUDJEMEL, Ahmed Elamine, *Commande DTC\_Neuro\_Floue D'une Machine Asynchrone Triphasée*, LAGHOUAT, 2021.  
<http://dspace.lagh-univ.dz/bitstreams/59a87fb2-fb17-4ef8-9d2d-2c22283d4fd6/download>
- [34] Hanane, CHERGUI, *Commande Directe Du Couple d'un Moteur Asynchrone avec la Reconstitution de l'Algorithme Des Commutations par la Logique Floue*, Ain-Temouchent, 2020.  
[https://dspace.univ-temouchent.edu.dz/bitstream/123456789/3702/1/PFE%20CHERGUI%20Hanane\\_compressed.pdf](https://dspace.univ-temouchent.edu.dz/bitstream/123456789/3702/1/PFE%20CHERGUI%20Hanane_compressed.pdf)
- [35] Gdaim, Soufien, *Commande directe de couple d'un moteur asynchrone à base de techniques intelligentes*, Monastir, 2013.  
<https://theses.hal.science/tel-01456394/document>
- [36] Sahri, Younes, *Contribution à la commande non linéaire et à la gestion d'énergie d'un système hybride d'énergies renouvelables.*, 2022: Université A. MIRA Bejaia.  
[https://www.researchgate.net/publication/363462033\\_](https://www.researchgate.net/publication/363462033_)
- [37] Zineb Cabrane, Mohammed Ouassaid, Mohamed Maaroufi, *Integration of supercapacitor in photovoltaic energy storage: Modelling and control*, 2014.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7059773>
- [38] Younghyun Kim, Vijay Raghunathan, Anand Raghunathan, *Design and Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Electrical Energy Storage Systems for Regulation Services*, 2016. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7740844>
- [39] Mustafa Farhadi, Osama Mohammed, *Energy Storage Technologies for High-Power Applications*, 2015. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7362184>
- [40] Sofia Belaid Lalouni, Djamila Rekioua, Kassa Idjdarene, Abdelmounaim Tounzi, *Maximum Power Point Tracking Based Hybrid Hill-climb Search Method Applied to Wind Energy Conversion System*, 2015.  
[https://www.researchgate.net/publication/276297617\\_Maximum\\_Power\\_Point\\_Tracking\\_Based\\_Hybrid\\_Hill-climb\\_Search\\_Method\\_Applied\\_to\\_Wind\\_Energy\\_Conversion\\_System](https://www.researchgate.net/publication/276297617_Maximum_Power_Point_Tracking_Based_Hybrid_Hill-climb_Search_Method_Applied_to_Wind_Energy_Conversion_System)

- [41] Kassa Idjdarene, Djamila Rekioua, Toufik Rekioua, Abdelmounaim Tounzi, *Vector Control of Autonomous Induction Generator with Battery Storage System*, 2017.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8477323/authors#authors>
- [42] Pranoy Kumar Singha Roy, H. Bora Karayakaa, Yanjun Yana, Yazan Alqudahb, *Investigations into best cost battery-supercapacitor hybrid energy storage system for a utility scale PV array*, 2019.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X18304158>
- [43] Rubén Pena, Roberto Cardenas, Enrique Escobar, Jon Clare, Pat Wheeler, *Control strategy for a Doubly-Fed Induction Generator feeding an unbalanced grid or stand-alone load*, 2009.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779608002022>
- [44] Akassewa Tchapo Singo, *Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome.*, 2010.  
<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01748214v1>
- [45] Dan Xu, Le Zhang, Bin Wang, Guangliang Ma, *Modeling of supercapacitor behavior with an improved two-branch equivalent circuit. IEEE Access*, 2019.  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8651624/authors#authors>



# {Annexes}

## A. Paramètres de la turbine éolienne

Tableau A.1 Paramètres de la turbine éolienne [43]

Paramètres	Valeur
Puissance nominale	7.5 KW
Rayon des pales	3.24 m
Gaine de multiplicateur de vitesse	5.065
Coefficient de frottement dynamique ( $f$ )	0,0025 N.m/rad.s-1
Moment d'inertie ( $J$ )	0,230 kg.m2

## B. Paramètres de la génératrice asynchrone auto-excitée

Tableau A.2 Paramètres de la génératrice asynchrone auto-excitée [12]

Paramètres	Valeur
Puissance nominale	5.5 KW
Tension	230/400 V
Courant	23,8/13,7 A
Résistance statorique	1,07131 $\Omega$
Résistance rotorique	1,29511 $\Omega$
Inductance de fuite statorique	8,9382 mH
Inductance de fuite rotorique	4,8613 mH
Inductance mutuelle (H)	0.10474 H
Nombre de paires de pôles	4
Moment d'inertie ( $J$ )	0,230 kg.m2



### C. Les paramètres de la batterie

Le modèle de batterie considéré dans cette étude est basé sur le **Modèle RC**. Ce modèle est caractérisé par les paramètres suivants :

**Tableau A.3 Les paramètres d'une batterie [44]**

Paramètre	Valeurs
Tension ( $V_{Bat-éle}$ )	12 V
Capacité ( $C_{Bat-éle}$ )	260Ah
Résistance interne ( $R_{int}$ )	0.08 $\Omega$
<b>Nombre des batteries en série (<math>N_s</math>)</b>	20
<b>Nombre des batteries en parallele (<math>N_p</math>)</b>	4

### D. Les paramètres de supercondensateur

Le modèle de supercondensateur étudié dans ce travail repose sur le modèle RC à deux branches. Il se distingue par les paramètres suivants :

**Tableau A.4 Les paramètres de supercondensateur [45]**

Paramètre	Valeurs
Tension ( $V_{Sc-éle}$ )	2.7 V
Capacité ( $C$ )	350 F
Résistance ( $R_1$ )	0.0081 $\Omega$
Résistance ( $R_2$ )	0.0643 $\Omega$
Capacité ( $C_0$ )	378.0197 F
Capacité ( $C_v$ )	0.1248 F/V
<b>Nombre des supercondansateurs en série (<math>N_s</math>)</b>	80
<b>Nombre des supercondansateurs en parallele (<math>N_p</math>)</b>	1



## Résumé

**Résumé :** Ce mémoire porte sur la conversion d'énergie éolienne en site isolé, à travers l'utilisation d'une génératrice asynchrone auto-excitée (SEIG). Une commande directe du couple (DTC) à deux niveaux a été appliquée afin d'assurer une tension continue stable malgré les variations de vitesse du vent. Un modèle mathématique complet du système a été élaboré, intégrant la machine, les convertisseurs et le dispositif d'auto-excitation. Des simulations sous MATLAB ont permis d'analyser les performances du système. Par la suite, un système de stockage hybride, combinant batteries et supercondensateurs, a été intégré pour compenser l'intermittence de la ressource. Un algorithme de gestion énergétique a été développé pour maintenir l'équilibre production/consommation. Les résultats obtenus montrent une bonne stabilité de la tension, du flux et du couple. Ce travail valide la faisabilité d'une alimentation autonome fiable par énergie éolienne.

**Abstract:** This work focuses on wind energy conversion for isolated sites, using a self-excited induction generator (SEIG). A two-level Direct Torque Control (DTC) strategy was implemented to ensure a stable DC output voltage despite variations in wind speed. A complete mathematical model of the system was developed, including the machine, power converters, and self-excitation device. Simulations in MATLAB were carried out to evaluate system performance. A hybrid energy storage system, combining batteries and supercapacitors, was integrated to address wind intermittency. An energy management algorithm was developed to maintain a balance between production and consumption. The results showed good regulation of voltage, flux, and electromagnetic torque. This work confirms the feasibility of reliably supplying an isolated site with wind energy.

**المخلص:** يركز هذا العمل على تحويل الطاقة الريحية لتغذية المواقع المعزولة، باستخدام مولد حثي ذاتي الإثارة (SEIG). تم تنفيذ إستراتيجية التحكم المباشر في العزم (DTC) بمستويين لضمان إلى الحفاظ على استقرار الجهد في وصل التيار المستمر، رغم تقلبات سرعة الرياح. تم تطوير نموذج رياضي كامل للنظام يشمل الآلة، ومحولات الطاقة، وجهاز الإثارة الذاتية. أُجريت محاكاة باستخدام برنامج MATLAB لتقييم أداء النظام. كما تم دمج نظام تخزين طاقة هجين يجمع بين البطاريات والمكثفات الفائقة للتعامل مع تقطع المورد الريحي. وتم تطوير خوارزمية ببرنامج لتسيير لإدارة الطاقة بهدف الحفاظ على التوازن بين الإنتاج والاستهلاك. أظهرت النتائج تحكمًا جيدًا في الجهد، والتدفق، والعزم الكهرومغناطيسي. ويؤكد هذا العمل إمكانية تغذية موقع معزول بالطاقة الريحية بشكل موثوق.